

# Korištenje zabavnih elemenata popularne kulture za jaču popularizaciju znanosti

---

Uzelac, Ana

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:263294>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-28**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

Ana Uzelac

KORIŠTENJE ZABAVNIH ELEMENATA  
POPULARNE KULTURE ZA JAČU  
POPULARIZACIJU ZNANOSTI

Diplomski rad

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ  
FIZIKA; SMJER: NASTAVNIČKI

**Ana Uzelac**

Diplomski rad

**Korištenje zabavnih elemenata popularne  
kulture za jaču popularizaciju znanosti**

Voditelj diplomskog rada: prof. dr. sc. Dubravko Klabučar

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo: 1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

Datum polaganja: \_\_\_\_\_

Zagreb, 2021.



## Sažetak

Ovaj rad bavi se tematikom popularizacije znanosti, konkretnije fizike elementarnih čestica, putem različitih igara čija pravila se mogu dodatno prilagoditi u skladu s razinama znanja i dobi igrača, kako bi oni kroz zabavu mogli povećati svoje znanje. Prvenstveno se radi o posebnom špilju karata u kojem karte predstavljaju kvarkove i antikvarkove različitih okusa i boja, kao i različite okuse leptona i antileptona, a za kojeg su osmišljene mnoge različite vrste igara. Pravila takvih igara u skladu su sa osnovnim zakonima čestične fizike. U različitim igrama uključene su raznolike teme čestične fizike kao što su formiranje hadrona iz kvarkova, osnovna svojstva elementarnih čestica, pojava kozmičkih pljuskova, raspadi čestica i zakoni očuvanja, kvark-gluonska plazma i njena vremenska evolucija, međudjelovanje elementarnih čestica te otkriće Higgsovog bozona.

Nakon pregleda najosnovnijih koncepata vezanih za elementarne čestice, u radu su opisane i analizirane različite takve igre pri čemu je dana i fizikalna pozadina, odnosno dodatno fizikalno proširenje tematike pojedinih igara. Također, u radu su prezentirani i prijedlozi za dvije nove igre za koje bi se mogao koristiti navedeni špil karata.

Ključne riječi: fizika elementarnih čestica, igre, karte, popularizacija znanosti

# Using amusing elements of popular culture to strengthen science outreach

## Abstract

This paper deals with the topic of popularization of science, more precisely with physics of elementary particles, through various games whose rules can be further adjusted according to the levels of knowledge and age of the players, so that they can increase their knowledge through fun. It is primarily a special deck of cards in which the cards represent quarks and antiquarks of different flavors and colors, as well as different flavors of leptons and antileptons, and for which many different types of games have been designed. The rules of such games are in accordance with the basic laws of particle physics. Various games involve a variety of particle physics topics such as quark hadron formation, basic properties of elementary particles, cosmic showers, particle decay and conservation laws, quark-gluon plasma and its time evolution, elementary particle interactions, and the discovery of the Higgs boson.

After reviewing the basic concepts related to elementary particles, the paper describes and analyzes various games giving the physical background, or additional physical expansion of the themes of individual games. Also, the paper presents suggestions for two new games for which the same deck of cards can be used.

Keywords: elementary particle physics, games, cards, popularization of science

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Kako se ljudska percepcija o “elementarnim” česticama mijenjala kroz povijest .....	2
2.1. Od stare Grčke do 1930-ih godina .....	2
2.2. Od 1932. godine pa do danas – Otkriće mnoštva (anti)čestica .....	6
3. Elementarne čestice i njihova svojstva .....	11
3.1. Leptoni .....	12
3.1.1. Šest različitih leptoni .....	12
3.1.2. Leptonski brojevi i njihovo očuvanje .....	15
3.2. Kvarkovi .....	18
3.2.1. Šest različitih kvarkova .....	18
3.2.2. Boje kvarkova i formiranje hadrona .....	22
3.2.3. Barionski broj i njegovo očuvanje .....	25
3.3. Međudjelovanje elementarnih čestica – Četiri temeljne sile i čestice izmjene .....	26
3.3.1. Gravitacijska sila .....	27
3.3.2. Slaba sila .....	27
3.3.3. Elektromagnetska sila .....	30
3.3.4. Jaka sila .....	31
3.3.5. Pregled temeljnih sila i Teorija velikog ujedinjenja.....	33
3.4. Pregled elementarnih čestica prema Standardnom modelu .....	34
4. Kartaške igre kvarkovske materije .....	36
4.1. Igra „ANTI“ .....	37
4.1.1. Pravila i tijek igre .....	37
4.1.2. Primjer razvoja igre „ANTI“ .....	42
4.1.3. Za koga je namijenjena igra „ANTI“? .....	45
4.1.4. Fizikalna pozadina igre – O antičesticama .....	46
4.1.4.1. Po čemu se antičestice razlikuju od čestica?.....	47
4.1.4.2. Anihilacija i tvorba parova.....	48
4.2. Igra „KVARKOVSKA TVAR“ .....	50
4.2.1. Pravila i tijek igre .....	50
4.2.2. Za koga je namijenjena igra „KVARKOVSKA TVAR“?.....	56
4.2.3. Fizikalna pozadina igre – O kvark-gluonskoj plazmi, akceleratorima čestica i fizičari ranog svemira .....	57
4.2.3.1. Od Velikog praska do svemira mlađeg od $10^{-34}$ sekundi.....	57
4.2.3.2. Od svemira starog $10^{-34}$ sekundi do tri minute.....	60
4.2.3.3. Pogled u fiziku ranog svemira pomoću sudarivača i ubrzivača čestica .....	62

4.3.	<i>Igra „DETEKTIRAJMO!“</i>	63
4.3.1.	<i>Pravila i tijek igre</i>	63
4.3.2.	<i>Za koga je namijenjena igra „Detektirajmo!“?</i>	65
4.3.3.	<i>Fizikalna pozadina igre – O raspadima čestica i zakonima očuvanja</i>	66
4.4.	<i>Igra „KOZMIČKI PLJUSAK“</i>	70
4.4.1.	<i>Pravila i tijek igre</i>	70
4.4.2.	<i>Za koga je namijenjena igra „Kozmički pljusak“?</i>	74
4.4.3.	<i>Fizikalna pozadina igre – Što je kozmički pljusak?</i>	75
4.4.3.1.	<i>O primarnim kozmičkim zrakama</i>	75
4.4.3.2.	<i>O sekundarnim kozmičkim zrakama i kozmičkim pljuskovima</i>	78
4.5.	<i>Igra „MEMORY KVARKOVSKOG SADRŽAJA“</i>	81
4.5.1.	<i>Pravila i tijek igre</i>	81
4.5.2.	<i>Za koga je namijenjena igra „Memory kvarkovskog sadržaja“?</i>	85
4.6.	<i>Dodatak igri 4.5. - Igra „PRONAĐI HIGGSOV BOZON“</i>	85
4.6.1.	<i>Pravila i tijek igre</i>	86
4.6.2.	<i>Za koga je namijenjena igra „Pronađi Higgsov bozon“?</i>	90
4.6.3.	<i>Fizikalna pozadina igre – O potrazi za Higgsovim bozonom</i>	91
4.6.3.1.	<i>O Standardnom modelu i Higgsovom polju</i>	91
4.6.3.2.	<i>O otkrićima u srpnju 2012. godine</i>	93
4.7.	<i>Igra „ČESTIČNI POKER“</i>	97
4.8.	<i>Igra „KVARKOVSKI RATOVI“</i>	104
4.8.1.	<i>Pravila i tijek igre</i>	106
4.8.2.	<i>Za koga je namijenjena igra „Kvarkovski ratovi“?</i>	109
4.9.	<i>„RUBIKOVA KOCKA KVARKOVSKOJE TVARI“</i>	110
4.9.1.	<i>Pravila i tijek igre</i>	114
4.9.2.	<i>Fizikalna pozadina igre- O Rubikovoj kocki i njevoj vezi sa kvarkovskom tvari</i>	116
5.	<i>Prijedlozi novih igara</i>	120
5.1.	<i>Igra „MEĐUDJELOVANJE ELEMENTARNIH ČESTICA“</i>	120
5.1.1.	<i>Pravila i tijek igre</i>	120
5.1.2.	<i>Za koga je namijenjena igra „Međudjelovanje elementarnih čestica“?</i>	125
5.1.3.	<i>Fizikalna pozadina igre – O međudjelovanjima elementarnih čestica</i>	126
5.2.	<i>Igra „OSMOSTRUKI PUT“</i>	129
5.2.1.	<i>Pravila i tijek igre</i>	133
5.2.2.	<i>Za koga je namijenjena igra „Osmostruki put“?</i>	137
5.2.3.	<i>Fizikalna pozadina igre – „Osmostruki put“ u prikazu hadrona</i>	138
6.	<i>Zaključak</i>	143



<b>7. Dodatak</b> .....	144
<b>7.1. Upoznavanje sa čestičnim kartama</b> .....	144
<b>7.2. Imenovanje hadrona</b> .....	145
Popis literature.....	147

## 1. Uvod

Kvarkovi, bozoni, hadroni, leptoni i ostali pojmovi vezani za fiziku elementarnih čestica pojmovi su koji mnogim učenicima i studentima fizike, kao i ljudima koji se ne bave fizikom često zvuče tajanstveno, komplicirano i zastrašujuće.

Budući da elementarne čestice nisu opipljive niti ih je moguće optički vidjeti, za dostatno razumijevanje osnovnih koncepata, ideja i zakona o njima potrebno je indirektno i logičko zaključivanje, kao i bogato fizikalno predznanje. Samim time, naizgled „apstraktna“ svojstva elementarnih čestica poput boja, okusa i različitih zakona očuvanja mogu dovesti i do raznih miskoncepcija i pogrešnih interpretacija ako se ti pojmovi dobro ne razjasne, za što se često nema dovoljno vremena u klasičnom nastavnom programu osnovnih i srednjih škola.

Pa ipak, poznavanje osnovnih građevnih elemenata materije i njihovih interakcija izrazito je važno za pojedinca i formiranje njegove slike o svijetu u kojem se nalazi. Pogotovo je to važno za mlade koji su zainteresirani za znanost i koji se žele baviti fizikom, s obzirom na to da fizika elementarnih čestica predstavlja jedno od trenutno najinteresantnijih i najdinamičnijih polja moderne fizike.

Upravo zbog toga važno je pokušati popularizirati navedenu tematiku, za što mogu poslužiti kartaške igre koje široj javnosti približavaju osnovne pojmove fizike elementarnih čestica. Radi se o posebnom špilu karata u kojem karte predstavljaju kvarkove i antikvarkove različitih okusa i boja, kao i različite okuse leptona i antileptona, a za kojeg su osmišljene mnoge igre čija se pravila mogu i dodatno prilagoditi u skladu s razinama znanja i dobi igrača. Pravila takvih igara u skladu su sa osnovnim zakonima čestične fizike, a u različitim igrama spominju se i raznolike dodatne teme kojima igrači mogu nadograditi svoje znanje, poput formiranja hadrona iz kvarkova, kozmičkih pljuskova, raspada čestica, kvark-gluonske plazme, pa čak i otkrića Higgsovog bozona.

U ovom radu, nakon pregleda najosnovnijih koncepata vezanih za elementarne čestice, navedene igre bit će opisane i analizirane, pri čemu će biti dana i fizikalna pozadina, odnosno dodatno fizikalno proširenje tematike pojedinih igara.

Također, u radu su prezentirani i prijedlozi za dvije nove igre koje sam osmislila, za koje bi se mogao koristiti navedeni špil karata, kojima bi se moglo dodatno unaprijediti znanje čestične fizike.

## 2. Kako se ljudska percepcija o “elementarnim” česticama mijenjala kroz povijest

Američki pisac fantastike i biokemičar Isaac Asimov u svojem djelu *Dodavanje dimenzije: Sedamnaest eseja o povijesti znanosti* kazao je kako “U znanosti ne postoji otkriće, koliko god revolucionarno i koliko god blistajućeg shvaćanja bilo, koje nije proizašlo iz onog što je bilo prije. ‘Ako sam vidio dalje od drugih ljudi’, rekao je Isaac Newton, to je bilo zato što sam stajao na ramenima divova’.”[83] Upravo je taj citat poslužio kao inspiracija ovom poglavlju u kojem će biti riječi o razvoju ideje o elementarnim česticama kroz povijest. Iako su se pretpostavke o fundamentalnim česticama kroz godine u mnogo navrata pokazale neutemeljenima te su se drastično mijenjale, sve one su nas naposljetku dovele do današnjih eksperimentalno podržanih saznanja i suvremenih teorija, zbog čega ih je nužno spomenuti i uzeti u obzir pri upoznavanju sa fizikom elementarnih čestica.

### 2.1. Od stare Grčke do 1930-ih godina

Na pitanje „*Od čega je građen svijet oko nas*“ ljudi pokušavaju odgovoriti već tisućama godina. Različiti pokušaji dobivanja odgovora na to pitanje utjecali su na razvoj filozofije i znanosti, a samim time i na napredak ljudske civilizacije.

Prve ideje o postojanju fundamentalnih, osnovnih elemenata materije od kojih je izgrađen cijeli svijet oko nas stare su otprilike 2600 godina. U šestom stoljeću prije Krista, „grčki filozof Tales pokušao je odrediti prapočelo svijeta, to jest ono iz čega je sve postalo i u što se sve vraća, ne uplićući u to bogove i nadnaravna bića. Odgovor je našao u vodi kao počelu svega. Razlog tomu je nesumnjivo u nužnosti i važnosti vode u svakodnevnom životu svih živih bića.”[1] U petom stoljeću prije Krista, grčki filozof Empedoklo prvi uvodi pojam „elemenata“ u filozofiju. Prema njegovoj teoriji, svijet je građen od četiri osnovna elementa – vode, zemlje, zraka i vatre. Kako bi objasnio privlačenje i odbijanje različitih tvari, Empedoklo je pretpostavio postojanje „Ljubavi“ (Philia), i „Sukoba“ (Neikos).[3]

Ubrzo nakon Empedoklove ideje, rodila se nova, potpuno drugačija teorija o temeljnoj strukturi materije. Naime, otprilike 400 godina prije Krista, grčki filozofi Leukip i Demokrit razvili su pretpostavku da se sve tvari sastoje od veoma sitnih i *nedjeljivih* čestica, koje su nazvali atomima.<sup>1</sup> Prema njihovoj ideji, atomi su „ograničeni, tjelesni, tvrdi, puni, masivni, nepрониčni i nezamjetljivi, a međusobno se razlikuju bezbrojem oblika, veličina, masa, tvrdoća i načina kretanja. Naravno, nužno je da se atomi kreću, a taj problem se rješava uvođenjem pojma praznog prostora, koji je prema tom opisu suprotnost atoma, a u

---

<sup>1</sup> grč. ἄτομος = nedjeljiv, koji se ne može razdijeliti na manje dijelove.

neograničenosti praznog prostora atomi se slobodno kreću, sudaraju, odbijaju i preplicu, uzrokujući sve ono što opažamo.“[2] Međutim, ideja Leukipa i Demokrita nije dobila potporu većine filozofa u bliskoj budućnosti. Naime, „Platon, a poslije njega i Aristotel, ismijali su prazan prostor kao kršenje fizikalnih principa, govoreći kako je Demokritov atomizam „čista spekulacija“, koja se ne može provjeriti nikakvim opažanjem”.[4]

Teorija o postojanju atoma i praznog prostora tako je postala prilično nepopularna. Štoviše, većina znanstvenika i filozofa koji su živjeli u idućih 2000(!) godina odbacivali su takvu pomisao te su se priklonili Aristotelovim stavovima.

U srednjovjekovnoj aristotelovskoj fizici i filozofiji, jedno od temeljnih načela bila je ideja da je materija „kontinuirana“, a sav prostor ispunjen, u smislu da ne postoji nikakva praznina. Veliki renesansni književnik, redovnik i liječnik Francois Rabelais u svojem djelu „*Gargantua*“ prikladno je sumirao takvo načelo riječima „*natura abhorret vacuum*“, odnosno „priroda se boji praznine“.[5] Ovakav „strah od praznog prostora“, odnosno vakuuma koji je toliko dugo bio zastupljen i podržavan u akademskim zajednicama često se opisuje i izrazom „horror vacui.“

Međutim, takva razmišljanja su se počela mijenjati polovicom 17. stoljeća, kada je Evangelista Torricelli izumio živin barometar, u kojem je uočen vakuum! Samim time, uvriježena pretpostavka o nepostojanju praznine morala je biti odbačena. U idućih nekoliko desetljeća, mnoštvo znanstvenika počelo se vraćati prvotnoj ideji Leukipa i Demokrita o postojanju vakuuma, a samim time i o postojanju *nedjeljivih* atoma. 1804. godine, John Dalton (kojeg se često naziva i „ocem moderne kemije“), otkrio je da se mnogi kemijski fenomeni mogu objasniti uz pretpostavku postojanja „atoma“.[6] Prema njegovoj teoriji, sve tvari građene su od neuništivih atoma, a postoji onoliko vrsta atoma, koliko postoji različitih (do tada poznatih) kemijskih elemenata.

U 19. stoljeću J.C.Maxwell razvio je molekularno-kinetičku teoriju, čije je jedno od osnovnih načela činjenica da su sve tvari građene od atoma koji formiraju različite molekule, a gdje je veličina atoma otprilike procijenjena na  $10^{-10}$  m.[7] Na Maxwellovu teoriju nadovezao se Ludwig Boltzmann razvojem kinetičke teorije plinova. Međutim, atomska hipoteza nije lako prihvaćena u znanstvenim krugovima - gotovo svi njemački filozofi i mnogi znanstvenici poput Ernsta Macha i Wilhelma Ostwalda nisu vjerovali u postojanje

atoma<sup>2</sup>.<sup>[88]</sup> Atomska hipoteza o strukturi materije tek je početkom 20. stoljeća postala široko prihvaćena, kada je čvrsto eksperimentalno podržana.<sup>3</sup> Lijep opis važnosti atomske teorije i njenog prihvaćanja u znanstvenoj zajednici, dao je veliki fizičar 20. stoljeća, Richard Feynmann, koji je u svojoj knjizi "Osobitosti fizikalnih zakona", rekao:

*"Kad bi, u nekoj kataklizmi, svako znanstveno znanje bilo uništeno, i kad bi se samo jedna rečenica mogla prenijeti sljedećem naraštaju stvorenja, koja rečenica bi sadržavala najviše informacija u najmanje riječi? Smatram da je to hipoteza o atomu (ili činjenica o atomu, ili kako god to željeli zvati), da su sve stvari načinjene od atoma – malih čestica koje se motaju uokolo u neprestanom gibanju, privlačeći se kad su na maloj udaljenosti, ali odbijajući se kad su pritisnute jedna na drugu. U toj jednoj rečenici naći ćete golemu količinu informacija o svijetu, ako upotrijebite samo malo mašte i razmišljanja."*<sup>[2]</sup>

Pa ipak, ubrzo se pokazalo da atom *nije* fundamentalna i nedjeljiva četica. Naime, 1897. godine, J. J. Thomson je u pokusima sa (novoopaženim) katodnim zrakama otkrio da se one zapravo sastoje od sitnih čestica koje su negativno električki nabijene, nakon čega je i odredio njihov specifični naboj. Thomson je potom utvrdio da sve tvari, odnosno svi atomi sadrže takve čestice te ih je nazvao *elektronima*. Pretpostavivši da je iznos električnog naboja elektrona jednak iznosu naboja pozitivnog vodikovog iona, Thomson je zaključio da je masa elektrona otprilike 2000 puta manja od mase najlakšeg atoma -atoma vodika. Ispravnost Thomsonove pretpostavke potvrdio je fizičar R. Millikan koji je 1909. godine izravno izmjerio naboj elektrona.<sup>[7]</sup>

Ovim otkrićem, uslijedila su mnoga nova pitanja o samoj unutrašnjoj *strukturi* atoma. Zbog svojim malenih dimenzija<sup>4</sup> postalo je jasno da je nemoguće „zaviriti“ unutar atoma i izravno, optički vidjeti što se tamo nalazi. Samim time, počeli su se razvijati različiti modeli atoma, koji su nastojali pretpostaviti atomsku strukturu prema tadašnjim poznatim zakonima fizike. Prvi model je predložio sam Thomson, čija ideja je bila da je atom sastavljen od kugle

---

<sup>2</sup> To je možda, uz njegovu depresiju i bipolarni poremećaj, u konačnici i pridonijelo Boltzmannovom suicidu - Machov student, Gustav Jaumann pogrešno je interpretirao Hertza misleći kako je svo elektromagnetsko ponašanje kontinuirano, da atomi i molekule ne postoje i da su sve fizikalne pojave elektromagnetske. Takva interpretacija je duboko deprimirala Boltzmann, budući da je mogla predstavljati eventualni kraj njegove kinetičke teorije. 1904. godine, na konferenciji u St. Louisu većina fizičara i dalje je odbacivala atomsku teoriju, zbog čega Boltzmann nije bio ni pozvan u odsjek za fiziku, već u odsjek za „primijenjenu matematiku“.<sup>[88]</sup>

<sup>3</sup> Za to se pokazao važnim Einsteinov rad o Brownovom gibanju 1905., „jer nakon što je njegove predikcije tri godine kasnije eksperimentalno potvrdio Jean Perrin, više nije bilo nikakve sumnje da atomi i molekule doista postoje.“<sup>[89]</sup>

<sup>4</sup> Kao što je ranije napomenuto, u redu veličine otprilike oko  $10^{-10}$  m

homogeno nabijene pozitivnim nabojem, u koju su, „poput šljiva u pudingu“, uronjeni negativno nabijeni elektroni. Thomsonov model se zbog navedene analogije popularno nazivao i modelom pudinga sa šljivama!

Međutim, takav model ubrzo se pokazao pogrešnim, a pritom je otkrivena još jedna subatomska čestica. Naime, 1910. i 1911. godine, Ernest Rutherford i njegovi suradnici odlučili su testirati Thomsonov model proučavanjem raspršenja alfa-čestica na atomima zlata, pri čemu su zaključili da pozitivan naboj u atomu nije jednoliko raspoređen, već je sav koncentriran u veoma malenom dijelu atoma (veličine oko  $10^{-15}$  m), koji sadrži gotovo cijelu njegovu masu.[7] Taj pozitivni djelić atoma nazvan je atomskom *jezgrom*.

U idućih nekoliko godina, fizičari su pokušavali odgovoriti na iduće pitanje koje im se nametnulo – je li atomska jezgra kompaktna cjelina, ili se i ona sama sastoji od još sitnijih čestica. Odgovor na to pitanje dao je upravo Rutherford 1919. godine, kada je u eksperimentima u kojima je alfa čestice sudarao sa atomima dušika došao do revolucionarnog otkrića da se sve atomske jezgre sastoje od jezgara atoma vodika, koje je nazvao *protonima*. [6]

Međutim, uspoređivanjem masa jezgara različitih atoma s ukupnim masama protona<sup>5</sup> u njima, otkriveno je da su mase jezgara znatno veće.[7] Samim time, postalo je jasno da protoni i elektroni ne mogu biti jedine čestice koje sastavljaju atomske jezgre. Werner Heisenberg je, kako bi se razriješio taj problem, predložio hipotezu da se u jezgri atoma nalaze još i električki neutralne čestice, čija je masa približno jednaka masi protona. Takve čestice nazvane su „*neutronima*“, a njihovo postojanje uistinu je i dokazao 1932. godine James Chadwick.[6]

Dakle, prije samo nešto manje od 90 godina, vjerovalo se da su elektron, proton i neutron elementarne, nedjeljive čestice koje izgrađuju atome i svu postojeću materiju. Osim ovih čestica, u to vrijeme znalo se još i za fotone koje je Einstein 1905. godine opisao kao kvante energije elektromagnetskog zračenja koji se mogu smatrati bezmasenim, električki neutralnim česticama.

---

<sup>5</sup> Mase elektrona su u odnosu na mase protona toliko malene da ih se može i zanemariti kod ovakvog izračuna.

## 2.2. Od 1932. godine pa do danas – Otkriće mnoštva (anti)čestica

1932. godine, američki fizičar Carl D. Anderson je prilikom istraživanja čestica koje bombardiraju Zemlju iz svemira otkrio do tada nepoznate čestice, za koje je utvrđeno da imaju jednaku masu i iznos električnog naboja kao elektroni, ali da se radi o pozitivno nabijenim česticama.[6]

Ovo otkriće potvrdilo je predviđanja mnogih teoretičara. Naime, 1928. godine, Paul Dirac razvio je relativističku generalizaciju Schrödingerove jednadžbe za elektron, u kojoj su se pojavila neobična svojstva – za slobodni elektron, predviđena su i „negativna“ stanja. (odnosno ona niža od  $-m_e c^2$ ) Samim time, postavilo se i pitanje *zašto* elektroni ne mogu emitirati foton energije veće (ili jednake) od  $2m_e c^2$ , i prijeći iz „pozitivnog“ u „negativno“ energetska stanje. Dirac je pokušao objasniti navedeni problem pretpostavkom da su negativna energetska stanja „popunjena“ elektronima, koji se iz nekog razloga ne mogu opaziti, ali drugi elektroni samim time ne mogu prijeći u takva (već popunjena) stanja. Nepopunjeno, odnosno „prazno“ mjesto u takvim negativnim energetskim stanjima moglo bi se usporediti sa „šupljinama“ u valentnim vrpcama poluvodiča, koje se ponašaju poput pozitivnih naboja. Pretpostavka Diraca bila je da se one mogu poistovjetiti s protonima, međutim, Andersonovim otkrićem utvrđeno je da upravo novootkrivena čestica predstavlja fizikalno opažanje navedene „praznine“! Novootkrivena čestica dobila je naziv *pozitron*. [6]

Ono što je bilo posebno revolucionarno jest činjenica da je Diracova teorija objasnila i mehanizam *stvaranja* pozitrona! Naime, prema njegovoj teoriji, „kada elektron u negativnom energetskom stanju apsorbira foton energije veće od  $2m_e c^2$ , on prijeđe u pozitivno stanje u kojem ga je moguće uočiti. Šupljina koju pritom ostavlja opaža se kao pozitron; rezultat je kreiranje elektron-pozitron para. Sukladno tome, kada elektron u pozitivnom energetskom stanju „padne“ u šupljinu, oboje – i elektron i šupljina (pozitron) iščeznu, pri čemu se emitiraju fotoni“.[6]

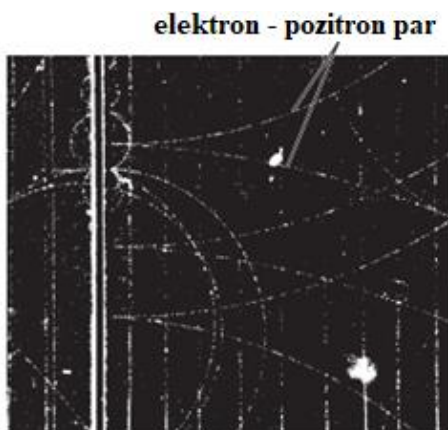
Dakle, otkrićem pozitrona, i Diracovim objašnjenjem, ustanovljena je veoma važna činjenica o prirodi elementarnih čestica koje su se do tada smatrale vječnim i nepromjenjivim – Naime, elektroni i pozitroni se mogu *stvarati* i *uništavati* u parovima jedan sa drugim, ili sa drugim česticama.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> Ali nikako ne sami po sebi, jer to bi narušilo zakon očuvanja električnog naboja!

1949. godine, Richard Feynman je matematički objasnio da se pozitron može opisati kao elektron koji putuje unatrag u vremenu čime je dodatno pojednostavnio Diracove izračune, ali da pritom nije napustio ideju stvaranja i uništavanja elektron – pozitron parova.[6]

Elektron-pozitron parovi nastaju u visokoenergetskim sudarima nabijenih čestica ili kad čestica apsorbira  $\gamma$  – zračenje. Takve procese nazivamo „tvorbama parova“, a na Slici 1 vidljivi su tragovi elektrona i pozitrona u mjehuričastoj komori.<sup>7</sup>



Slika 1 – Tragovi elektrona i pozitrona u mjehuričastoj komori

U ovom konkretnom slučaju, korišteni su fotoni energija oko 300 MeV koji su se sudarali sa atomima u olovnoj pločici, što je rezultiralo stvaranjem parova elektrona i pozitrona.[6] Magnetsko polje (usmjereno izvan fotografije) uzrokovalo je zakretanje elektrona i pozitrona u *suprotnim* smjerovima, kao što je i vidljivo na slici. Iz oblika takvih putanja bilo je moguće odrediti da je specifični naboj pozitrona jednak onom od elektrona, ali sa suprotnim predznakom.

U daljnjim eksperimentima vezanima za elektrone i pozitrone, utvrđeno je da elektron i pozitron, osim što imaju jednaku masu i iznos (ali suprotan predznak) naboja, imaju i jednak spin. Zbog takvih specifičnih svojstava, pozitron se počeo oslovljavati kao „antičestica“ elektronu ( $e^-$ ), zbog čega je i oznaka za pozitron postala  $e^+$ . Ovo se slagalo sa Diracovom pretpostavkom iz 1930. godine da bi svaka elementarna čestica trebala imati svoju antičesticu, čija bi se svojstva morala odnositi jednako kao svojstva pozitrona prema elektronu. Primjerice, pretpostavljeno je da „antiprotoni“ moraju biti postojeće antičestice čija su svojstva u odnosu na protone sljedeća:

---

<sup>7</sup> Slika je preuzeta iz [6] (str. 1483) sa dodanim hrvatskim prijevodom



<i>Svojstvo</i>	<i>Očekivana vrijednost</i>
<i>Masa</i>	Jednaka kao masa protona
<i>Električni naboj</i>	Suprotan protonu – jednak naboju elektrona
<i>Spin</i>	Jednak kao protonski
<i>Magnetski moment</i>	Jednake jakosti, ali suprotnog smjera u odnosu na proton
<i>Statistika</i>	Fermijeva; jednako kao i kod protona
<i>Intrinzični paritet</i>	Suprotan protonskom

Tablica 1- Očekivana svojstva antiprotona u odnosu na svojstva protona<sup>8</sup>

1955. godine, na protonskom sinkrotronu sveučilišta Berkeley detektirani su antiprotoni[9], a godinu dana kasnije i antineutroni, čime je ideja o postojanju antičestica (i antimaterije koju one izgrađuju) postala široko prihvaćena u znanstvenim krugovima.

O važnosti otkrića antimaterije najbolje govori znanstvenik William Heisenberg, koji je 1972. godine u svojoj knjizi „*Fizičarev koncept prirode*“, rekao:

„*Mislim da je (ovo) otkriće antimaterije bilo vjerojatno najveći od svih velikih skokova u fizici u 20.stoljeću.*“ [10]

U dvadesetom stoljeću fizika je uistinu doživjela ogroman napredak u mnogim područjima, a mnogi od tih „skokova“ utjecali su i na razumijevanje i razvoj fizike elementarnih čestica.

Primjerice, razvojem kvantne mehanike, razvila se i svijest o česticama „posrednicima“ sila. Naime, postalo je jasno da se elektromagnetsko međudjelovanje nabijenih čestica u kvantnoj mehanici može objasniti emisijom (ili apsorpcijom) fotona. Dakle, fotoni predstavljaju „posrednike“ koji u ovom slučaju „prenose“ elektromagnetsku interakciju. Pritom treba uzeti u obzir princip neodređenosti, prema kojem je moguće stvaranje fotona energije  $\Delta E$  ako on ne živi duže od vremena  $\Delta t$  koje je određeno relacijom:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad \text{Jednadžba 1}$$

pri čemu je sa  $\hbar$  označena reducirana vrijednost Planckove konstante,  $h/(2\pi)$ .

Samim time, postavilo se novo otvoreno pitanje: *Postoji li čestica posrednik za nuklearnu silu?* Japanski fizičar Hideki Yukawa je 1935. godine pretpostavio postojanje takve čestice, koju je nazvao mezon. Korištenjem Jednadžbe 1 i uz pretpostavke da bi takva čestica morala postojati dovoljno dugo da prijeđe udaljenost usporedivu sa samom veličinom atomske

<sup>8</sup> Tablica je napravljena po uzoru na Tablicu 1 u članku [8]

jezgre<sup>9</sup>, a da bi se morala gibati brzinom otprilike upola manjom od brzine svjetlosti, Yukawa je izračunao da bi masa takve čestice trebala biti oko 250 puta veća od mase elektrona.[6]

1936. godine, proučavanjem kozmičkog zračenja<sup>10</sup>, Seth Neddermeyer i Carl Anderson otkrili su dvije nove elementarne čestice, čija masa je bila otprilike 207 puta veća od mase elektrona, a spin im je bio jednak onome od elektrona. Utvrđeno je da se radi o paru čestice i njene antičestice, gdje jedna od njih ima naboj jednak naboju elektrona, dok druga ima naboj jednak naboju pozitrona. Novootkrivene čestice nazvale su se mion ( $\mu^-$ ) i antimion ( $\mu^+$ ). Međutim, ubrzo je utvrđeno da niti jedna od njih ne bi mogla biti Yukawin hipotetski mezon, jer je u eksperimentima utvrđeno njihova veoma slabo međudjelovanje s atomskom jezgrom.[6] Desetak godina kasnije, točnije 1947. godine, otkrivene su tri nove čestice čija masa je bila otprilike 270 puta veća od mase elektrona, a čiji spin iznosi 0. Ubrzo je utvrđeno da jedna od njih ima električni naboj jednak naboju elektrona, jedna je električki neutralna, a jedna ima električni naboj jednak naboju pozitrona. Ove čestice nazvane su negativan, neutralan i pozitivan pion ( $\pi^-$ ,  $\pi^0$  i  $\pi^+$ ). Za njih je utvrđeno da jako međudjeluju sa jezgrama, zbog čega su, prema Yukawinoj teoriji, one dobile naziv i  $\pi$ - mezonima.[6]

U godinama koje su uslijedile, razvojem nuklearne fizike, tehnologije linearnih akceleratora i sinkrotrona, kao i unaprjeđenjem detektora čestica, dogodio se i velik napredak u fizici elementarnih čestica. Fizičari se za izučavanje čestica više nisu morali oslanjati samo na detekciju kozmičkog zračenja, već su mogli započeti sa izvođenjem eksperimenata u kojima je moguće pri visokim energijama sudarati različite čestice i pritom pratiti nuklearne reakcije. U takvim eksperimentima detektirano je mnoštvo „novih“, do tada nepoznatih čestica, koje su uglavnom nestabilne i u vrlo kratkom vremenu se raspadaju na druge čestice.

Upravo na taj način su 1955. godine u sveučilištu Berkeleyu u Kaliforniji u eksperimentima sa sudaranjem protona otkriveni antiproton<sup>11</sup>, a 1956. i antineutron.

Do početka 1960-ih godina je broj novootkrivenih čestica postao toliko velik, pa su se one počele kategorizirati u tri različite kategorije, ovisno o njihovoj masi i načinu interakcije<sup>12</sup>:

---

<sup>9</sup> za koju je uzeto da iznosi  $1,5 \cdot 10^{-15}$  m

<sup>10</sup> Detaljnije o kozmičkom zračenju može se pročitati u poglavlju 4.4.3.

<sup>11</sup> Koji je teorijski predviđen 1930-ih godina, o čemu je bilo riječi na početku ovog potpoglavlja.

<sup>12</sup> Imena navedenih skupina jezika potječu od grčkih riječi koje bi se redom mogle prevesti kao: sitno, srednje i teško, što povezujemo s masama čestica u pojedinim skupinama kako je i označeno u Tablici 2.

<i>Ime kategorije</i>	<i>Masa čestica u kategoriji</i>	<i>Primjer čestice u kategoriji</i>
<i>Leptoni</i>	najlakše <sup>13</sup>	Elektron ( <i>e</i> )
<i>Mezoni</i>	srednje teške	Pioni ( $\pi^-$ , $\pi^0$ i $\pi^+$ ).
<i>Barioni</i>	najteže čestice	Proton ( <i>p</i> )

Tablica 2- Tri klasifikacije čestica u 1960-im godinama

Budući da je otkriveno više od stotinu novih čestica, uslijedilo je pitanje jesu li sve od njih zaista „elementarne“, u smislu da nemaju unutrašnju strukturu. Pokazalo se da su od navedenih kategorija leptoni zaista elementarne čestice, dok mezoni i barioni (koje zajedničkim nazivom zovemo *hadroni*) imaju unutrašnju strukturu.

Murray Gell-Mann i George Zweig su 1964. godine iznijeli ideju da se hadroni (kojih je već do tada nađeno mnogo, a eksperimenti su stalno otkrivali nove) mogu prikazati kao složeni, kompozitni objekti sačinjeni od manjeg broja konstituenata. Takve hipotetske elementarne čestice, koje su morale imati trećinske električne naboje (iznosa  $+\frac{2}{3}$  ili  $-\frac{1}{3}$  električnog naboja protona), Gell-Mann je nazvao kvarkovima.[11] No, isprva nije bilo jasno postoje li kvarkovi zaista ili su samo matematičko pomagalo za sistematizaciju hadrona u simetrijske sheme prema njihovim izmjerenim kvantnim brojevima. Naime, za razliku od atoma, kod kojih su se elektroni mogli odvojiti od atomske jezgre, iz hadrona se nije uspijevalo izdvojiti, osloboditi kvarkove. Ipak, jasni eksperimentalni dokazi o postojanju kvarkova došli su nekoliko godina kasnije iz niza eksperimenata s neelastičnim raspršenjima elektrona na nukleonima. Radilo se o eksperimentima provedenima između 1967. i 1973. godine na SLAC-u<sup>14</sup>, koji su pokazali da u protonima i neutronima postoje tvrdi centri raspršenja konzistentni sa trećinskim električnim nabojima.[11]

Svi kasniji eksperimenti i konzistentnost s teorijskim idejama tzv. kvantne kromodinamike kao fundamentalne teorije jakih interakcija, doveli su do slike hadrona suglasne sa svim eksperimentima, u kojoj su barioni vezana stanja tri valentna kvarka raznih vrsta, a mezoni vezana stanja kvarkova i antikvarkova. Sila vezanja im potječe od gluona, koji prenose kromodinamsko međudjelovanje. Kvantna kromodinamika je samo jedan dio takozvanog „Standardnog modela.“

<sup>13</sup> Osim  $\tau$  čestice (o čemu se može više pročitati u poglavlju 3.1.1).

<sup>14</sup> SLAC – engl. Stanford Linear Accelerator Center (Stanfordski Linearni akceleratori centar)

Naime, sukladno novim otkrićima i spoznajama, u zadnjih pedesetak godina počela se razvijati teorija poznata pod nazivom „Standardni model“ (SM), koja nastoji opisati i objasniti elementarne čestice i njihove međusobne interakcije. Ova teorija je kroz godine doživjela niz nadopuna i preinaka te se i do danas testira izvođenjem raznih eksperimenata sa sudarivačima i ubrzivačima čestica, zbog čega upravo fizika elementarnih čestica predstavlja jedno od najdinamičnijih polja moderne fizike.

Prema Standardnom modelu postoji 12 elementarnih čestica materije od kojih je 6 vrsta leptona i 6 vrsta, tzv. „okusa“ kvarkova (ali svaki u tri moguće tzv. „boje“). Za svaku od tih čestica postoji i odgovarajuća antičestica, a sve one međudjeluju razmjenom izmjenjskih čestica koje se nazivaju baždarnim bozonima odgovarajućih međudjelovanja.

Temeljni koncepti Standardnog modela bit će navedeni i opisani u sljedećem poglavlju.

### **3. Elementarne čestice i njihova svojstva**

Kao što je spomenuto u prethodnom poglavlju, predodžba o stotinama elementarnih čestica iz 1950-ih godina bila je pogrešna i prema današnjim saznanjima stvaran broj elementarnih čestica mnogo je manji. Sve elementarne čestice mogu se podijeliti u tri osnovne kategorije – kvarkove, leptone i izmjenjske čestice (bozone).

Richard P. Feynman je u svojoj knjizi *“Što te briga što drugi misle?: Daljnje avanture znatiželjnog lika”* rekao:

*„Možete naučiti ime ptice na svim jezicima svijeta, ali kada završite s tim, nećete znati apsolutno ništa o njoj...Pa pogledajmo pticu i uočimo što ona radi – to je ono što je važno.*

*Veoma sam rano naučio razliku između poznavanje imena nečega, i poznavanja nečega.“[84]*

Jednako tako, poznavanje imena dvadesetak osnovnih elementarnih čestica, koje se mogu relativno lako i brzo memorizirati, nije jednako stvarnom poznavanju Standardnog modela i same fizike elementarnih čestica. Upravo zbog toga, u ovom poglavlju, uz sam popis elementarnih čestica bit će dana i neka od njihovih najvažnijih svojstava, opis njihovih mogućih međudjelovanja, kao i zakona koji pritom vrijede. U poglavlju 3.1 bit će riječ o leptonima, poglavlje 3.2 bavit će se kvarkovima, a u poglavlju 3.3 objasnit će se baždarni bozoni i njihova uloga u međudjelovanju elementarnih čestica. Za kraj, u poglavlju 3.4 bit će dan kratki vizualni pregled svih elementarnih čestica u Standardnom modelu.

### 3.1. Leptoni

Leptoni su elementarne čestice koje (za razliku od kvarkova) *ne mogu* međudjelovati jakom interakcijom.<sup>15</sup> Svi leptoni imaju spin  $\frac{1}{2}$ , zbog čega ih svrstavamo u skupinu fermiona. Naziv ove skupine elementarnih čestica potječe od grčke riječi „λεπτός“ (leptós), što bi se moglo prevesti kao „sitan, malen, tanak“, a uveo ga je fizičar Léon Rosenfeld 1948. godine, koji je predložio da se takav naziv dodijeli tada poznatim elementarnim česticama sa najmanjim masama[12], odnosno česticama sa masama znatno manjih od mase atomske jezgre. U to vrijeme bile su poznate dvije takve čestice: elektron (čija je masa otprilike  $0,511 \text{ MeV}/c^2$ ) i mion (sa masom od  $105,7 \text{ MeV}/c^2$ )<sup>16</sup>, koje su obje bile znatno lakše od sastavnog elementa jezgre atoma – protona, čija masa iznosi  $938,3 \text{ MeV}/c^2$ . [12]

Međutim, jedan od kasnije otkrivenih leptona (tau-lepton) gotovo da je dvostruko veće mase od protona, i oko 3500 puta veće mase od elektrona[12], zbog čega se za njega i ne bi moglo reći da je „sitna“ elementarna čestica!

U potpoglavlju 3.1.1 bit će navedene i ukratko objašnjene sve različite vrste leptona, kao i njihova temeljna svojstva, a potpoglavlje 3.1.2 bavit će se tematikom leptonskih brojeva i njihovog očuvanja, koji predstavlja jedan od temeljnih zakona fizike elementarnih čestica.

#### 3.1.1. Šest različitih leptona

Kao što je ranije spomenuto, postoji šest različitih vrsta, odnosno „okusa“ leptona, a svima je zajednička nemogućnost međudjelovanja jakom interakcijom. Od postojećih šest leptona, tri su električki nabijena, a tri su električki neutralna. Parovi nabijenih i nenabijenih leptona mogu se pridružiti u takozvane „generacije“, tako da postoje elektronska, mionska i tau-generacija. Za svaki lepton, postoji i njegova antičestica (odnosno antilepton) čija su svojstva u odnosu na lepton ekvivalentna usporedbi ranijih svojstava pozitrona u odnosu na elektron, kao i antiprotona u odnosu na proton<sup>17</sup>

Popis leptona i njihovih pripadajućih antičestica, zajedno sa simbolima i masama svakog od njih navedeni su u sljedećoj tablici:

---

<sup>15</sup> O jakoj interakciji, kao i o ostale tri temeljne sile bit će riječi u potpoglavlju 3.3.

<sup>16</sup> O otkriću elektrona i miona bilo je riječi u poglavlju 2.

<sup>17</sup> Pogledati Tablicu 1 (str. 8)

<i>Ime leptona</i>	<i>Simbol</i>	<i>Antičestica</i>	<i>Masa (MeV/c<sup>2</sup>)</i>
<i>Elektron</i>	$e^-$	$e^+$	0,511
<i>Elektronski neutrino</i>	$\nu_e$	$\bar{\nu}_e$	$< 3 \cdot 10^{-6}$
<i>Mion</i>	$\mu^-$	$\mu^+$	105,7
<i>Mionski neutrino</i>	$\nu_\mu$	$\bar{\nu}_\mu$	$< 0,19$
<i>Tau</i>	$\tau^-$	$\tau^+$	1777
<i>Tau-neutrino</i>	$\nu_\tau$	$\bar{\nu}_\tau$	$< 18,2$

Tablica 3 - Šest različitih leptona<sup>18</sup>

Elektron, mion i tau-lepton su negativno električki nabijeni (što je označeno minusom u indeksu njihovih simbola), dok su elektronski, mionski i tau-neutrino električki neutralne čestice. Međutim, važno je reći da se, unatoč njihovom neutralnom naboju, neutrini fizikalno razlikuju od antineutrina; naime, spinski angularni moment neutrina ima komponentu koja je suprotna njegovom linearnom momentu, dok je za antineutrine ta komponenta paralelna sa linearnim momentom.[6]

Prva otkrivena elementarna čestica – elektron, je od svojeg otkrića 1897. godine (koji je ukratko opisan u prethodnom poglavlju), postao najproučavaniji i najpoznatiji od svih ostalih leptona. Većini ljudi je danas opće poznato da su elektroni sastavni dijelovi atoma, a samim time i cjelokupne materije, a u osnovnim i srednjim školama diljem svijeta obavezno se uči o njegovim svojstvima, otkriću i primjenama vezanim za električnu struju i energiju.

Elektronski neutrino teorijski je predviđen već 1930. godine.[12] Njegovo postojanje pretpostavio je fizičar Wolfgang Pauli, kako bi se objasnili neki od temeljnih zakona očuvanja (očuvanje energije te linearnog i kutnog impulsa) u  $\beta$ -raspadima.<sup>19</sup> Tridesetak godina kasnije, 1962.godine, znanstvenici Leon M. Lederman, Melvin Schwartz i Jack Steinberger pokazali su da postoje različiti tipovi neutrina, detekcijom interakcija koje su dovele do otkrića mionskog neutrina, zbog čega su 1988. godine (kada je već razvijena teorija o različitim okusima neutrina) dobili i Nobelovu nagradu.[12] Od četiri postojeće temeljne sile, za neutrine je relevantna samo jedna od njih – slaba sila<sup>20</sup>, zbog čega oni imaju specifična svojstva, kao što i opisuje sljedeći citat:

<sup>18</sup> Podaci o masama preuzeti iz [6], str 1492.

<sup>19</sup> Više o raspadima čestica, kao i o temeljnim zakonima očuvanja može se pročitati u poglavlju 4.3.3.

<sup>20</sup> Zbog njihove malene mase mogu se isključiti i utjecaji gravitacijske sile

*„Slabost slabe sile najbolje se iskazuje kroz bizarno malu vjerojatnost da neutrino međudjeluje s materijom. Ta vjerojatnost nije nula, ali je toliko mala da je za neutrino svemir praktički prazan. Kad neutrino jednom nastane on se giba, (zbog svoje malene mase gotovo brzinom svjetlosti), kroz prazan prostor ili kroz gustu materiju, svejedno, kao da njegovom putu ničega nema. Može proći kroz cijelu Zemlju bez da doživi ijednu interakciju. Fizičari stoga za neutrine ponekad kažu da su čestice-duhovi. Kroz naše tijelo svake sekunde prođe oko bilijun (milijun milijuna) neutrina.“[14]*

Samim time, neutrine i njihova svojstva teško je eksperimentalno proučavati. Kao što prikazuje Tablica 3, za mase neutrina određene su samo moguće gornje granice. Prema Standardnom modelu, pretpostavljalo se da je masa mirovanja neutrina jednaka nuli, međutim, prema trenutnim dokazima vjeruje se da oni ipak imaju veoma male, ali konačne mase. Upravo su za otkriće „*neutrinskih oscilacija*“ (odnosno periodičnih promjena neutrina iz jedne vrste u druge) koje pokazuju da neutriini imaju masu mirovanja, Takaaki Kajita i Arthur B. McDonald 2015. godine dobili Nobelovu nagradu za fiziku.[14]

Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju, mion i antimion otkriveni su 1936. godine, proučavanjem kozmičkog zračenja koje je međudjelovalo s molekulama i atomima u gornjim slojevima atmosfere. U takvim interakcijama, odnosno „kozmičkim pljuskovima“ otkriveno je da nastaju velike količine ovih (nestabilnih) čestica.<sup>21</sup> Kao što je u tom poglavlju spomenuto, za električni naboj miona ustanovljeno je da je jednak naboju elektrona, a masa miona je oko 207 puta veća od mase elektrona. Upravo zbog njihove relativno velike mase u odnosu na elektrone, za mione se prvo pretpostavljalo da su sličniji tada poznatim hadronima nego elektronu; naime sumnjalo se da su upravo mioni Yukawini hipotetski mezoni, što je ipak opovrgnuto eksperimentima u kojima je uočeno da oni slabo međudjeluju sa atomskom jezgrom, odnosno da (jednako kao i elektroni) ne mogu međudjelovati jakom interakcijom, zbog čega su u budućnosti oni bili svrstani u skupinu leptona.

Najmasivniji od svih leptona, tau-lepton, otkriven je u pokusima izvedenima između 1974. i 1977. godine koje su izvodili Martin Lewis Perl i njegovi suradnici. Radilo se o pokusima sa SPEAR elektron-pozitron sudarivaču i SLAC-LBL detektorom na sveučilištima u Stanfordu i Berkeley-u.[15] [12] Za razliku od ostalih nabijenih leptona - elektrona i miona, tau-leptoni do danas se nisu detektirali u prirodi, već su opaženi samo u laboratorijima.[1]

---

<sup>21</sup> Detaljnije o samom nastanku i razvitku kozmičkih pljuskova, kao i česticama koje se pritom stvaraju, može se pročitati u poglavlju 4.4.3.

Nakon otkrića tau čestice, očekivalo se da, jednako kao i kod neutrina elektronske i mionske generacije, mora postojati i električki neutralna čestica koja bi uz tau lepton upotpunila tau generaciju. Prve teorijske pretpostavke o postojanju takve čestice otkriveni su proučavanjem raspada tau čestica, pri čemu je uočeno da, jednako kao i kod proučavanja ranije spomenutih  $\beta$ -raspada, jednaki zakoni očuvanja ne vrijede ako se ne pretpostavi postojanje nove elementarne čestice „tau-neutrino“. Čestica sa takvim svojstvima, odnosno tau-neutrino, uistinu je i detektiran svojim interakcijama u eksperimentima DONUT<sup>22</sup>- tima u Fermilabu<sup>23</sup> 2000. godine[12], čime je upotpunjena pretpostavka o postojanju šest različitih okusa leptona, koji se mogu grupirati u tri generacije.

Pitanje koje se pri ovakvom izlaganju elementarnih čestica može nametnuti je: *Kako možemo biti sigurni da postoje samo tri generacije leptona, odnosno da ne postoji još elementarnih čestica koje uz današnju tehnologiju nismo uspjeli detektirati?* Odgovor na ovo pitanje dali su znanstvenici koji su sudjelovali u eksperimentima u LEP-u<sup>24</sup>, u kojima je izmjereno da broj lakih neutrina (koji mora biti jednak broju različitih generacija leptona) iznosi  $2,994 \pm 0,012$ , što potvrđuje pretpostavku o postojanju tri različite generacije leptona.[13]

Međutim, unatoč takvoj snažnoj potpori o postojanju tri generacije leptona, u današnje vrijeme postoje i pojedini eksperimenti kojima se pokušavaju pronaći eventualni leptone „četvrtre generacije“. Za takve leptone predviđeno je da bi (ako uopće postoje), nabijeni lepton trebao imati masu od najmanje  $100,8 \text{ GeV}/c^2$ , a njegov neutrino najmanje  $45,0 \text{ GeV}/c^2$ . [12]

### 3.1.2. Leptonski brojevi i njihovo očuvanje

Što se tiče stabilnosti leptona, svi neutriini su stabilni, kao i elektron, dok su dva najmasivnija leptona - mion i tau nestabilni. Prosječno vrijeme života iznosi  $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$  za mion i  $2,9 \cdot 10^{-13} \text{ s}$  za tau lepton.[6] Navedeni leptoni se dakle, nakon određenog vremena raspadaju na druge čestice. Opažanjem navedenih raspada, uočeno je da postoje određena pravila, odnosno postojanje dozvoljenih i nedozvoljenih vrsta raspada ovih leptona. Naime, primijećeno je da se neki od pretpostavljenih raspada nikada ne događaju, iako bi se prema svim zakonima očuvanja koji su bili poznati u tadašnje vrijeme oni trebali moći događati!

---

<sup>22</sup> DONUT je kratica za „Direct observation of the nu tau E872“, eksperimente koji su osmišljeni za direktno opažanje pretpostavljenih interakcija tau neutrina.

<sup>23</sup> Engl. „Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab)“ je takozvani „Fermijev nacionalni akceleratori laboratorij“ u blizini Illinoisa u SAD-u, koji je specijaliziran za čestičnu fiziku visokih energija.

<sup>24</sup> Engl. „Large Electron- Positron collider“, odnosno „Veliki elektronsko-pozitronski sudarivač“ jedan je od najvećih čestičnih sudarivača, a nalazi se u CERN-u.



Na temelju takvih opažanja, razvijena je ideja leptonskih brojeva, kao i njihovog očuvanja. Prema toj ideji, postoje tri različita leptonska broja – elektronski ( $L_e$ ), mionski ( $L_\mu$ ) i tau ( $L_\tau$ ) broj. Leptonski brojevi predstavljaju određeno unutarnje svojstvo samih leptona, koje se ne može mjeriti na standardan način (kao što se primjerice masa može mjeriti vagom), ali prema kojima se leptoni mogu razlikovati, pa i svrstavati u generacije prema zajedničkim leptonskim brojevima. Leptoni prve generacije tako imaju elektronski broj jednak +1, a mionski i tau broj jednak nuli, leptoni druge generacije imaju mionski broj jednak +1, a elektronski i tau broj jednak nuli, a leptoni treće generacije imaju tau broj jednak +1, dok su im ostali leptonski brojevi jednaki nuli. Popis leptona kao i njihovih odgovarajućih leptonskih brojeva prikazan je u sljedećoj tablici:

Ime leptona	Elektronski broj $L_e$	Mionski broj $L_\mu$	Tau-broj $L_\tau$
<i>Elektron</i>	+1	0	0
<i>Elektronski neutrino</i>	+1	0	0
<i>Mion</i>	0	+1	0
<i>Mionski neutrino</i>	0	+1	0
<i>Tau</i>	0	0	+1
<i>Tau-neutrino</i>	0	0	+1

Tablica 4- Leptoni i njihovi pripadajući leptonski brojevi

Antičestice leptona posjeduju jednake vrste leptonskih brojeve kao i njihove odgovarajući leptoni, ali sa suprotnim predznakom, kao što prikazuje Tablica 5.

Ime antileptona	Elektronski broj $L_e$	Mionski broj $L_\mu$	Tau-broj $L_\tau$
<i>Pozitron</i>	-1	0	0
<i>Elektronski antineutrino</i>	-1	0	0
<i>Anti-mion</i>	0	-1	0
<i>Mionski antineutrino</i>	0	-1	0
<i>Anti-tau</i>	0	0	-1
<i>Tau-antineutrino</i>	0	0	-1

Tablica 5 - Antileptoni i njihovi leptonski brojevi

Bilo koje druge elementarne čestice koje nisu leptoni, poput kvarkova, bozona i složenijih izgrađenih od kvarkova, imaju elektronski, mionski i tau-broj jednak nuli.

Uvođenjem koncepta leptonskih brojeva, postojanje dozvoljenih i nedozvoljenih raspada objašnjeno je postuliranjem novog zakonom očuvanja - zakonom očuvanja pojedinog leptonskog broja. Naime, u svakom raspadu masivnih leptona ili antileptona, ukupni elektronski, mionski, kao i tau-broj moraju, svaki za sebe, biti očuvani prije i nakon raspada. Samim time, mogući su samo oni spontani raspad (anti)leptona u kojima vrijedi ovaj zakon!

Primjerice, dozvoljen je sljedeći raspad miona:



Jednadžba	$\mu^-$	$\rightarrow$	$\nu_\mu$		$e^-$		$\bar{\nu}_e$
Elektronski broj	0	=	0	+	1	+	-1
Mionski broj	1	=	1	+	0	+	0
Tau broj	0	=	0	+	0	+	0

Tablica 6 - Primjer očuvanja leptonskih brojeva kod navedenog raspada miona

U Tablici 6 je vidljivo je da su ukupan elektronski, mionski i tau broj ostali očuvani tijekom ovakvog raspada – Elektronski i mionski broj ostali su jednaki nuli, a mionski broj je prije i nakon raspada iznosio +1.

Prema Standardnom modelu, vjerovalo se da je svaki od tri leptonska broja zasebno uvijek očuvan u svim interakcijama. Međutim, otkrićem neutrinskih oscilacija, utvrđeno je da u tom slučaju zakon očuvanja pojedinačnih leptonskih brojeva ne vrijedi. Pa ipak, *ukupan* broj leptona i dalje je očuvan prema Standardnom modelu. Trenutno se vrše mnogi eksperimenti koji pokušavaju detektirati raspade u kojima bi se opazilo narušenje očuvanja leptonskih brojeva, a mnogi teorijski fizičari bave se idejama o teorijama iznad Standardnog modela, u kojima ovaj zakon očuvanja ne bi nužno morao vrijediti.[16]

### 3.2. Kvarkovi

Za razliku od leptona, kvarkovi su one elementarne čestice koje *mogu* međudjelovati jakom silom!<sup>25</sup> Broj različitih kvarkova jednak je broju različitih leptona, tako da postoji šest različitih okusa kvarkova, koji se također mogu podijeliti u tri generacije, a svi će oni biti navedeni i opisani u potpoglavlju 3.2.1. Kvarkovi posjeduju svojstvo koje se naziva “naboj boje” zbog čega se (za razliku od leptona) oni u prirodi uvijek udružuju u skupine, o čemu će biti riječi u potpoglavlju 3.2.2., a potpoglavlje 3.2.3 bavit će se zakonom očuvanja koji je uočen kod čestica koje su građene od kvarkova, a koji se objasnio uvođenjem takozvanog “barionskog broja”.

#### 3.2.1. Šest različitih kvarkova

Kao što je spomenuto u poglavlju 2, 1960-ih godina je ustanovljeno da stotine novootkrivenih čestica (koje su svrstane u dvije velike skupine – mezone i barione), zapravo nisu elementarne, već se sastoje od nekih manjih čestica- „kvarkova“, odnosno elementarnih čestica spina  $\frac{1}{2}$  koji međudjeluju jakom silom.

Naziv kvark uveo je Murray Gell-Man , prema citatu iz romana „*Finneganovo bdijenje*“ Jamesa Joycea. O tom događaju sam Gell-Mann je u svojoj knjizi „*Kvark i jaguar: Avanture u Jednostavnom i Kompleksnom*“ rekao:

„1963. godine, kada sam dodijelio naziv „kvark“ temeljnim dijelovima nukleona, prvo sam na umu imao zvuk, bez riječi, koji je zvučao kao „kwork“. Tada sam, u jednom od mojih povremenih pregledavanja *Finneganoog bdijenja* Jamesa Joycea naišao na riječ „kvark“<sup>26</sup> u frazi „Tri kvarka za Mustera Marka“...U svakom slučaju, broj tri savršeno se uklopio u način na koji se kvarkovi javljaju u prirodi.“[17]

Kako je opisano u poglavlju 2.2, u godinama koje su uslijedile, eksperimenti konzistentni sa teorijskim idejama kvantne kromodinamike doveli su do utvrđivanja pretpostavke da kvarkovi i njihove antičestice tvore hadrone u točno određenim skupinama.

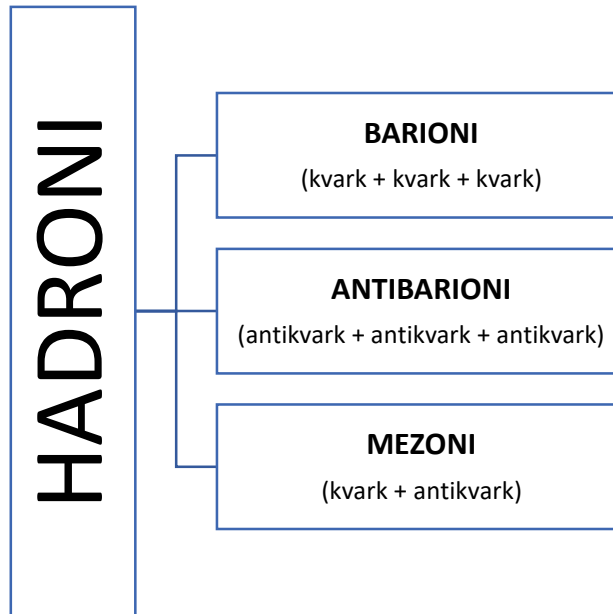
Naime , svaki barion predstavlja vezano stanje tri valentna kvarka, svaki antibarion je vezano stanje tri antikvarka, a mezoni su uvijek vezana stanja kvarkova i antikvarkova.

Navedenu tvrdnju možemo slikovito prikazati sljedećom shemom:

---

<sup>25</sup> Više o jakom međudjelovanju, kao i o ostalim temeljnim međudjelovanjima bit će rečeno u poglavlju 3.3.

<sup>26</sup> Engl. „quark“

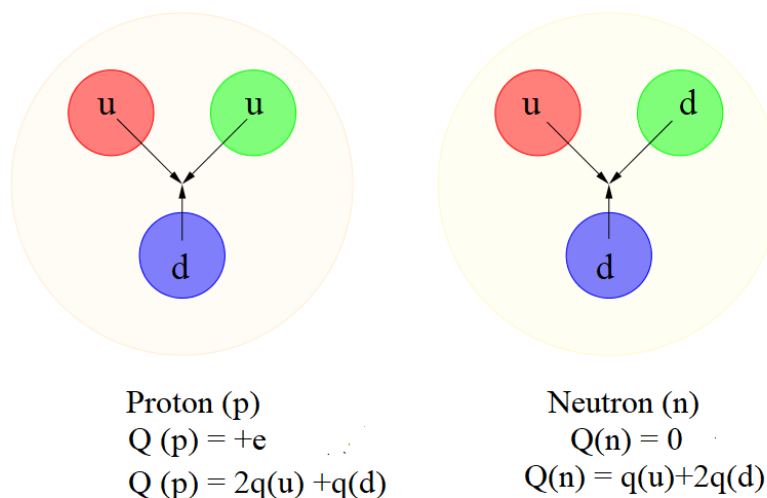


Slika 2 - Hadroni i njihova unutrašnja kvarkovska struktura

Počeci teorije o kvarkovima iz 1964. godine predviđali su postojanje tri različita kvarka, koji su nazvani *gornji* (up), *donji* (down) i *strani* (strange) kvark. Za ove kvarkove utvrđeno je da izgrađuju protone, neutrone,  $\pi$  i K- mezone, kao i mnoštvo drugih tada poznatih hadrona. Primjerice, proton se sastoji od dva gornja i jednog donjeg kvarka, a neutron od dva donja kvarka i od jednog gornjeg kvarka.[6]

Zanimljivost koja iz toga slijedi jest činjenica da kvarkovi moraju biti čestice sa iznosom električnog naboja koji *nije* cjelobrojni višekratnik elementarnog naboja! Na primjer, ako uzmemo u obzir kvarkove koji sastoje se protone i neutrone, možemo zaključiti da električni naboj gornjeg kvarka mora biti  $+\frac{2}{3}e$ , a naboj donjeg kvarka  $-\frac{1}{3}e$ , pri čemu je sa  $e$  označen iznos elementarnog naboja (koji je ekvivalentan iznosu električnog naboja jednog elektrona).

Princip određivanja navedenih iznosa električnih naboja objašnjen je na sljedećoj slici:



Slika 3 – Princip određivanja električnog naboja gornjeg (*u*) i donjeg (*d*) kvarka iz poznatih naboja potona i neutrona

Kao što je vidljivo na Slici 3, obojenim kružnicama i pripadnim oznakama obilježeni su kvarkovi koji sastavljaju proton (lijevo) i neutron (desno).<sup>27</sup> Budući da je poznat ukupni električni naboj protona ( $Q(p)$ ) i neutrona ( $Q(n)$ ), lako se može odrediti naboj gornjeg i donjeg kvarka (označenog kao  $q(u)$  i  $q(d)$ ) postavljanjem jednadžbi kao na slici, a zatim i rješavanjem sustava navedene dvije jednadžbe u kojima su nepoznanice naboji kvarkova.

1974. godine, istraživanjem  $\psi$  mezona u Brookhavenu potvrđeno je i postojanje četvrtog, „čarobnog“ (*c* – engl. charm) kvarka, a 1977. godine tamo je otkriven novi mezon –  $\Upsilon$ , kao i jedan njegov gradivni element- peti kvark, koji je nazvan *dubinski* (*b* – engl. bottom) kvark. Uz tada poznatih šest leptona, mnogim znanstvenicima je bilo „zgodno“ razmotriti i mogućnost postojanja šestog kvarka, koji je nazvan *gornjim* (*t* – engl. top) kvarkom. 1995. godine je eksperimentima u Fermilab-ovom Tevatronu uistinu i otkriven takav kvark, čija su se svojstva slagala s predviđanjima.[6]

Dakle, postoji šest različitih vrsta (okusa) kvarkova, koji su svi, uz njihova glavna svojstva, navedeni u sljedećoj tablici:

<sup>27</sup> Kao što je vidljivo na Slici 3, kvarkovi unutar pojedinog hadrona označeni su različitim bojama. Ovo nije slučajnost – o svojstvu „obojanosti“ kvarkova biti će riječ u potpoglavlju 3.2.2.

Ime kvarka	Simbol	Naboj $Q$ (e)	Masa	Stranost $S$	Šarmantnost $C$	Dubina $B$	Vršnost $T$
Gornji (engl. up)	u	$+\frac{2}{3}$	$\cong 2,2 \text{ MeV}/c^2$	0	0	0	0
Donji (engl. down)	d	$-\frac{1}{3}$	$\cong 4,7 \text{ MeV}/c^2$	0	0	0	0
Strani (engl. strange)	s	$-\frac{1}{3}$	$\cong 96 \text{ MeV}/c^2$	-1	0	0	0
Čarobni (engl. charm)	c	$+\frac{2}{3}$	$\cong 1,28 \text{ GeV}/c^2$	0	+1	0	0
Dubinski (engl. bottom)	b	$-\frac{1}{3}$	$\cong 4,18 \text{ GeV}/c^2$	0	0	+1	0
Vršni (engl. top)	t	$+\frac{2}{3}$	$\cong 173,1 \text{ GeV}/c^2$	0	0	0	+1

Tablica 7 – Šest okusa kvarkova

*Napomena:* Slovim  $S$ ,  $C$ ,  $B$  i  $T$  označeni su novi kvantni brojevi koji opisuju različita svojstva navedenih kvarkova kao i hadrona koje oni izgrađuju. Podaci o masama kvarkova preuzeti su iz [18], a ostali podaci preuzeti su iz [6].

Primjerice, za određene hadrone koji su se sastojali od stranih ( $s$ ) kvarkova (poput kaona, lambda i sigma mezona) uočeno je da posjeduju neobično svojstvo – lako ih se moglo proizvesti u sudarima čestica, ali raspadali su se mnogo sporije nego što se očekivalo.

Zbog činjenice da se takvi mezoni u sudarima uvijek proizvode u parovima, postuliran je novi kvantni broj, koji je nazvan „Strani kvantni broj“ (Stranost -  $S$ ), koji je očuvan prilikom stvaranja, ali ne i prilikom raspada hadrona koji sadrže  $s$  kvarkove. Prema toj ideji, stranost pojedinog hadrona jednaka je ukupnom zbroju stranosti kvarkova od kojih se hadron sastoji. Stranost je očuvana u jakoj i elektromagnetskoj interakciji, ali ne i u slaboj! [19]

Jednako kao i kod leptona, i za svaki kvark postoji i odgovarajuća antičestica – antikvark. Oni se označavaju crticom iznad odgovarajućeg simbola, tako da postoje sljedeći antikvarkovi:  $\bar{u}$ ,  $\bar{d}$ ,  $\bar{s}$ ,  $\bar{c}$ ,  $\bar{b}$  i  $\bar{t}$ . Za antikvarkove, vrijednosti  $Q, S, C, B$  i  $T$  navedene u tablici su suprotne u odnosu na njihove odgovarajuće kvarkove, dok su im mase jednake.<sup>28</sup>

<sup>28</sup> O antičesticama se više može pročitati u poglavljima 2.2 i 4.1.4.

### 3.2.2. Boje kvarkova i formiranje hadrona

Obzirom na to da kvarkovi, jednako kao i leptoni pripadaju skupini fermiona, za njih vrijedi Paulijev princip isključenja temeljem kojeg bi postojanje bariona koji se sastoje od dva ili tri jednaka kvarka bilo nemoguće. Samim time, neutroni i protoni koji izgrađuju atomske jezgre ne bi mogli postojati!

Da bi se razriješila ta zavrzlama, pretpostavljeno je da se kvarkovi jednakog okusa mogu pojaviti u tri različite varijacije, koje su nazvane „bojama“ kvarkova. Prema tome, postoje tri različite „boje“ kvarkova – crvena, zelena i plava boja, te se, primjerice, plavi gornji kvark po svojim svojstvima *razlikuje* od crvenog gornjeg kvarka. Na ovaj način, Paulijev princip isključenja nije narušen ako pretpostavimo da se unutar jednog hadrona mogu nalaziti kvarkovi jednakih okusa, ali *različitih* boja. Suprotno kvarkovima, njihovim antikvarkovima se dodjeljuje svojstvo anti-boje. Primjerice, antikvark crvenog donjeg kvarka je anti-crveni donji antikvark, za kojeg se može reći da je zeleno-plave, odnosno „ne-crvene“ boje.

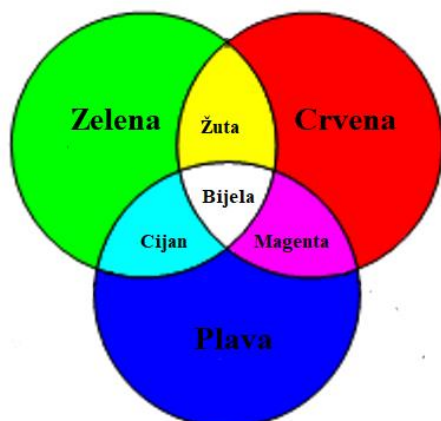
Svakako, važno je napomenuti da boje kvarkova nemaju nikakve veze sa „optičkim“ bojama, koje fizikalno odgovaraju valnim duljinama elektromagnetskog zračenja, već izraz „boja“ u ovom slučaju opisuje samo određeno svojstvo (koje se ne može numerički opisati) koje se za svaki okus kvarka pojavljuje u tri različite varijante. Upravo zbog toga, ponekad se ovo svojstvo naziva i „naboj boje“<sup>29</sup>.

Izraz „boja“ ipak je zgodno uveden, zbog toga što se u prirodi kvarkovi uvijek formiraju u hadrone (barione, antibarione ili mezone) na točno određeni način. Naime, barioni moraju sadržavati tri kvarka koji su svi *različitih* boja, a njihove anti-čestice, antibarioni, moraju biti sastavljeni od antikvarkova *različitih* anti-boja. Mezoni, koji su sastavljeni od kvarka i antikvarka, moraju biti sastavljeni od kvarka jedne boje i antikvarka koji odgovara anti-boji navedenog kvarka. Na primjer, validan mezon jest onaj sastavljen od bilo kojeg crvenog kvarka, i bilo kojeg anticrvenog antikvarka. Samim time, formiranje obojenih kvarkova u veće čestice može se usporediti sa „miješanjem“ navedenih boja (crvene, zelene i plave) tako da je nastali produkt (hadron) neutralan u boji (odnosno bez svojstva koje zovemo „naboj boje“). Naime, pomoću tri različite boje svjetlosti – crvene, zelene i plave, može se miješanjem proizvesti mnoštvo nijansi različitih boja kao što je navedeno na Slici 4 u nastavku, a upravo ovakvom metodom nastaju slike u bojama u većini današnjih monitora i

---

<sup>29</sup> Engl. „Color Charge“

ekrana, poput mobitela i ekrana računala. Kada se jednak intenzitet crvene, plave i zelene boja pomiješaju u jednakom omjeru, nastane „bijela“ boja.

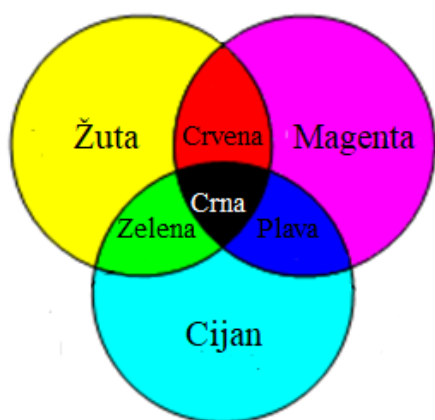


Aditivno miješanje crvene, zelene i plave boje, koje daje bijelu boju može se usporediti sa svojstvom neutralnosti u boji bariona:

Svaki barion uvijek mora sadržavati po jedan crveni, zeleni i plavi kvark, tako da se može reći da barion kao cjelina ima "bijelu" boju (odnosno nema svojstvo „obojanosti“).

Slika 4 – Prikaz aditivnog miješanja

Kao što se može uočiti na Slici 4, boja „cijan“ nastala je miješanjem zelene i plave boje, a u njoj *nema* crvene boje, zbog čega se ta boja može nazvati i „anticrvenom“. Jednako tako, žuta boja može se smatrati „antiplavom“, a magenta „antizelenom“. Miješanjem navedenih „antiboja“ dobije se crna boja, kao što je vidljivo u nastavku:



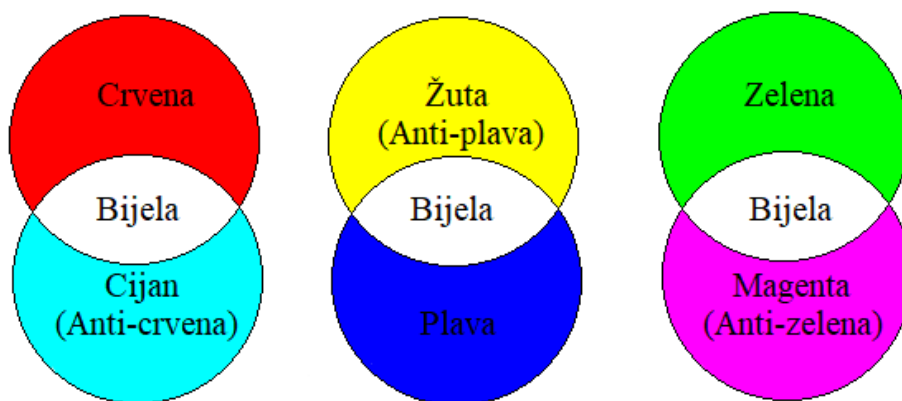
Slika 5 – Prikaz miješanja osnovnih antiboja

Miješanjem „antiplave“, „antizelene“ i „anticrvene“ boje u jednakim omjerima nastaje crna boja – koja se može nazvati i „antibijelom“.

Jednako tako, anti-barioni uvijek sadrže po jedan anti-crveni, anti-zeleni i anti-plavi kvark, zbog čega su i oni u konačnici crne ili „anti-bijele“ boje – odnosno bez svojstva „boje“.

Kombinacijom boje i njene vlastite „anti-boje“ u jednakim intenzitetima i omjerima, uvijek se dobiva bijela boja, kao što je prikazano na Slici 6.:

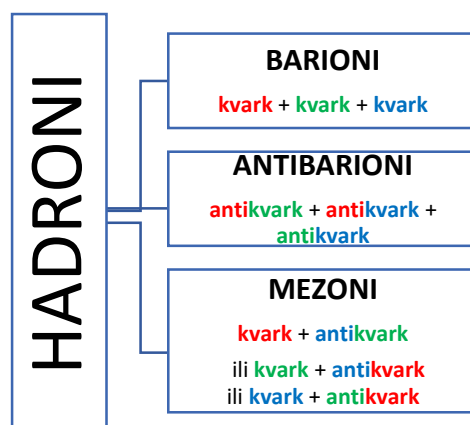




Slika 6 - Prikaz miješanja mogućih parova boja i njihovih anti-boja

Samim time, ova slika predstavlja i moguće kombinacije u bojama parova kvarka i antikvarka kod formiranja mezona. Naime, mezoni su sastavljeni od bilo kojeg kvarka i antikvarka koji su odgovarajuće jednake boje i antiboje, tako da se može reći da i oni kao cjelina „nemaju“ svojstvo boje.

Činjenica da hadroni uvijek dolaze u stanju „bez boje“ može se sumirati na sljedeći način:



Slika 7- Nadopuna Slika 2 sa uvjetom neutralnosti u boji hadrona

Nazivi „kvark“ i „antikvark“ pritom označavaju kvarkove i antikvarkove bilo kojih okusa sa svojstvom naboja boje jednakom boji napisanog teksta. Primjerice, izraz „**kvark** + **antikvark**“ označava da se kod primjera validnog mezona mora raditi o bilo kojem crvenom kvarku i bilo kojem plavo-zelenom (odnosno anticrvenom) antikvarku. Teorija jakih interakcija kojom kvarkovi (i druge „obojane“ čestice – gluoni) međudjeluju se, zbog ovakve analogije s bojama, naziva i kvantna kromodinamika<sup>30</sup>. Upravo zbog činjenice da se

<sup>30</sup> Engl. Quantum Chromodynamics - QCD

kvarkovi u hadronima (barionima i mezonima) uvijek pojavljuju u vezanim stanjima, odnosno u skupinama „bez boje“, QCD predviđa da je *nemoguće* izolirati pojedinačne kvarkove u samostalna, slobodna stanja u kojima se primjerice, leptoni mogu nalaziti.

### 3.2.3. Barionski broj i njegovo očuvanje

U tablicama u nastavku nalaze se neki od najpoznatijih bariona i mezona, kao i njihova glavna svojstva i kvarkovski sadržaj svakog od njih:

<b>BARION</b>	<b>Masa (<math>MeV/c^2</math>)</b>	<b>Naboj (<math>e</math>)</b>	<b>Barionski broj <math>B</math></b>	<b>Kvarkovski sadržaj</b>
$p$	938,3	+1	+1	$uud$
$n$	939,6	0	+1	$udd$
$\Lambda^0$	1116	0	+1	$uds$
$\Sigma^+$	1189	+1	+1	$uus$
$\Sigma^0$	1193	0	+1	$uds$
$\Sigma^-$	1197	-1	+1	$dds$
$\Xi^0$	1315	0	+1	$uss$
$\Xi^-$	1321	-1	+1	$dss$
$\Delta^{++}$	1232	+2	+1	$uuu$
$\Omega^-$	1672	-1	+1	$sss$
$\Lambda_c^+$	2285	+1	+1	$udc$

Tablica 8- Neki od najpoznatijih bariona i njihova svojstva

<b>MEZON</b>	<b>Masa (<math>MeV/c^2</math>)</b>	<b>Naboj (<math>e</math>)</b>	<b>Barionski broj <math>B</math></b>	<b>Kvarkovski sadržaj</b>
$\pi^0$	135,0	0	0	$u\bar{u}, d\bar{d}$
$\pi^+$	139,6	+1	0	$u\bar{d}$
$\pi^-$	139,6	-1	0	$\bar{u}d$
$K^+$	493,7	+1	0	$u\bar{s}$
$K^-$	493,7	-1	0	$\bar{u}s$
$\eta$	547,3	0	0	$u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$

Tablica 9- Neki od najpoznatijih mezona i njihova svojstva

*Napomena:* Tablice su izrađene pomoću podataka preuzetih iz [6].

Kao što je vidljivo u četvrtom stupcu Tablice 8, barionima se dodjeljuje takozvani barionski broj ( $B$ ), koji je za svaki barion jednak +1. Sukladno tome, za antibarione, barionski broj iznosi -1. U Tablici 9 može se uočiti da barionski broj za mezone iznosi 0.

Barionski broj je veličina koja je uvedena još prije 1964. godine i otkrića kvarkova, dok su se barioni i mezoni smatrali elementarnim česticama. Otkrićem kvarkova, dogovoreno je da je ukupni barionski broj hadrona jednak zbroju barionskih brojeva čestica koje ga čine. Ako uzmemo u obzir navedenu činjenicu, kao i to da je svaki barion građen od tri kvarka, a svaki

mezon od para kvarka i antikvarka, lako se može doći do činjenice da je barionski broj svakog kvarka jednak  $+1/3$ , a svakog antikvarka  $-1/3$ . Svi leptoni, kao i baždarni bozoni imaju barionski broj jednak nuli.

Kod barionskog broja vrijedi pravilo da je ukupni barionski broj očuvan u svim interakcijama. Taj zakon prirode naziva se zakon očuvanja barionskog broja. Primjerice, pri sudaru protona i neutrona (ako je energija dovoljno velika), moguća je sljedeća reakcija:  $n + p \rightarrow n + p + p + \bar{p}$ . Naime, ukupni barionski broj jednak je (i iznosi 2) prije i nakon reakcije, budući da je barionski broj neutrona i protona jednak 1, a antiprotona -1. Međutim, reakcija:  $n + p \rightarrow n + p + \bar{n}$  nije moguća, jer u tom slučaju ukupni barionski broj nije očuvan ( $1 + 1 \neq 1 + 1 - 1$ ). Upravo očuvanje barionskog broja pridonosi objašnjenju stabilnosti protona, budući da ono zabranjuje, primjerice, raspad protona u  $\pi^0$  i  $\pi^+$  mezone.<sup>31</sup> S obzirom na to da je eksperimentalno dobivena donja granica vremena života protona otprilike  $1,6 \cdot 10^{25}$  godina, što je znatno više od starosti svemira ( $1,4 \cdot 10^{10}$  godina), može se zaključiti da su svi protoni koji danas grade atome nastali u ranom svemiru.[20]

### 3.3. Međudjelovanje elementarnih čestica – Četiri temeljne sile i čestice izmjene

Prema današnjem razumijevanju fizike, svako međudjelovanje elementarnih čestica (a samim time i svako međudjelovanje različitih tijela) se može opisati pomoću četiri temeljne sile (međudjelovanja) – gravitacijske, elektromagnetske, jake i slabe sile.

Prema Standardnom modelu, svako od ovih međudjelovanja ostvaruje se izmjenom odgovarajućih čestica, koje zovemo *čestice izmjene* ili *čestice prijenosnici sile*. U nastavku će biti dan pregled i kratko objašnjenje svake od ovih sila i njihovih čestica izmjene na razini elementarnih čestica. Pritom će sile biti opisivane prema njihovoj relativnoj jakosti od najslabije prema najjačoj, a za slabo, elektromagnetsko i jako međudjelovanje bit će dan i konkretan primjer međudjelovanja elementarnih čestica pomoću Feynmanovih dijagrama.

---

<sup>31</sup> Pogledati Jednadžbu 6 (str. 64)

### 3.3.1. Gravitacijska sila

Upravo zbog činjenice da je gravitacijsko međudjelovanje najslabije (čak  $10^{-40}$  puta manje relativne jakosti od najjače – jake sile!)[7], njegov se utjecaj ističe tek među tijelima koja se sastoje od jako velikog broja čestica, kao što su primjerice planeti, zvijezde i ostala nebeska tijela, a pri razmatranju elementarnih čestica ono je toliko maleno da se može i zanemariti.

Pa ipak, gravitacijsko međudjelovanje postoji između svih masenih elementarnih čestica, a njegov doseg je beskonačan, iako jakost ove sile pada sa kvadratom udaljenosti čestica.

Gravitacijsko međudjelovanje je uvijek privlačno, a predviđena čestica izmjene naziva se *graviton*. Predviđena masa mirovanja gravitona jednaka je nuli, a spin je jednak 2, te bi se trebalo raditi o stabilnim česticama. Međutim, upravo zbog slabe jakosti gravitacijske sile između elementarnih čestica, graviton se još uvijek nije eksperimentalno opazio u laboratorijima.[21]

### 3.3.2. Slaba sila

Iako slaba sila ima takav naziv, ona zapravo nije najslabija od svih temeljnih sila - njena relativna jakost je  $10^{-5}$  puta manja od jake sile, ali čak  $10^{35}$  puta veća od najslabije, gravitacijske sile.[7]

Slabom silom mogu međudjelovati i kvarkovi i leptoni, a čestice izmjene za slabu silu su takozvani *slabi* ili *intermedijarni bozoni*.

Postoji tri vrste ovih bozona:  $Z^0$ ,  $W^+$  i  $W^-$  bozoni. Kao što je označeno u indeksima njihovih simbola,  $Z^0$  bozoni su električki neutralni,  $W^+$  bozoni su nabijeni pozitivnim elementarnim nabojem, a  $W^-$  bozoni negativnim. Svi oni su nestabilne čestice, a njihovo postojanje je predviđeno 1957. godine[7], a potvrđeno 1983. godine eksperimentima u CERN-u u kojima su se sudarali protoni i antiprotoni, za što su znanstvenici Carlo Rubbia i Simon Van Der Meer 1984. godine osvojili Nobelovu nagradu.[6][7]

Svi ovi bozoni imaju spin 1 te *nisu* bezmaseni – mase mirovanja  $W^\pm$  bozona su  $80.4 \text{ GeV}/c^2$ , a masa mirovanja za  $Z^0$  bozon iznosi  $91,2 \text{ GeV}/c^2$ . [6] Upravo zbog činjenice da navedeni bozoni posjeduju tolike mase, slaba sila je vrlo kratkog dosega, otprilike 0,001 fm, što je otprilike sto puta manje od tipičnog promjera atomske jezgre.[6] Upravo zbog toga što je njen domet ograničen na područje unutar atomske jezgre, slaba sila se često naziva i slabom *nuklearnom* silom. Na razini elementarnih čestica, možemo reći da slaba nuklearna sila djeluje tako što „mijenja“ elementarne čestice iz jedne vrste u drugu.

Pritom za leptone vrijedi pravilo da slaba sila može djelovati samo na leptone unutar iste generacije, ali ne i između generacija.[1]

Primjerice, djelovanjem slabe sile, to jest emisijom  $W^-$  izmjenškog bozona, mion prelazi u mionski neutrino (koji ima isti leptonski - mionski broj 1) i elektron i elektronski antineutrino (koji nastaju raspadom  $W^-$ , pa ne mijenjaju neto-leptonski broj.  $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$

$$\text{Jednadžba 2) } \mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$$

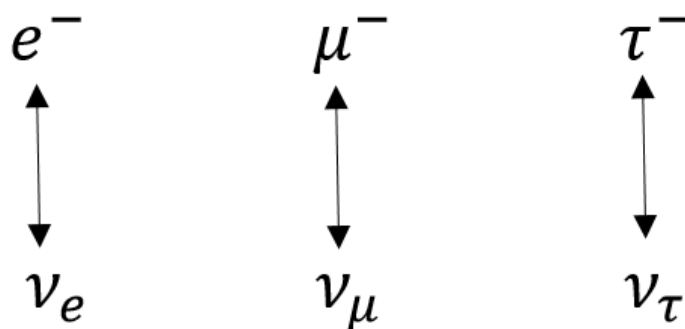
$$\text{Jednadžba 2} \mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$\text{Jednadžba 2} \mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$\text{Jednadžba 2}$$

Jednako tako, raspad tau-leptona može se objasniti njegovim prijelazom zbog emisije  $W^-$  bozona, u neutrino iste generacije; odnosno baš u tau – neutrino djelovanjem slabe sile, pri čemu se opet intermedijarni  $W^-$  bozon raspada na neke od mogućih produkata – primjerice parove  $e^-$  i  $\bar{\nu}_e$  ili  $\mu^-$  ili  $\bar{\nu}_\mu$ .

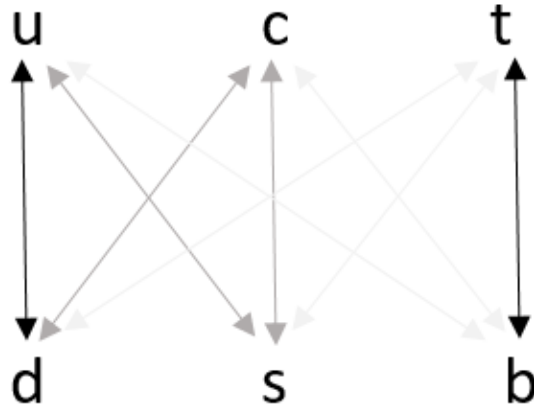
Mogući prijelazi leptona djelovanjem slabe sile prikazani su slikom u nastavku:



Slika 8- Mogući prijelazi leptona djelovanjem slabe sile

*Napomena:* Slika 8 dakle shematski prikazuje one leptone koji međudjeluju slabom silom; dakle one leptona koji se nužno spajaju u istu točku Feynmanovih dijagrama koja je povezana sa odgovarajućim izmjenškim bozonom, pri čemu se kod ranije spomenutih raspada težih leptona ne smiju zanemariti i ostali produkti nastali raspadima izmjenških bozona.

Što se tiče kvarkova, djelovanjem slabe nuklearne sile kvarkovi mogu prelaziti jedan u drugi unutar iste generacije ali i između generacija. Mogući prijelazi kvarkova jednog u drugi djelovanjem slabe sile prikazani su na sljedećoj slici:



Slika 9- Mogući prijelazi kvarkova slabim međudjelovanjem<sup>32</sup>

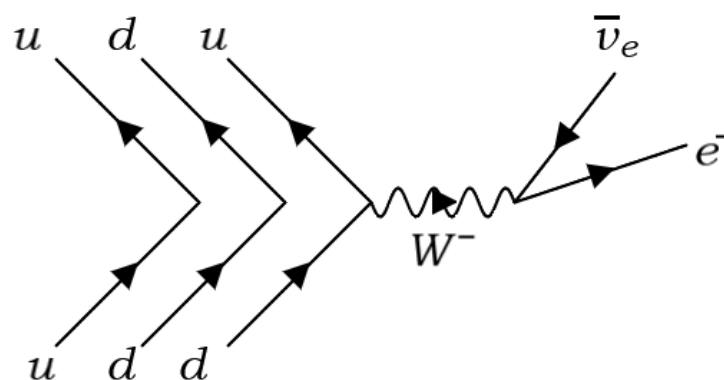
Pritom je boja strelica u korespondenciji sa vjerojatnošću prijelaza danih kvarkova na način da su najtamnijim strelicama označeni najčešći, a najsvjetlijim strelicama najrjeđi prijelazi. (Radi se o vjerojatnostima prijelaza danim Cabbibo – Kobayashi- Maskawinom matricom[90].)

Važno je napomenuti da pri ovakvim promjenama okusa kvarkova, boja kvarkova ostaje jednaka kao i prije promjene! (Za promjenu boje kvarkova odgovorna je druga temeljna sila – jaka sila, o kojoj će biti riječi u nastavku).

Slabo međudjelovanje odgovorno je za raspade nestabilnih složenijih čestica (kao što su primjerice mezoni), kao i za odvijanje nuklearne fuzije u zvijezdama. Primjerice, ono dovodi do  $\beta^-$  raspada, što je prikazano sljedećim Feynmanovim dijagramom<sup>33</sup>:

<sup>32</sup> Slika je izrađena korištenjem podataka iz [1] i [90].

<sup>33</sup> Ovaj Feynmanov dijagram (kao i svaki drugi u nastavku rada) je izrađen pomoću aplikacije dostupne na stranici [22]



Slika 10 - Feynmanov dijagram beta minus raspada

Dakle, u neutronu se jedan od donjih ( $d$ ) kvarkova pretvara u gornji ( $u$ ) kvark, pri čemu se emitira *virtualni*  $W^-$  bozon, dok se gornji kvark apsorpcijom tog bozona pretvara u donji kvark. Kako  $W^-$  bozon međudjeluje i s leptonima, ali tako da čuva leptonski broj, raspada se na elektron i njegov neutrino. (Mion i tau-lepton su puno premasivni, pa ih sačuvanje energije zabranjuje, s obzirom na samo malu razliku u masi između neutrona i protona).

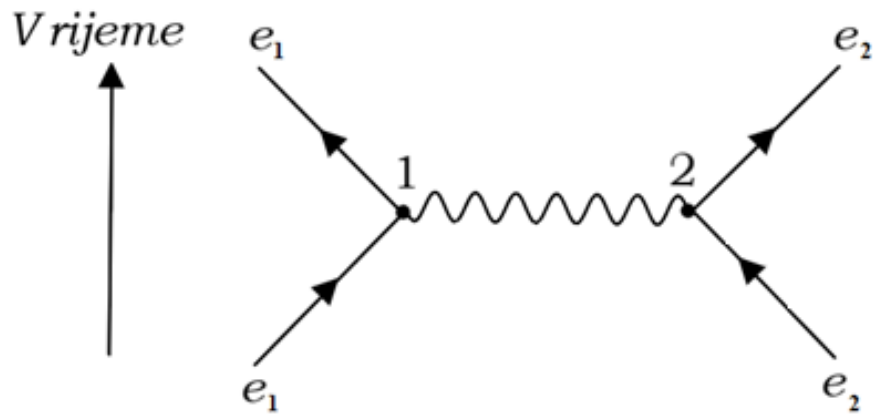
Početnom promjenom donjeg kvarka u gornji kvark, proton se promijenio u neutron. Pritom je boja gornjeg kvarka ostala jednaka boji prvotnog donjeg kvarka, zbog toga što u barionima ukupna boja mora biti „bijela“, odnosno u barionu moraju biti zastupljene sve tri postojeće boje kvarkova.

### 3.3.3. Elektromagnetska sila

Ova sila je, jednako kao i gravitacijska, dobro poznata u klasičnoj fizici, a njena jakost također opada sa kvadratom udaljenosti. Jednako kao i gravitacijska sila, domet elektromagnetske sile je praktički beskonačan, zbog čega se iziskuje da čestica izmjene za ovu silu također bude bezmasena.

Čestica izmjene za elektromagnetsku silu je foton, čiji spin iznosi 2. Za razliku od gravitacijske sile, elektromagnetska sila može biti privlačna ili odbojna.

Elektromagnetskom silom mogu međudjelovati sve čestice koje su električki nabijene – dakle svi kvarkovi nabijeni leptoni, ali ne i električki neutralni neutriini. Pri elektromagnetskom međudjelovanju, električki nabijene čestice uzajamno djeluju jedna na drugu pri čemu svaka pojedina čestica emitira virtualne fotone te istovremeno apsorbira fotone koji su emitirani od druge čestice. Kao primjer ovakvog međudjelovanja, u nastavku je naveden Feynmanov dijagram međudjelovanje dva elektrona.



Slika 11- Feynmanov dijagram elektromagnetske sile između dva elektrona

Dakle, u točki 1 foton  $e_1$  emitira virtualni foton, koji je prikazan valovitom krivuljom i kojeg apsorbira elektron  $e_2$  u točki 2.

### 3.3.4. Jaka sila

Jakom silom mogu međudjelovati samo kvarkovi, a upravo se zbog njene jakosti nukleoni u jezgrama atoma drže na okupu, čime je nadvladano odbojno djelovanje elektrostatske sile. Naime, na udaljenosti od 1 fm, jakost jake sile je približno 137 puta veća od jakosti elektromagnetske sile.[23]

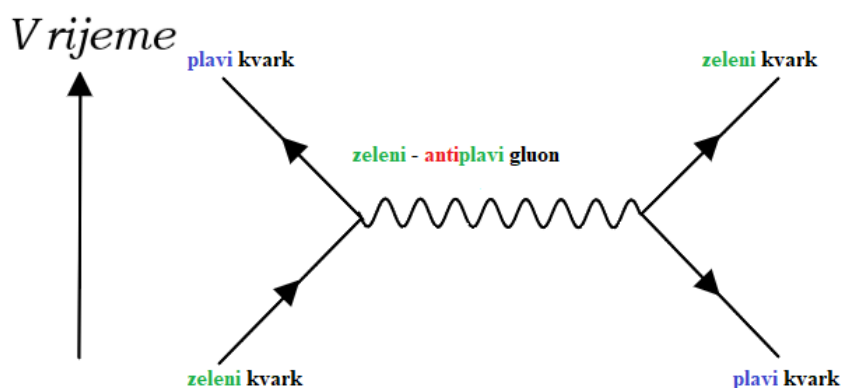
Činjenica da jaka nuklearna sila djeluje samo na kvarkove, ali ne i na leptone predstavlja jednu od najvažnijih razlika ove dvije skupine fermiona, i objašnjava činjenicu da su u svemiru svi kvarkovi udruženi u skupine koje su neutralne u boji, a kod leptona to nije slučaj.

Kada dva kvarka međudjeluju jakom silom, oni izmjenjuju čestice koje se nazivaju *gluoni*. Gluoni su, jednako kao i kvarkovi, „obojane“ čestice, stoga se pri izmjeni gluona boja kvarkova *mijenja*. Budući da razmjena gluona mijenja boju kvarkova i budući da je boja očuvana “veličina”, možemo zamisliti da gluoni, za razliku od kvarkova, nose boju i antiboju.<sup>34</sup> Tako na primjer, ako **zeleni** kvark emitira **zeleni –antiplavi** gluon , kvark mora

<sup>34</sup> Napomena: Budući da gluoni imaju svojstvo „obojanosti“, oni i sami međudjeluju jedni na druge! Prema sadašnjoj teoriji SM i kvantne kromodinamike zapravo postoji osam različitih, neovisnih gluona (a ne 9 što bismo dobili kombinacijama mogućih boja i antiboja)!



promijeniti boju u **plavu** jer ukupna boja mora ostati zelena. Nakon emisije gluona, plava boja kvarka se poništi sa antiplavom bojom gluona i preostala boja je zelena boja kvarka.[1]



Slika 12 – Feynmanov dijagram interakcije plavog i zelenog kvarka

Izmjenom gluona, dva kvarka u hadronu dakle *zamijene boje*, na način da su svi kvarkovi unutar hadrona u svakom trenutku različito obojani, čineći tako hadron „bezbojnim“.

Iznos jake sile kojom se kvarkovi u hadronima međusobno privlače ovisi o njihovoj međusobnoj udaljenosti. Međutim, zanimljivo je da, za razliku od svih ostalih temeljnih sila, jaka sila ne smanjuje svoju jakost povećanjem udaljenosti između parova kvarkova nakon što je dosegnuta granična udaljenost – za udaljenosti veće od otprilike veličine hadrona, ona zadržava iznos od oko 10 000 N.[23] Za pokušaj udaljavanja nekog kvarka iz hadrona, trebalo bi taj kvark sudariti s nekom drugom česticom. Tada bi međusobnim udaljavanjem navedenog kvarka od ostalih kvarkova u hadronu narasla potencijalna energija njihovog međudjelovanja, čime bi se stvorio par kvarka i anti-kvarka – odnosno mezon. Zbog toga bi se potencijalna energija ponovno smanjila, a kvark koji se sudarom udaljio, vratio bi se tamo gdje je bio prije sudara. Dakle, dovođenje energije u sustav hadrona ne može rezultirati oslobađanjem pojedinačnih kvarkova iz hadrona, već se u tom slučaju formiraju novi hadroni! Ovaj fenomen, koji je i registriran u brojnim pokusima naziva se „*zatočenje boje*“.[7]

### 3.3.5. Pregled temeljnih sila i Teorija velikog ujedinjenja

Pregled temeljnih značajki četiri fundamentalne sile i njihovih izmjenjskih čestica nalazi se u sljedećoj tablici:

NAZIV SILE	RELATIVNA JAKOST	DOSEG	ČESTICA IZMJENE			
			Naziv	Masa	Naboj	Spin
<i>Jaka</i>	1	kratak (~1 fm)	gluon	0	0	+1
<i>Elektromagnetska</i>	$10^{-2}$	dug ( $\sim 1/r^2$ )	foton	0	0	+1
<i>Slaba</i>	$10^{-5}$	kratak (~0,001 fm)	$W^\pm, Z^0$ bozon	80.4 , 91.2 GeV/c <sup>2</sup>	$\pm e, 0$	+1
<i>Gravitacijska</i>	$10^{-40}$	dug ( $\sim 1/r^2$ )	graviton	0	0	+2

Tablica 10- Pregled temeljnih međudjelovanja i njihovih osnovnih svojstava

*Napomena:* oznaka  $r$  označava udaljenost između čestica koje međudjeluju, a podaci za izradu tablice preuzeti su iz [6] i [7].

Iako se na prvi pogled četiri osnovna međudjelovanja čine prilično različitima, zanimljivo je to da pri uvjetima visokih energija one postaju itekako slične!

Naime, u čestičnoj fizici, elektromagnetska i slaba sila, koje se uvelike razlikuju pri „svakodnevnim“, niskim energijama, zapravo se mogu opisati kao dva različita aspekta iste sile, budući da se na dovoljno visokim energijama (višima od otprilike 246 GeV), elektromagnetska i jaka sila ujedinjuju u jednu – takozvanu elektroslabu silu.[91].

Nadalje, prema takozvanoj Teoriji Velikog Ujedinjenja<sup>35</sup>, pri energijama višim od otprilike  $10^{15}$  GeV, smatra se da bi elektromagnetsko, jako i slabo međudjelovanje moglo biti ujedinjeno u jednu zasebnu (GUT) silu. Prema teoriji Velikog praska, takvo ujedinjenje sila uistinu je i moralo postojati u svemiru starom svega oko  $10^{-34}$  s, kada je njegova temperatura iznosila oko  $10^{27}$  kelvina.[30][31] Mišljenje mnogih fizičara jest i da bi se pri još većim energijama (od  $10^{19}$  GeV), sva četiri međudjelovanja mogla ujedini u jednu „supersilu“<sup>36</sup>. [7]

<sup>35</sup> engl. GUT- Grand Unification Theory,

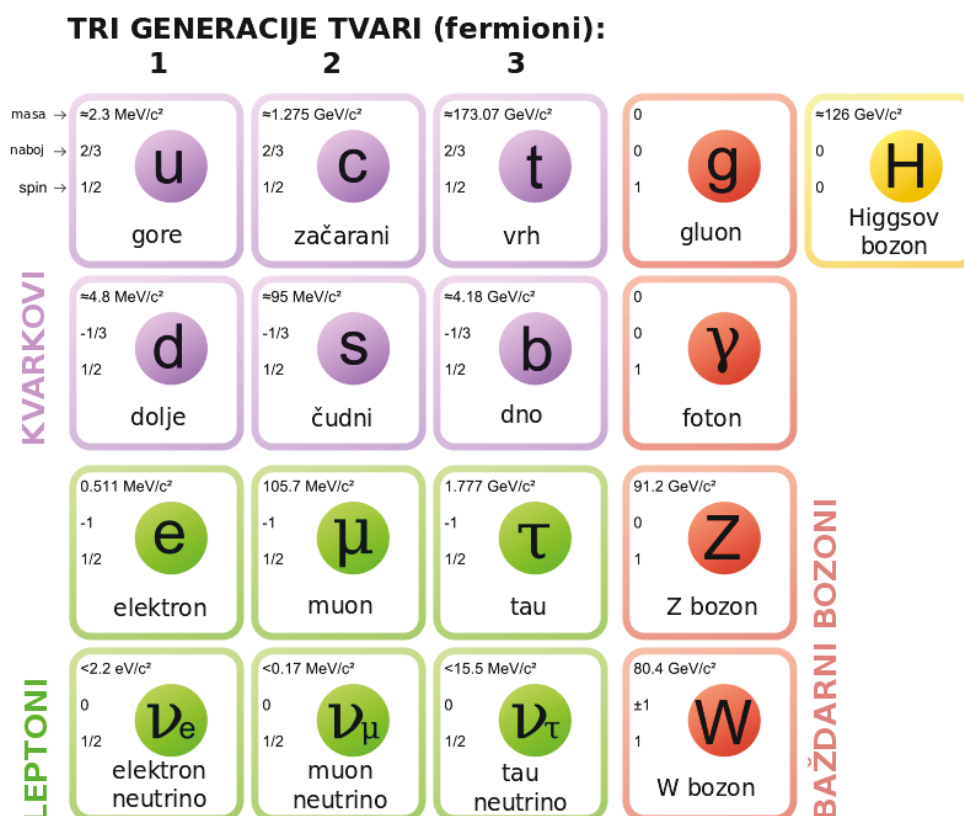
<sup>36</sup> Tako visoki energetske uvjeti su, vjeruje se, postojali u ranom svemiru (više o tome može se pročitati u poglavlju 4.2.3), a u današnjim eksperimentima ih nije moguće postići.

O navedenoj GUT- teoriji i njoj važnosti u razumijevanju fizike ranog svemira može se dodatno pročitati i u poglavlju 4.2.3.1.

### 3.4. Pregled elementarnih čestica prema Standardnom modelu

Dakle, prema današnjoj teoriji Standardnog modela postoji tri vrste elementarnih čestica – kvarkovi, leptoni i izmjenjske čestice.

Njihov popis, kao i osnovna svojstva, prikazani su na sljedećoj slici:



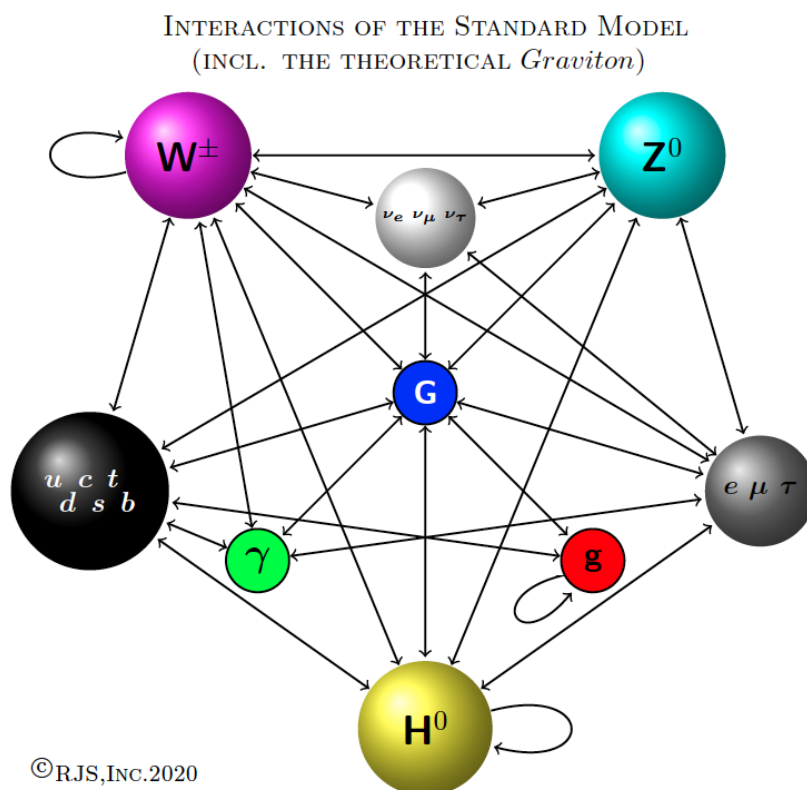
Slika 13 – Pregled elementarnih čestica i njihovih svojstava prema Standardnom modelu<sup>37</sup>

Kao što je vidljivo na Slici 13, u gornjem lijevom kutu za svaku česticu označena je njena masa, iznos električnog naboja u jedinici elementarnog naboja i spin. Ljubičastom bojom označeni su kvarkovi, a zelenom leptoni, koji su svi zajedno u tri stupca poredani u tri generacije tvari. Pritom je jako zanimljiva činjenica da je „svijet tvari koja nas okružuje građen čisto od kvarkova i leptona prve generacije. Pritom u i d kvarkovi vezani gluonima izgrađuju protone i neutrone, sastavnice atomskih jezgri, a one pak upotpunjene elektronima grade atome.“[25]

<sup>37</sup> Slika je preuzeta iz [24].

Kvarkovi i leptoni na Slici 13 poredani su u retke tako da je iznos električnog naboja pojedinih čestica (izuzimajući bozone) jednak u svakom retku.

Na slici se također nalaze i čestice izmjene koje su spomenute u poglavlju 3.3. Međutim, slika prikazuje i jednu novu česticu – Higgsov bozon, o kojem će detaljno biti riječi u poglavlju 4.6.3. Moguće interakcije elementarnih čestica u Standardnom modelu koje su opisane u ovom poglavlju mogu se zgodno sumirati pomoću sljedećeg shematskog prikaza:



Slika 14- Interakcije Standardnog modela (uključujući teoretski graviton)<sup>38</sup>

Bozoni su na slici označeni živim bojama, dok su fermioni (kvarkovi i leptoni) označeni sivim i crnim nijansama. Bezmasene čestice označene su kružnicama homogeno ispunjenima bojom, dok su masene čestice prikazane u kuglama sa 3D gradijentom boje. Krivuljama su označene čestice koje mogu međudjelovati jednakom vrstom čestica kao što su i one, dok ravne linije spajaju različite vrste čestica koje mogu međudjelovati. Na slici se može primjetiti petostruka simetrija pentagona i pentagrama, koja implicira da i sama temeljna teorija fizike Standardnog modela pokazuje takvu vrstu simetrije.[85]

<sup>38</sup> Autor slike je: ParticlesAndMath - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=87583307>, a slika je preuzeta iz [85]

#### 4. Kartaške igre kvarkovske materije

Csaba Török, sedamnaestogodišnji srednjoškolac i član znanstvenog kluba „Berze“<sup>39</sup> u Mađarskoj, na Silvestrovo 2008./2009. godine, inspiriran razgovorima o fizici elementarnih čestica u navedenom klubu, začeo je ideju osmišljanja špila karata na kojima bi bile prikazane elementarne čestice, iz kojih je razvio igru „ANTI“.

Ta igra naknadno se usavršila i nadogradila te je iz nje razvijen špil karata sa skupinom igara pod nazivom „Kartaške igre kvarkovske materije“, čiji je prvotni cilj zabava, a sekundarni popularizacija znanosti i upoznavanje igrača sa osnovnim konceptima čestične fizike. Prilikom razvoja navedene igre, Csaba se udružio sa svojom vršnjakinjom Judit Csörgő, koja je i sama bila članica spomenutog znanstvenog kluba, a koja je shvatila da se navedenim igrama mogu podučiti čak i predškolci. Tamás Csörgő, Juditin otac i pokrovitelj znanstvenog kluba „Berze“, kao i istraživački fizičar koji se bavi eksperimentalnom i teorijskom fizikom visokih energija povezanim sa RHIC akceleratorom u Brookhavenu pridružio se timu kao mentor i menadžer.[74]

U početnom izdanju knjige „Kartaške igre kvarkovske tvari – Elementarne čestice, zaigrano“ opisane su četiri različite igre koje se mogu igrati korištenjem špila od 66 karata koje predstavljaju neke od elementarnih čestica (kao i antičestica) Standardnog modela[76], a do danas je osmišljeno i nekoliko novih igara koje se nadovezuju na isti špil karata.<sup>40</sup>

U ovom poglavlju bit će opisane igre iz treće verzije knjige „Quark matter card game – find your own Higgs boson“[13] Radi se o šest igara („ANTI“, „Kvarkovska tvar“, „Detektirajmo!“, „Kozmički pljusak“, „Memory kvarkovskog sadržaja“ i „Pronađi Higgsov bozon“) u kojima se, uz zabavu, igrači različitog fizikalnog predznanja mogu upoznati ili usavršiti znanje o različitim temeljnim konceptima iz fizike elementarnih čestica, kao što su nazivi elementarnih čestica i antičestica, formacija bariona i mezona, boje kvarkova i hadrona, električni naboj elementarnih čestica te barionski i leptonski broj i njegovo očuvanje. Također, pomoću takvih kartaških igara, igrači se (samostalno ili u sklopu radionice, škole ili znanstvenog kluba) mogu detaljnije upoznati sa širokom paletom dodatnih tema; primjerice tematikom antičestica i anihilacije, fizikom ranog svemira, procesima u akceleratorima i sudarivačima čestica, takozvanoj kvarkovskoj tvari i kvark-gluonskoj plazmi, raspadima čestica i zakonima očuvanja, pojavom kozmičkog pljuska i

---

<sup>39</sup> Nazvanog prema istoimenoj školi „Berze Secondary School“[74] u kojoj je navedeni klub pokrenut

<sup>40</sup> Špil karata s elementarnim česticama opisan je u poglavlju „Dodatak“ - Prilog 1

kozmičkim zrakama te Higgsovim bozonom i eksperimentima koji su doveli do njegovog otkrića! Zbog brojnih navedenih tema koje se isprepliću u ovakvim igrama, one dakle mogu poslužiti kao odličan izvor za upoznavanje (kroz zabavu) sa ovim naizgled kompliciranim i teškim područjima fizike.

Za svaku od navedenih šest igara, nakon razjašnjavanja pravila i tijeka igre, bit će opisano i za koga je igra namijenjena te kako bi se mogla prilagoditi igračima različitih uzrasta i stupnjevima predznanja. Za pojedine igre (koje su povezane sa dodatnim područjima fizike) dodana su i potpoglavlja o fizikalnoj pozadini u kojima su ukratko razjašnjeni i pridodani najvažniji pojmovi specifičnog područja fizike koje se može povezati s pojedinom igrom.

Također, osim spomenutih šest originalnih igara, u ovom poglavlju opisane su i tri novije osmišljene igre – „Čestični poker“ (M. Vargyas, T. Csörgő, L. P. Csernai)[78], „Kvarkovski ratovi“ (T.Csörgő i T.Novák)[74] te „Rubikova kocka kvarkovske tvari“ (T.Csörgő)[76].

#### **4.1. Igra „ANTI“**

Ova igra predviđena je za dva igrača, odnosno suparnika, a nastala je po uzoru na popularni igru u Mađarskoj nazvanu „Speed“, za koju se inače koriste francuske ili mađarske karte.[13] Prema složenosti, igra se može prilagoditi na način da u njoj mogu uživati i djeca vrtićke dobi, učenici i studenti fizike, jednako kao i ljudi koji se i profesionalno bave fizikom elementarnih čestica.<sup>41</sup> Zanimljivost vezana za ovu igru koju navode njeni autori jest da „iskustvo pokazuje da u ovoj igri učenici imaju velike šanse za pobjedom, čak i ako igraju protiv istraživača ili profesora fizike.“[13]

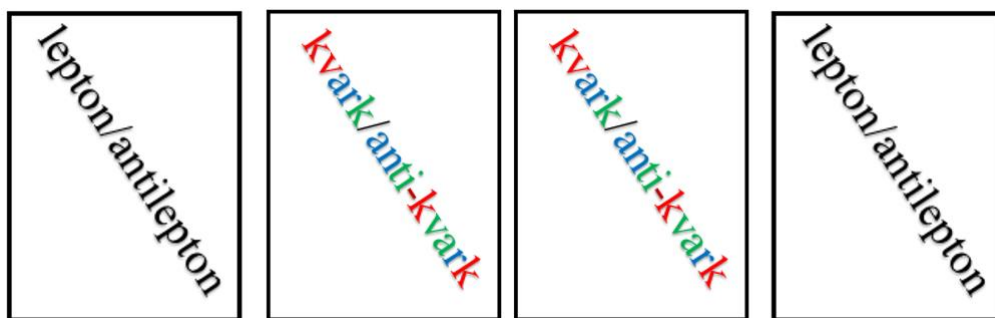
##### **4.1.1. Pravila i tijek igre**

Prije samog početka igre, potrebno je dobro promiješati karte, nakon čega svaki igrač dobije pola špila; dakle 33 karte od ukupnih 66. Igrači ne smiju odmah vidjeti svoje karte, već su one okrenute naopačke.[13]

Igra počinje tako da svaki igrač stavlja na stol po jedan kvark ili antikvark (bilo koje boje) te po jedan lepton ili antilepton. Te karte okrenute su licem prema gore, tako da ih oba igrača mogu vidjeti. Na taj način na sredini stola formira se red od četiri karte na način kako je prikazano na sljedećoj slici:

---

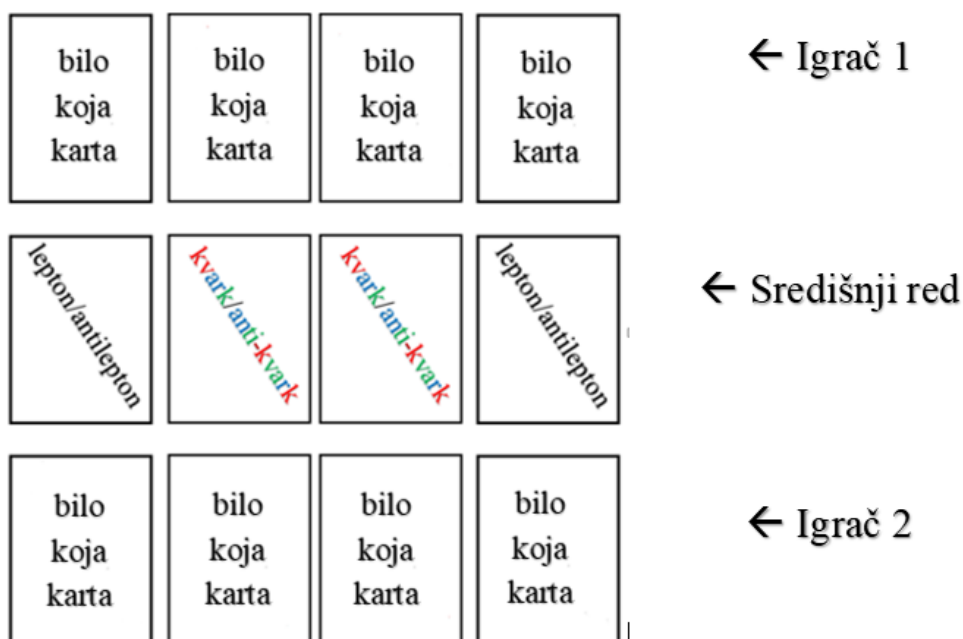
<sup>41</sup> U poglavlju 4.1.3 bit će navedene i objašnjene preporuke kako prilagoditi ovu igru različitim uzrastima, kao i korisne metode poučavanja za svaku razinu igre.



Slika 15- Prikaz karata u središnjem redu

Kao što je vidljivo na slici, svaki igrač mora postaviti kvark ili antikvark u sredinu reda, dok lepton ili antilepton postavljaju na rub. Ove karte predstavljaju takozvani *središnji red*.

Igra se potom nastavlja tako da svaki igrač izvlači redom po četiri karte iz svoje polovice špila te ih postavlja u red ispred sebe. Ako igrače nazovemo imenima „Igrač 1“ i „Igrač 2“, na taj način dobivamo sljedeću formaciju karata na stolu:



Slika 16- Prikaz početne formacije karata na stolu

Dakle, svaki igrač formira svoj vlastiti red karata, koje su također okrenute licem prema gore, tako da oba igrača mogu vidjeti četiri karte u središnjem redu, svoje vlastite četiri karte, kao i četiri karte suparnika.

Ideja igre jest da igrači pomiču karte sa svojeg reda, postavljajući ih na odgovarajuće karte u središnjem redu.[13] Pritom se moraju poštivati pravila slaganja karata, koja će detaljno biti objašnjena i navedena u idućem potpoglavlju, a koja su u direktnoj vezi sa bojama

kvarkova te fizikalnim zakonima očuvanja leptonskog broja i električnog naboja kod leptona.

Nakon što postave jednu od karata iz svojeg reda na odgovarajuću kartu u središnji red, igrači uzimaju novu kartu iz vlastitog špila tako da u svakom trenutku u svojem redu (ispred sebe) imaju po četiri karte. Ako se tijekom igre dogodi situacija da niti jedan igrač ne može niti jednu kartu iz svojeg reda karata postaviti na neku kartu u središnjem redu prema pravilima slaganja, oba igrača moraju staviti bilo koju od karata iz svojeg reda na neku od karata u središnjem redu, bez obzira na pravila slaganja, kako bi se igra mogla nastaviti dalje.[13]

Pobjednik igre jest onaj igrač koji se prvi riješi svih svojih karata![13]

Zanimljivo je to da između igrača nema unaprijed određenog redosljeda postavljanja karata, tako da pojedini igrač može postavljati karte sa svojeg reda u središnji red u bilo kojem trenutku, neovisno o drugom igraču[13], zbog čega je brzina prepoznavanje odgovarajuće situacije te pravilna i hitra reakcija na poteze suparnika važna za veći uspjeh u igri.

### **Pravila slaganja karata:**

Kao što je već napomenuto, ova pravila u obzir uzimaju očuvanje leptonskog broja i očuvanje naboja kod leptona i antileptona te različitost boja kod kvarkova i antikvarkova.

Detaljne upute za sve pojedine slučajeve slaganja su sljedeće:

#### **1) Slaganje kvarkova i antikvarkova u središnji red**

- Igrači mogu postaviti jedan kvark na bilo koji drugi kvark u središnjem redu u situacijama kada se oni *razlikuju* u boji.[13]  
Na primjer, na bilo koju crvenu kartu – „kvark“ u središnjem redu, igrači mogu postaviti bilo koji drugi kvark koji je zelene ili plave boje.
- Igrači mogu postaviti antikvark na kvark ako je njihova boja *suprotna*. [13]  
Primjerice, na crveni kvark može se postaviti bilo koji antikvark koji je plavo-zelene (odnosno anticrvene) boje.
- Sukladno prethodnom pravilu, igrači mogu postaviti i kvark na antikvark ako su oni suprotnih boja. Primjer za ovu situaciju jest da igrač može postaviti zeleni kvark iz svojeg reda na neki plavo-crveni (odnosno antizeleni) antikvark u središnjem redu.

#### **2) Slaganje leptona i antileptona u središnji red**

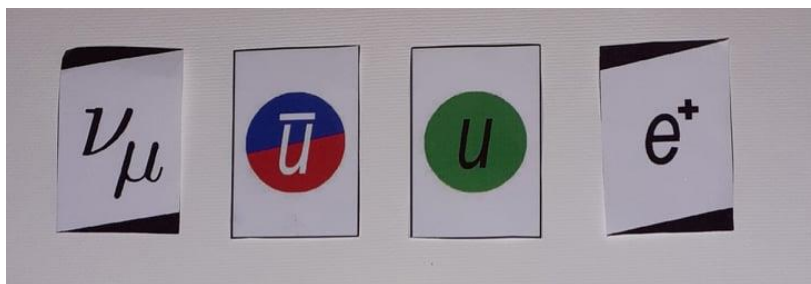


- Lepton se može postaviti na njegov vlastiti antilepton, što odgovara očuvanju električnog naboja i leptonskog broja. Također, shodno tome, i anti-lepton se može postaviti na njegov odgovarajući lepton.[13]  
Tako se na primjer elektron ( $e^-$ ) može postaviti na pozitron ( $e^+$ ), a vrijedi i obrat – dakle i pozitron se može postaviti na elektron ako se on nalazi u središnjem redu.
- Igrači mogu postaviti lepton iz svojeg reda na antilepton ako su oni iz iste generacije, a isto vrijedi i za postavljanje antileptona na lepton.[13]  
Recimo, na elektron ( $e^-$ ) se može postaviti elektronski antineutrino ( $\bar{\nu}_e$ ).
- Lepton se može postaviti na antilepton u središnjem redu ako su takvi parovi suprotnog električnog naboja.[13] Ova situacija odgovara očuvanju električnog naboja. Primjerice, na pozitivni mion ( $\mu^+$ ) može se postaviti elektron ( $e^-$ ).

Međutim, osim brzine u pravilnom slaganju karata, važna je i pažnja igrača, kao i prepoznavanje određenih kombinacija karata koje se u određenim trenucima nalaze u središnjem redu. Naime, igrači mogu promijeniti tijekom igre, i tako zadobiti prednost ako prepoznaju jednu od odgovarajućih kombinacija karata u središnjem redu te u tom trenutku izgovore riječ „ANTI“. U tom slučaju, drugi igrač mora uzeti sve karte iz središnjeg reda u svoj špil, nakon čega se ponovno postavljaju karte u središnji red na način kao i na početku igre.[13]

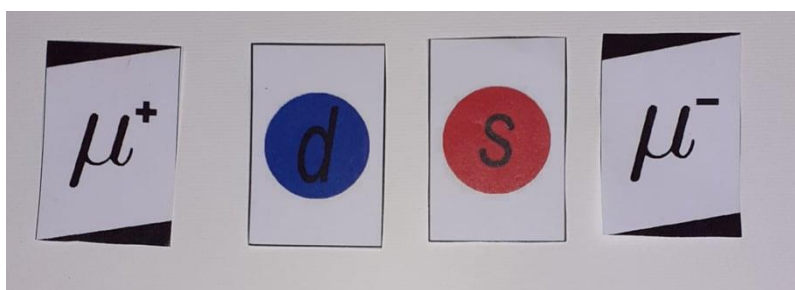
Situacije u kojima igrači mogu reći „ANTI“ su sljedeće:

- 1) Ako se u središnjem redu u sredini nalazi par čestice i njene antičestice, odnosno par kvark-antikvark jednakog okusa (dakle  $u$  i  $\bar{u}$ ,  $d$  i  $\bar{d}$ , ili  $s$  i  $\bar{s}$ ) i suprotnih boja (tako da tvore parove crvene i anticrvene, plave i antiplave, ili zelene i antizelene boje.)[13]  
Primjer ovakve kombinacije u središnjem redu nalazi se na slici u nastavku:



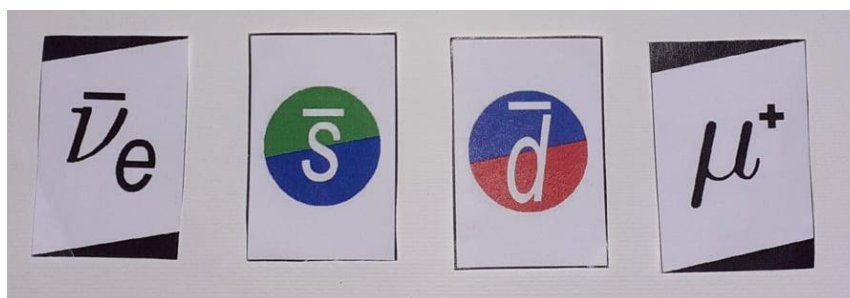
Slika 17- Primjer ANTI-situacije nastale tijekom igre sa kvark-antikvark parom (u sredini)

- 2) Ako se na rubovima središnjeg reda nalazi par leptona i njegova vlastitog anti-leptona[13] (dakle  $e^-$  i  $e^+$ ,  $\nu_e$  i  $\bar{\nu}_e$ ,  $\mu^-$  i  $\mu^+$ , ili  $\nu_\mu$  i  $\bar{\nu}_\mu$ ). Primjerice, igrač može reći „ANTI“ ako primijeti sljedeću kombinaciju karata u središnjem redu:



Slika 18- Primjer ANTI-situacije nastale tijekom igre sa lepton-antilepton parom (na rubovima)

- 3) Ako sve karte u srednjem redu označavaju antičestice.[13] Primjer za ovu situaciju jest kombinacija antičestica na sljedećoj slici:



Slika 19- Primjer ANTI-situacije nastale tijekom igre sa četiri antičestice

Ako se dogodi situacija da jedan od igrača kaže „ANTI“ u trenutku kada kombinacija karata u središnjem redu nije odgovarajuća (dakle ako ne predstavlja niti jedan od opisanih slučajeva), tada igrač koji je pogriješio dobiva kaznu – on mora pokupiti sve karte sa središnjeg reda.[13] U slučaju da oba igrača istovremeno izgovore „ANTI“, niti jedan od njih ne mora pokupiti karte sa središnjeg reda, a igra se nastavlja kao da se ništa nije dogodilo.[13]

Kako bi se dodatno razjasnila pravila i tijek igre „ANTI“, u nastavku je dana demonstracija kako bi jedan konkretan dio igre između dva igrača mogao izgledati.

#### 4.1.2. Primjer razvoja igre „ANTI“

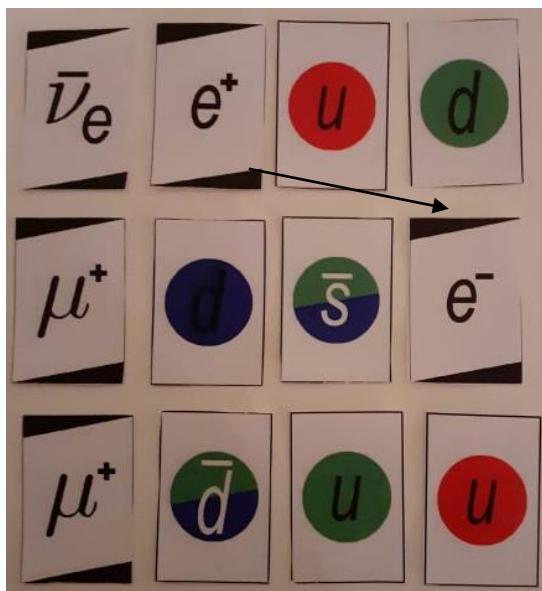
Na Slici 20 vidljiv je trenutak samog početka igre. Nazovimo dvoje igrača „Igrač 1“ i „Igrač 2“. Nakon što je svaki igrač dobio polovicu karata iz špila, oni izvlače po jedan (anti)kvark te po jedan (anti)lepton te ih postavljaju u središnji red.

Konkretno, „Igrač 1“ postavlja u središnji red plavi  $d$  kvark i elektron, a „Igrač 2“ anticrveni  $s$  antikvark i antimion. Na taj način, u središtu stola se formira sljedeći središnji red:



Slika 20- Središnji red kojeg su formirali "Igrač 1" i "Igrač 2"

Nakon postavljanja karata u središnji red prema pravilima igre, svaki od igrača izvlači iz svojeg špila (u kojem su karte okrenute licem prema dolje) redom po četiri karte, te ih postavlja na stol u svoj red. Na taj način, dobiva se skupina od sljedećih 12 karata:

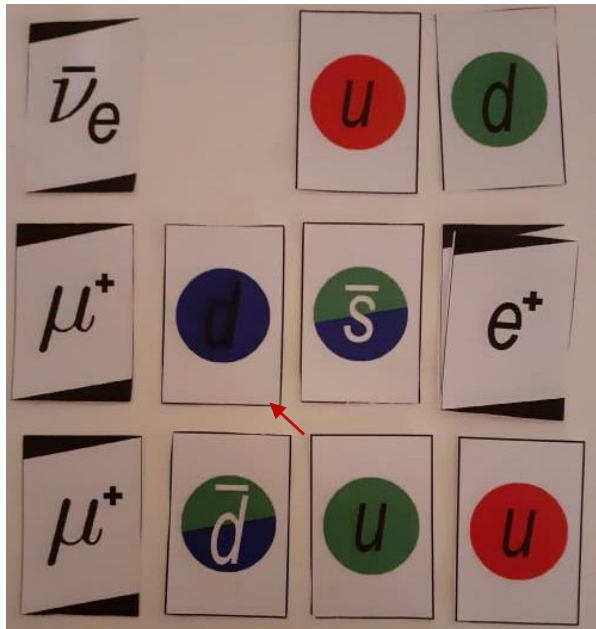


Slika 21- Primjer početka igre. Igrač 1 uočava svoj prvi potez

Gornji red karata predstavlja četiri karte „Igrača 1“, a u donjem redu ispod središnjeg nalaze se četiri karte „Igrača 2“. Na samom početku igre, oba igrača razmišljaju o svojim mogućim

potezima. Dok „Igrač 2“ još razmišlja o svojim potencijalnim opcijama, „Igrač 1“ shvaća da pozitron ( $e^+$ ) iz svojeg reda može postaviti na elektron ( $e^-$ ) u središnjem redu te čini taj potez, kao što je označeno crnom strelicom na Slika 21.

Nakon što je „Igrač 1“ postavio pozitron na elektron, situacija izgleda ovako:

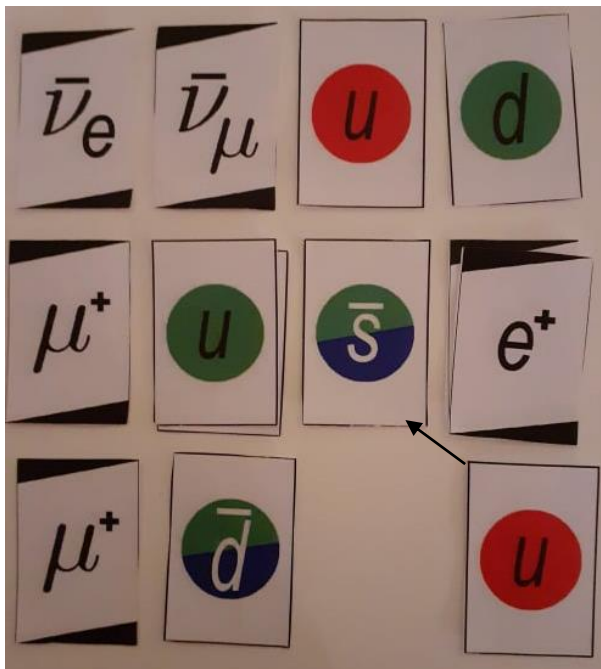


Nakon izvršenog poteza, „Igrač 1“ kreće izvlačiti novu kartu iz svojeg špila, kako bi nadopunio svoj red tako da on opet sadrži četiri karte.

U tom trenutku, i „Igrač 2“ primjećuje i izvršava mogući potez.

Naime, on shvaća da  $u$  kvark zelene boje iz svojeg (donjeg) reda može postaviti na plavi  $d$  kvark u središnjem redu, kako je prikazano crvenom strelicom na Slici 22.

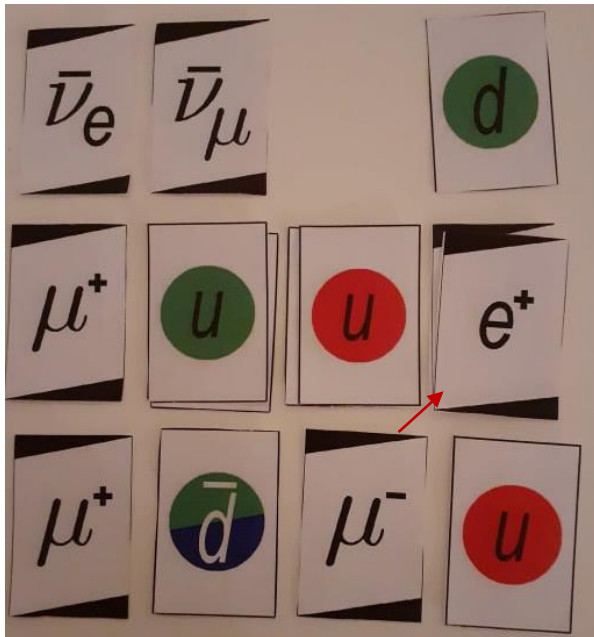
Slika 22 - "Igrač 1" izvršio je potez te izvlači novu kartu, a Igrač 2 uočava i izvršava svoj potez



U međuvremenu, „Igrač 1“ izvlači novu kartu, opaža da se radi o mionskom antineutrinu  $\bar{\nu}_\mu$  te ga postavlja na prazno mjesto u svojem (gornjem) redu.

U istom trenutku, „Igrač 2“ izvlači novu kartu iz svojeg špila kako bi i on upotpunio svoj red. Dok „Igrač 2“ izvlači kartu, „Igrač 1“ brzo odlučuje učiniti svoj sljedeći potez - pomaknuti svoj crveni  $u$  kvark na anticrveni  $s$  antikvark u središnjem redu, kao što je označeno crnom strelicom na Slici 23.

Slika 23- "Igrač 2" izvlači novu kartu, a "Igrač 1" čini novi potez



Slika 24- "Igrač 2" uočava mogućnost za „ANTI“

Nakon što je „Igrač 1“ učinio svoj potez, ponovno su mu preostale samo tri karte u njegovom redu, tako da on kreće sa izvlačenjem nove karte iz svog špila kako bi upotpunio svoj red. Za to vrijeme, „Igrač 2“ je iz svog špila izvukao novu kartu – mion ( $\mu^-$ ) koju je brzo postavio na prazno mjesto u svoj red. U tom trenutku, „Igrač 2“ je odmah shvatio kako bi mogao postaviti taj novoizvučeni mion na pozitron ( $e^+$ ) u središnjem redu, kao što je označeno strelicom na slici, čime bi stvorio „ANTI“ kombinaciju.

Naime, tada bi se u središnjem redu nalazio par istovrsne čestice i njene antičestice, odnosno mion  $\mu^-$  i antimion  $\mu^+$ . Nakon što „Igrač 2“ izvršava takav potez, on brzo izgovara riječ „ANTI“, zbog čega je „Igrač 1“ prisiljen uzeti sve karte iz središnjeg reda, čime „Igrač 2“ dobiva prednost u igri!

Nakon ovakvog raspleta situacije, igra se nastavlja ponovnim postavljanjem karata u središnji red. „Igrač 2“ zadobio je trenutačnu prednost, ali svakako su i dalje mogući različiti obrati, koji bi utjecali na promjenu toka igre! Dakako, da je „Igrač 2“ učinio takav potez, a nije prepoznao „ANTI“-situaciju, njegov suparnik mogao bi ga na to upozoriti te umjesto njega izgovoriti riječ „ANTI“, što bi rezultiralo obratnom situacijom - tada bi „Igrač 2“ morao pokupiti sve karte iz središnjeg reda.

Na ovom primjeru vidi se kako je, osim brzine, važna i pažljivost i koncentracija u prepoznavanju i slaganju odgovarajuće „ANTI“ kombinacije. Naime, osim poteza označenog crvenom strelicom na posljednjoj slici, „Igrač 2“ mogao je učiniti i drugačiji potez, primjerice, mogao je staviti crveni  $u$  kvark iz svojeg reda na zeleni  $u$  kvark u središnjem redu, ili je pak mogao staviti plavo-zeleni  $d$  antikvark na crveni  $u$  kvark u središnjem redu. Tim potezima riješio bi se dvije svoje karte, ali ipak je za njega bilo bolje i korisnije „zapapriti“ protivniku postavljanjem gore navedene „ANTI“-kombinacije i brzim izgovaranjem riječi „ANTI“.

Igra „*ANTI*“ svakako je veoma zanimljiva i dinamična upravo zbog različitih mogućih situacija u kojima se suigrači mogu nalaziti, činjenice da je bitna brzina i spretnost, a posebno zbog toga što se izgovaranjem riječi „*ANTI*“ u pravom trenutku stječe velika prednost!

#### 4.1.3. *Za koga je namijenjena igra „ANTI“?*

Igra „*ANTI*“ je jedna od najjednostavnijih postojećih kartaških igara s elementarnim česticama, tako da ju mogu naučiti igrati i odrasli, ali i djeca predškolske dobi! Međutim, važno je prikladno prilagoditi pravila igre ovisno o dobnoj skupini i razini predznanja igrača, o čemu će biti riječ u nastavku.

Za djecu predškolske dobi, autori igre navode da „*ni u kojem slučaju ne bismo trebali pokušavati ispuniti misli ove male djece čudnim imenima čestica ili skupina čestica.*“[13]

Puno bi prikladnije bilo naučiti ih jednostavnim pravilima koji su vezani za oblike i boje karata, bez fizikalne pozadine, a onda kasnije, kako djeca odrastaju, približavati im sve više i više samu fiziku elementarnih čestica. Budući da djeca predškolske dobi često ne znaju čitati, učenje različitih simbola i njihovih imena „napamet“ stvarno nema smisla. Međutim, ona mogu prepoznati boje kvarkova – crvenu, zelenu i plavu, te je zbog toga dobro započeti sa pojednostavljenom verzijom igre „*ANTI*“ u kojoj se koriste samo kvarkovi. U takvoj varijanti igre, u središnjem redu nalazile bi se samo dva kvarka. Početno „pravilo“ igre bilo bi takvo da na takve dvije karte mogu ići samo one karte koje su obojane drugačijim bojama. Primjerice, ako se na stolu nalazi zelena karta (npr. zeleni  $d$  kvark), na takvu kartu mogla bi se postaviti bilo koja druga karta koja nije zelene boje, što podrazumijeva neki crveni ili plavi kvark ili anti-zeleni antikvark. Nakon što djeca savladaju takvo pravilo slaganja karata, može se uvesti i „*ANTI*“ situacija vezana za kvark-antikvark par. Pritom bi djeca trebala uočiti da se u takvom slučaju na stolu nalaze karte jednakog simbola (odnosno jednakog imena (anti)kvarka), koje su takve da su u njima zastupljene sve tri moguće boje.[13]

Djecu u nižim razredima osnovne škole (koji se još ne bave učenjem fizike), moguće je naučiti igrati igru „*ANTI*“ sa kvarkovima i leptonima. „Za njih, najveća poteškoća je prepoznavanje različitih nepoznatih simbola na kartama (koji predstavljaju primjerice slova Grčkog alfabeta).“[13]

U tom slučaju važno je naučiti ih jednostavnom pravilu – *karta predstavlja antilepton određenog leptona ako sadrži jednu crticu više nego njegov lepton!* (Na primjer,  $e^+$  sadrži jednu „crticu“ više nego  $e^-$ , jednako kao što i  $\bar{\nu}_\mu$  sadrži jednu „crticu“ više od  $\nu_\mu$ ). Pritom je važno da djeca znaju da obojane karte predstavljaju kvarkove, a leptoni i antileptoni su

prikazani kartama u crno-bijelim bojama. Također, djecu ove dobi moguće je naučiti i leptonskim generacijama, ako im se objasni da su „neutrini čestice koje nose znak svoje obitelji i (u okviru Standardnog modela) ne miješaju se s leptonima iz drugih generacija.“[13] Samim time, jasno je da se, recimo, na mion može postaviti mionski antineutrino, na kojeg se može postaviti mionski neutrino (ali ne i elektronski neutrino).

Pritom je djecu moguće naučiti da, za razliku od neutrina, elektron, mion i njihove antičestice nose električni naboj (čiji je predznak označen plusom ili minusom, a iznos jednak naboju elektrona), zbog čega je prema pravilima igre, moguće na elektron postaviti ne samo pozitron, nego i antimion!

Preporuka autora igre za ovu dobnu skupinu jest da se igra započne najprije samo sa kvarkovima (kao i kod predškolske djece), a potom samo sa leptonima, ali da se u igri koriste i „ANTI“ situacije, koje bi djeci mogle biti jako zanimljive, pogotovo kada ju uspiju uočiti prije protivnika i tako zadobiti prednost.

Starija djeca, koja već imaju određeno predznanje iz fizike i kemije o strukturi atoma, mogu bez problema igrati ovu igru prema svim zadanim pravilima, a usput i naučiti i utvrditi različite vrste elementarnih čestica i njihova osnovna svojstva poput boje kvarkova i električnog naboja leptona.

Zanimljivo je da autori navode da su mlađa djeca „prema iskustvu brži i uspješniji u igri „ANTI“ od odraslih“.[13] Međutim, zbog svoje jednostavnosti, igra „ANTI“ je odlična kao uvodna igra i za one odrasle ljude koji nemaju bogato predznanje o fizici elementarnih čestica.

#### **4.1.4. Fizikalna pozadina igre – O antičesticama**

Kao i u svakoj od drugih igara koje će biti navedene u nastavku, u igri „ANTI“ koriste se karte koje predstavljaju određene elementarne čestice – kvarkove i leptone, kao i njihove antičestice. Vrste elementarnih čestica kao i njihova osnovna svojstva (od kojih su za ovu igru važni boja i električni naboj) navedeni su i objašnjeni u poglavlju 3.

Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju, ovisno o stupnju predznanja i o dobi igrača, ove se informacije i podaci o elementarnim česticama mogu na različite načine približiti igračima, tako da kroz igru svatko i nauči nešto novo. Međutim, smatram da ova igra može poslužiti i kao odličan uvod za učenje o antičesticama, njihovoj razlici u odnosu na čestice, kao i o procesu anihilacije i tvorbi parova u kojima one sudjeluju. U tom slučaju, učenicima

se, nakon što ih se upozna s pravilima igre, može pripremiti vođeno predavanje u kojem će se spomenuti neke od sljedećih važnih informacija o antičesticama!

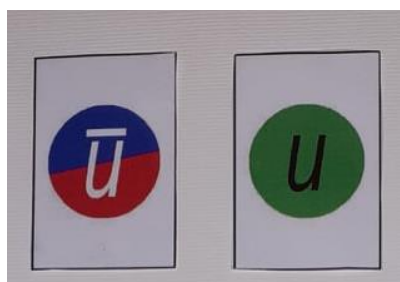
#### 4.1.4.1. Po čemu se antičestice razlikuju od čestica?

U poglavlju 2.2 opisano je otkriće pozitrona 1932. godine, što je potvrdilo Diracovu pretpostavku o postojanju antičestice elektrona. Kao što je prikazano i objašnjeno na Slici 1, u homogenom magnetskom polju elektron i pozitron slijedili su kružne putanje u suprotnim smjerovima, zbog čega je postalo jasno da oni imaju jednaku masu i jednak iznos, ali suprotan predznak električnog naboja.

Također, u istom poglavlju objašnjeno je i kako je kasnijim otkrićem antiprotona i antineutrona u znanstvenim krugovima postalo jasno da je Dirac bio u pravu - da svaka čestica mora imati i svoju antičesticu, pri čemu uvijek vrijede ista pravila. Naime, masa, vrijeme života i spin antičestice jednaki su onima odgovarajuće čestice, dok čestica i antičestica moraju imati suprotan predznak električnog naboja, magnetski moment, barionski i leptonski broj, stranost i boju.<sup>42</sup>

Neka od ovih svojstava navedena su u tablicama u nastavku za dva primjera parova čestice i antičestice koje je moguće prikazati kartama iz špila<sup>43</sup>.

PRIMJER 1 – Kvark/antikvark par:



Slika 25- Kvark - antikvark par

Simbol	u	$\bar{u}$
Masa	$\cong 2,2 \text{ MeV}/c^2$	$\cong 2,2 \text{ MeV}/c^2$
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Električni naboj	$+\frac{2}{3}e$	$-\frac{2}{3}e$
Barionski broj	$+\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
Elektronski/mionski/tau broj	0/0/0	0/0/0
Stranost	0	0
Boja	zeleno	antizeleno

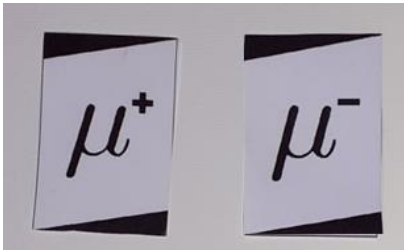
Tablica 11- Razlike u nekim od najvažnijih svojstava kvarka i antikvarka koji su prikazani na Slici 25.

<sup>42</sup> Samim time, neke od čestice (poput fotona) su same sebi antičestice!

<sup>43</sup> Upravo ovi parovi čestice i antičestice na slikama 24 i 25 korišteni su u objašnjenju igre „ANTI“ kao primjer ANTI-konfiguracija (Slika 17 i Slika 18)



## PRIMJER 2 – Lepton/antilepton par

	Simbol	$\mu^-$	$\mu^+$
	Masa	$\cong 105,7$ MeV/c <sup>2</sup>	$\cong 105,7$ MeV/c <sup>2</sup>
	Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	Električni naboj	-e	+e
	Barionski broj	0	0
	Elektronski/mionski/tau-broj	0/+1/0	0/-1/0
	Stranost	0	0
	Boja	nema boju	nema boju

Slika 26- Lepton / antilepton par

Tablica 12-Razlike u nekim od najvažnijih svojstava miona i antimiona

### 4.1.4.2. Anihilacija i tvorba parova

U fizici elementarnih čestica, u procesu kojeg zovemo *tvorba parova* iz neutralnog bozona nastaju parovi čestice i njene antičestice. U takvim procesima, moraju vrijediti osnovni zakoni očuvanja<sup>44</sup>. Upravo zbog toga jasno je zašto su određene veličine jednakog iznosa, ali suprotnog predznaka za nastali par čestice i antičestice. (Recimo, elektron i pozitron imaju isti iznos, a različit predznak električnog naboja, zbog toga što je električni naboj fotona iz kojih oni nastaju jednak nuli).

Iz zakona očuvanja ukupne energije, slijedi zaključak da *minimalna* energija bozona (iz kojeg će nastati par čestice i antičestice) mora biti jednaka masi mirovanja nastale čestice i antičestice da bi tvorba parova bila moguća.

U poglavlju 2.2 dan je primjer nastanka elektron-pozitron para u sudarima visokoenergijskih  $\gamma$  – zraka sa olovnim listićem.<sup>45</sup> Dakle, u tom slučaju, minimalna energija za tvorbu para elektrona i pozitrona ( $E_{min}$ ) jednaka je ukupnoj energiji mirovanja elektrona i pozitrona, što je, zbog činjenice da su im mase mirovanja jednake, ekvivalentno energiji mirovanja dva elektrona ( $2m_e c^2$ ):

$$E_{min} = 2m_e c^2 = 1,022 \text{ MeV} \quad \text{Jednadžba 3}$$

Pritom je sa  $m_e$  označena masa mirovanja elektrona, odnosno pozitrona, a  $c$  označava izos brzine svjetlosti u vakuumu.<sup>46</sup>

Interakcijom čestice i antičestice, moguć je i proces suprotan tvorbi parova – *anihilacija*. U takvim procesima se u sudaru elementarne čestice i njene antičestice obje čestice unište

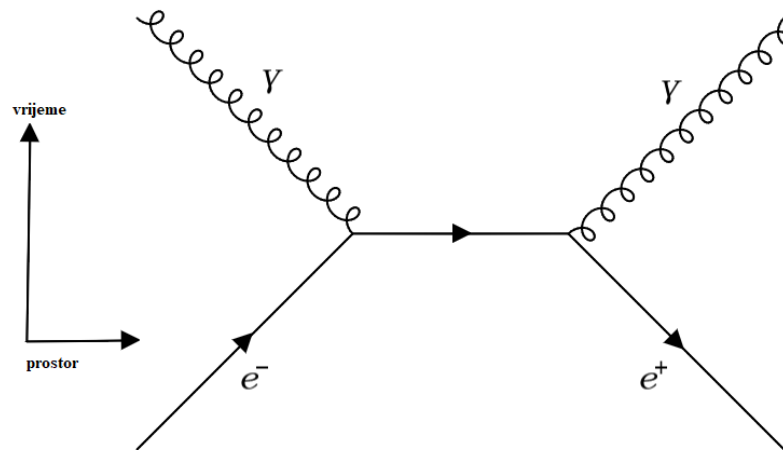
<sup>44</sup> Više o zakonima očuvanja može se pročitati u poglavlju 4.3.3.

<sup>45</sup> Vidjeti Slika 1

<sup>46</sup>Masa elektrona:  $m_e = 9.109 \cdot 10^{-31}$  kg, brzina svjetlosti u vakuumu:  $c = 2,998 \cdot 10^8$  m/s<sup>2</sup> [6]

(anihiliraju), uz emisiju elementarnih bozona. Primjerice, sudarom pozitrona i elektrona, oni nestanu, a pritom se u najvećem broju slučajeva emitiraju dva (ili ponekad i tri) fotona, čija je ukupna energija najmanje 1,022 MeV.[6]

Anihilacija elektrona i pozitrona u dvije  $\gamma$ -zrake (dva fotona) prikazana je sljedećim Feynmanovim dijagramom:



Slika 27- Feynmanov dijagram anihilacije elektrona i pozitrona

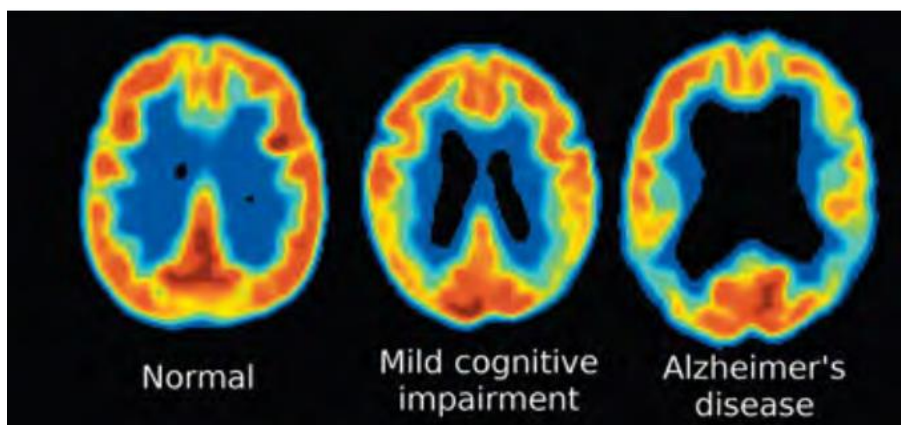
Anihilacija pozitrona i elektrona koristi se, primjerice, u medicinskoj dijagnostici ranog otkrivanja Alzheimerove bolesti. Pritom se koristi tehnika pozitronske emisijske tomografije (PET).

*„Pacijentu se pritom daje spoj FDG koji je sličan glukozi, ali je jedan od atoma kisika zamijenjen radioaktivnim  $^{18}\text{F}$ . FDG se nakuplja u aktivnim područjima mozga, gdje je metabolizam glukoze visok.  $^{18}\text{F}$  se raspada  $\beta^-$  raspadom (sa vremenom poluživota od otprilike 110 minuta), pri čemu se emitiraju pozitroni!*

*Emitirani pozitroni smjesta anihiliraju zajedno sa atomskim elektronima, pri čemu nastaju po dvije  $\gamma$ -zrake u svakoj anihilaciji. Skener detektira nastale fotone, a potom je moguće odrediti i gdje se točno anihilacija, a samim time i akumulacija FDG-a dogodila.*

*Na taj način nastaju PET-slike, koje pokazuju područja najveće aktivnosti metabolizma glukoze u mozgu, a samim time mogu se detektirati i moguća kognitivna oštećenja.“[6]*

PET-slike mozga koje su na takav način nastale mogu se vidjeti na sljedećoj slici:



Slika 28- PET- slike mozga zdrave osobe (prva slika lijevo), osobe s blagim kognitivnim oštećenjima (slika u sredini) i osobe s Alzheimerovom bolesti (desno)<sup>47</sup>

## 4.2. Igra „KVARKOVSKA TVAR“

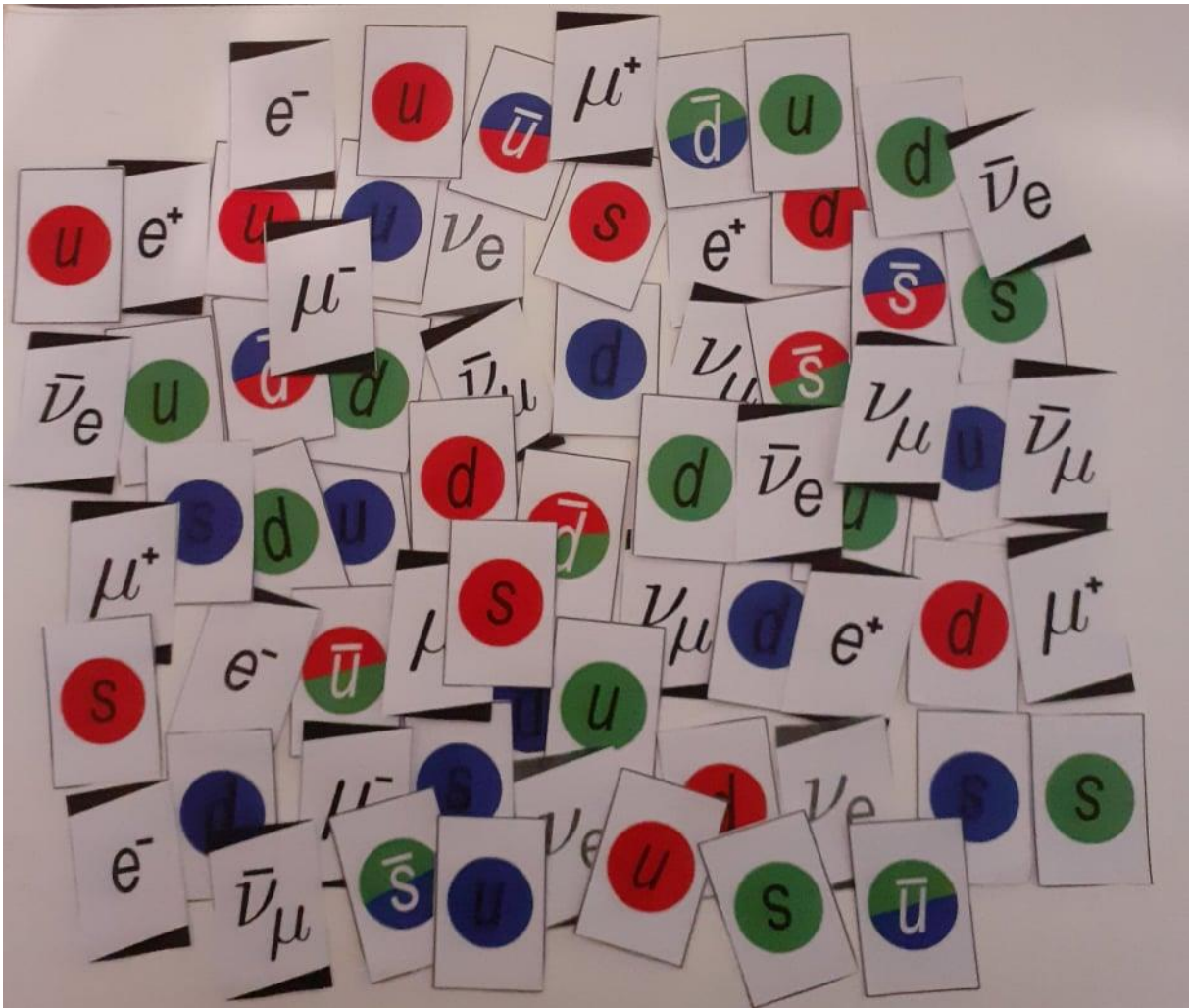
U ovoj igri, igrači mogu upoznati one elementarne čestice i antičestice koje su predstavljene kartama dobivenima u špilju te produbiti svoje znanje o njihovim osnovnim svojstvima - primjerice o električnom naboju leptona, kao i o bojama kvarkova.

Osim toga, igranjem ove igre može se naučiti mnogo toga o samom formiranju težih čestica u ranom svemiru, kao i u akceleratorima čestica. Igrači se tako susreću s pojmom kvark-gluonske plazme te vremenskom evolucijom kvarkova. Pritom se spominje i stvaranje parova čestica-antičestica (konkretno lepton-antilepton parova), kao i era hadronizacije, u kojoj se igrači bave stvaranjem i imenovanjem različitih hadrona, odnosno većih čestica koje su nastale iz različitih kvarkova! Postoje tri različite razine ove igre – početnički, srednji i napredni nivo, koji će svi biti navedeni i objašnjeni u nastavku.

### 4.2.1. Pravila i tijek igre

U ovoj igri može sudjelovati proizvoljan broj igrača, a koristi se svih 66 karata koje dolaze u špilju.[13] Na samom početku igre, potrebno je dobro izmiješati karte te ih sve postaviti na stol na hrpicu, tako da su sve karte licem okrenute prema igračima. Primjer za tako posloženu početnu kombinaciju izmiješanih karata nalazi se na sljedećoj slici:

<sup>47</sup> Slika je preuzeta iz [13].



Slika 29- Primjer početne formacije karata u igri "Kvarkovska tvar"

Tako postavljene karte predstavljaju početnu formaciju elementarnih čestica, koja se može usporediti sa stvarnim česticama nastalim u sudarivačima čestica gdje je postignuto da se kvarkovi nalaze u stanju takozvane kvarkovsko-gluonske plazme.[13]

Budući da neutrini slobodno mogu napustiti plazmu (zbog svojeg slabog međudjelovanja sa ostalim česticama) igrači započinju igru odvajanjem svih neutrina ( $\nu_e$  i  $\nu_\mu$ ), kao i antineutrina ( $\bar{\nu}_e$  i  $\bar{\nu}_\mu$ ), iz hrpice. U ovom dijelu igre, ne dodjeljuju se nikakvi bodovi, tako da igrači primjerice jedan po jedan mogu uzimati različite neutrine i antineutrine (te ih pritom i imenovati ako to znaju), do trenutka kada na hrpi ne preostanu samo kvarkovi, mioni i elektroni, kao i njihove antičestice.[13]

U drugoj fazi igre, uzimaju se u obzir uvjeti koji uzrokuju stvaranje parova leptona i antileptona, koji su uzrokovani visokom početnom temperaturom kvarkovsko-gluonske plazme. Zbog toga što nastali parovi leptona i antileptona ne osjećaju jaku interakciju, i oni

potom napuštaju kvark-gluonsku plazmu. U ovom dijelu igre, igrači dakle moraju tražiti odgovarajuće parove leptona i njegovog vlastitog antileptona, (konkretno parove karata  $e^-$  i  $e^+$  te  $\mu^-$  i  $\mu^+$ ), koje potom uzimaju iz hrpe.[13]

U posljednjem dijelu igre, igrači dolaze do stanja hadronizacije. U ovoj fazi se od kvarkova i anti-kvarkova iz kvark-gluonske plazme formiraju hadroni.[13] Igrači simuliraju hadronizaciju tako što od preostalih karata sa hrpe formiraju odgovarajuće barione, antibarione ili mezone, dok ih sve ne iskoriste.

Zanimljivo je to da, neovisno o različitim kombinacijama hadrona koje igrači sastave, na kraju igre svi kvarkovi sa hrpe moraju nestati ako su korištene sve karte iz špila, te ako su formirani važeći hadroni i validni parovi leptona i antileptona.[13] Dakle, ako i unatoč svemu tome na stolu preostane neka nesparena karta ili više njih, to je siguran znak da je barem jedan od igrača varao!

Kao što je prethodno spomenuto, igra „*Kvarkovska tvar*“ može se igrati na tri različita načina, ovisno o stupnju predznanja igrača. Postoje tri razine igre – početnička, srednja i napredna, a u nastavku slijedi opis svake od njih:

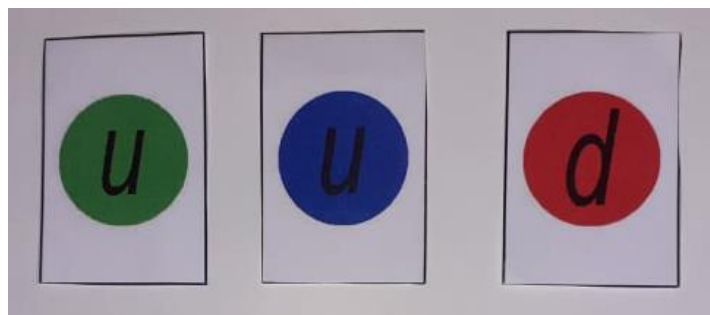
- RAZINA 1 – POČETNIČKA RAZINA

Prva razina je najjednostavnija te je zbog toga predviđena za početnike.[13] Pretpostavlja se da igrači pri ovoj razini ne znaju sami navoditi imena različitih hadrona koje formiraju od kvarkova u posljednjoj fazi igre. Međutim, igrači bi trebali poznavati imena svih čestica i antičestica koje su predstavljene kartama.

Na taj način u prvom i drugom dijelu igre, igrači moraju imenovati različite neutrine, a zatim i parove leptona i antileptona koje uzimaju sa hrpe.[13] Igrači pritom prate određeni dogovoreni redosljed (primjerice u smjeru kazaljke na satu), pri čemu igrač koji dođe na red mora uzeti odgovarajući neutrino ili antineutrino (u prvoj fazi igre), ili odgovarajući leptonski –antileptonski par (u drugoj fazi igre).

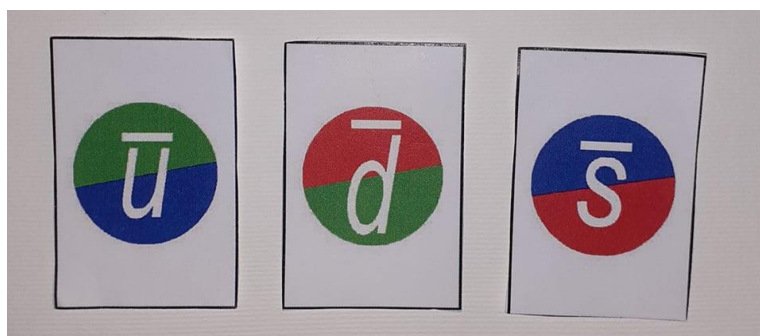
U posljednjem dijelu igre, igrači od kvarkova sastavljaju različite kombinacije, odnosno hadrone, pri čemu treba obratiti pažnju na određena pravila prilikom njihovog formiranja. Pritom igrači ne moraju znati imena nastalih hadrona.[13], već moraju poštivati samo sljedeća pravila:

1. Mogu se bilo kombinirati bilo koja tri kvarka koji su svi različitih boja; dakle bilo koji crveni, bilo koji zeleni i bilo koji plavi kvark.[13] Skupine takvih karata predstavljaju *barione*, odnosno čestice koje su sastavljene od tri kvarka različitih boja. Primjer jedne važeće kombinacije karata; dakle primjer jednog bariona nalazi se na sljedećoj slici:



Slika 30 - Moguća kombinacija karata koja predstavlja valjani barion

2. Moguće je kombinirati i bilo koja tri antikvarka koji su svi različitih anti-boja; dakle bilo koji anti-zeleni, bilo koji anticrveni i bilo koji antiplavi kvark.[13] Skupine od tri takve karte predstavljaju *antibarione*, odnosno antičestice koje su sastavljene od tri antikvarka različitih antiboja. Primjer za takvu kombinaciju karata prikazan je na slici u nastavku:



Slika 31- Moguća kombinacija karata koja predstavlja validni antibarion

Dakle, u ovom konkretnom primjeru vidimo da se radi o kombinaciji anticrvenog  $u$  antikvarka, antiplavog  $d$  antikvarka, te antizelenog  $s$  antikvarka.

3. Moguća je i kombinacija bilo kojeg kvarka sa bilo kojim antikvarkom, ali samo onda kada su dvije karte takve da se na njima nalaze tri različite boje.[13] Tako nastale čestice, koje se sastoje od kvarka jedne boje i antikvarka iste „antiboje“ koje nazivaju se *mezoni*. Na slici u nastavku može se vidjeti par karata koji predstavlja primjer jednog mezona, koji je sastavljen od zelenog  $s$  i antizelenog  $d$  antikvarka.



Slika 32- Moguća kombinacija karata koja predstavlja validni mezon

Ova pravila mogu se uz malo zaključivanja o različitim kombinacijama „spojiti“ u jedno.

Naime, jednostavnije rečeno, u ovoj fazi igre mogu se slagati bilo koje kombinacije od tri kvarka, ili parovi kvarka i antikvarka, tako da su u parovima ili u trojkama karata zastupljene sve tri boje! To svojstvo hadrona (mezona ili bariona) naziva se *neutralnost u boji*.<sup>48</sup> Također, kod sastavljanja antibariona, treba paziti samo na to da su u takvim trojkama karata zastupljene sve moguće različite kombinacije antiboja.

Dakle, u posljednjoj fazi igre, igrači određenim dogovorenim redoslijedom (primjerice u smjeru kazaljke na satu) sastavljaju validne hadrone, dok se ne „potroše“ sve karte na stolu!

Na ovoj razini igre nema dodjeljivanja bodova, pa samim time niti pobjednika[13], ali ako pojedini igrač pogrešno imenuje neku od karata, ili ako ne uspije sastaviti validan hadron, može se uvesti pravilo da ga ostali igrači moraju na to upozoriti!

- RAZINA 2 – SREDNJA RAZINA

Cilj ove razine igre je da se igrači upoznaju sa različitim imenima hadrona. [13] Prva i druga faza igre jednake su kao i kod osnovne razine. U posljednjoj fazi igre, dakle kod formiranja hadrona, potrebno je opet formirati odgovarajuće mezone i barione, prema pravilima koja su prethodno objašnjena u početničkoj razini. Međutim, igrači se prilikom sastavljanja hadrona moraju koristiti tablicama u kojima su navedeni nazivi različitih mezona i bariona.[13] (Radi se o tablicama Tablica 25 i Tablica 26 u poglavlju 7.2.)

Igrači jedan po jedan sastavljaju odgovarajuće hadrone, prateći dogovoreni redoslijed (primjerice smjer kazaljke na satu). Međutim, svaki put kada igrač sastavi barion, antibarion ili mezon, on mora pogledati u tablice i imenovati hadron kojeg je sastavio. Pritom njegovi suigrači i sami provjeravaju je li igrač izrekao ispravan naziv hadrona.[13]

---

<sup>48</sup> O bojama kvarkova te formiranju neutralnih hadrona bilo je riječi u poglavlju 3.2.2.

U slučaju da igrač nije formirao valjani hadron, ili ako je sastavio valjani hadron, ali ga nije ispravno imenovao, on mora vratiti uzete karte natrag na hrpu, te mora ponovno čekati dok ne dođe na red kako bi pokušao ponovno.[13]

Kao i u osnovnoj razini igre, igra traje dok se sve karte ne iskoriste.

Obzirom na to da je cilj ove razine igre da se igrači upoznaju s različitim imenima bariona i mezona, niti u ovom dijelu igre nema pobjednika. Međutim, svakako je poželjno da igrači što manje griješe prilikom slaganja i imenovanja hadrona, jer će se tada vrlo vjerojatno dogoditi da će ih njihovi suigrači upozoriti na pogrešku!

- RAZINA 3 – NAPREDNA RAZINA

Pretpostavlja se da igrači pri ovoj razini znaju imenovati parove leptona i antileptona, kao i mnogo različitih hadrona; dakle većinu (ili čak i sve) mezone i barione koje navode Tablica 25 i Tablica 26. Naime, na ovoj razini nije dopušteno gledanje u navedene tablice kod formiranja hadrona.[13]

Igrači prvo sa hrpe uklanjaju neutrine i antineutrine, kao i u prethodnim dvjema razinama. Međutim, nakon što se sa hrpe uklone svi neutriini i njihove antičestice, igrači više ne sastavljaju složenije čestice prateći dogovoreni redoslijed, već kreće „utrka“ u sastavljanju—svaki igrač sa hrpe tada uzima (što brže može) odjednom po tri ili dvije karte, formirajući odgovarajuće lepton-antilepton parove, mezone, barione ili antibarione.

Sakupljene parove ili trojke karata igrači stavljaju ispred sebe, licem prema gore. Nakon što se pokupe sve karte sa početne hrpe, igrači redom pokazuju i imenuju koje su sve hadrone i kombinacije leptona i antileptona sakupili. Pritom za svaku točno sastavljenu i ispravno imenovanu česticu igrači dobivaju bodove.[13]

Bodovi se dodjeljuju na sljedeći način:

<i>SKUPINA KARATA</i>	<i>BROJ BODOVA</i>
<i>Lepton + odgovarajući antilepton</i>	2
<i>Mezon</i>	2
<i>Barion ili antibarion</i>	3

Tablica 13 - Princip dodjeljivanja bodova<sup>49</sup>

<sup>49</sup> Princip dodjeljivanja bodova preuzet je iz [13].



S obzirom na to da je broj bodova jednak broju karata za pojedini sastavljeni par ili triplet, igrači mogu jednostavno na kraju igre prebrojati koliko karata je tko skupio te ovisno o tom broju svakome dodijeliti i toliki broj bodova.[13]

Dakako, pobjednik je onaj igrač koji sakupi najviše bodova![13]

#### **4.2.2. Za koga je namijenjena igra „KVARKOVSKA TVAR“?**

Autori igre navode kako, jednako kao i igru „*ANTT*“, ovu igru mogu naučiti igrati i čak djeca predškolske dobi, uz određene simplifikacije.

Budući da djeca ove dobi (uglavnom) ne znaju čitati, ne treba ih zamarati sa nazivima različitih elementarnih čestica, niti sa kompliciranom fizikalnom pozadinom igre, ali ono što ova djeca mogu savladati jest srž ideje o neutralnosti hadrona.[13]

Naime, budući da djeca predškolske dobi znaju raspoznavati boje, oni mogu igrati igru u kojoj će se koristiti samo kvarkovi izmiješani na hrpu, koje onda oni moraju povezati u skupine od tri karte različitih boja (koje zapravo predstavljaju barione), ili od dvije karte koje su takve da se na njima nalaze tri moguće boje (što odgovara kartama koje predstavljaju kvark i antikvark koji mogu tvoriti mezone.)

Postepeno se u igru mogu uključiti i leptoni, tako da djeca mogu savladati osnovna pravila igre. Naime, iako djeca vrtičke dobi ne mogu pročitati i identificirati nazive ovih simbola, oni mogu uočiti da se određeni znakovi na kartama ponavljaju, pa tako mogu na početku igre ukloniti sve karte koje predstavljaju neutrine, a kasnije i pokušati povezati parove elektrona i pozitrona, kao i miona i antimiona, na osnovi njihovih izgleda, budući da se radi o kartama čiji su simboli jednaki, ali sa suprotnim predznakom.[13]

Za djecu u ranijim razredima osnovne škole (od 7-10 godina), ova igra ne bi trebala predstavljati problem, budući da su oni u stanju identificirati različite simbole, kao i razlikovati karte koje predstavljaju čestice od onih koje predstavljaju antičestice.

Starija djeca, koja već počinju učiti kemiju i fiziku, kao i srednjoškolci, igranjem ove igre mogu naučiti i mnogo toga o fizici elementarnih čestica – o samim vrstama elementarnih čestica, formiranju parova čestica i antičestica te o nastajanju i imenovanju bariona i mezona. Na primjer, djecu u osnovnoj školi kojima su poznati pojmovi atoma, elektrona i protona, moguće je igranjem ove igre naučiti i o tome što su kvarkovi i leptoni, koliki je njihov naboj, te ih naučiti da od različitih obojenih  $u$  i  $d$  kvarkova formiraju proton i

neutron.[13] Nakon toga, može im se uvesti i koncept hadrona – bariona i mezona, kao i osnovna pravila njihovog sastavljanja (neutralnost u boji, vrsta i broj (anti)kvarkova).

Ako se u igru uključi i učitelj koji bi im na prikladan način pojasnio značenje različitih dijelova igre u vremenskoj evoluciji kvarkovsko-gluonske plazme, igranjem ove igre učenici srednjih škola bi mogli naučiti osnovna svojstva kvarkovsko-gluonske plazme, kao i upoznati se sa procesima koji odgovaraju zbivanjima u vrlo ranom svemiru!

Zanimljiva je i činjenica da se baš ova igra pokazala i kao najlakša i najprikladnija igra s kojom bi se mogli upoznati ljudi stariji od 18 godina koji su laici što se tiče fizikalnog predznanja.[13] Iako su pravila igre prilično jednostavna, njenim igranjem tako se dobiva uvid u svijet elementarnih čestica i eksperimentalne fizike visokih energija.

Jedan od koautora ove igre, znanstvenik Tamás Csörgő izjavio je kako je ova igra njemu i najdraža od svih, „*jer je najuže povezana sa RHIC<sup>50</sup> fizikom*“, kojom se on i inače bavi.[26]

U naprednijim razinama ove igre, zanimljivo je to što brzina uočavanja i sakupljanja odgovarajućih karata postaje presudna, čineći igru dinamičnom i nepredvidivom. Što se toga tiče, Csörgő je naveo i da je, u svojem iskustvu u igranju ovih igara sa ljudima različitih dobnih skupina, uočio da su „*Na početničkoj razini studenti obično brži i uspješniji igrači od fizičara!*“ [26]

#### ***4.2.3. Fizikalna pozadina igre – O kvark-gluonskoj plazmi, akceleratorima čestica i fizici ranog svemira***

Kao što je već rečeno, redosljed poteza u igri prati stvarnu vremensku evoluciju čestica u kvark-gluonskoj plazmi, koja se može proučavati modernim detektorima i ubrzivačima čestica pri visokim energijama. Prema današnjim spoznajama, upravo takva kvark-gluonska plazma pruža i „pogled“ u prošlost, odnosno u svemir starosti manje od jedne sekunde, a više o svemu tome može se pročitati u ovom potpoglavlju.

##### ***4.2.3.1. Od Velikog praska do svemira mlađeg od $10^{-34}$ sekundi***

Kako bi se objasnila i protumačila vremenska evolucija kvarkovsko-gluonske plazme, potrebno je krenuti ni manje ni više nego od nastanka samog svemira!

U današnje vrijeme, najpopularnija teorija o postanku svemira jest teorija „Velikog praska“. Radi se o relativno „mladoj“ teoriji; naime početci te teorije sežu u 1965. godinu, kada su

---

<sup>50</sup> RHIC je kratica za „Relativistic Heavy Ion Collider“ (engl. Relativistički teški ionski sudarivač“) koji se nalazi u Brookhavenovom laboratoriju.

znanstvenici A.Penzias i R.Wilson detektirali do tada nepoznati signal. Ono što je bilo zanimljivo i specifično za taj signal, bila je činjenica kako je utvrđeno da on na Zemlju dolazi podjednako iz svih smjerova, poput nekog pozadinskog zračenja. Znanstvenike je takvo otkriće podsjetilo na predviđanje Geoga Gamowa, koji je 1948. godine izjavio da trenutno stanje svemira „podsjeća na stanje nakon eksplozije“, te je predvidio postojanje pozadinskog zračenja, koje bi trebalo pokazivati spektar crnog tijela. Za pozadinsko zračenje otkriveno 1965. godine otkriveno je da pripada spektru mikrovalnog zračenja, te da ono uistinu i pokazuje spektar crnog tijela temperature 3.5 K. Slaganje izmjenjenog spektra sa spektrom crnog tijela je potvrđeno satelitskim mjerenjima COBE (1992) i WMAP.[27]

Iz takvih opažanja i rezultata razvila se teorija „Velikog praska“, koja tumači da se početak samog svemira može poistovjetiti sa „eksplozijom“ u početnom trenutku njegova nastanka, u kojoj su nastali sam prostor i vrijeme, kao i materija i energija. Teorija predviđa da je u tom trenutku gustoća i temperatura svemira bila beskonačna, a ukupna masa i energija bila je sakupljena u točku volumena nula, koju zovemo točkom kozmičke singularnosti.

Prema toj teoriji, nakon početne eksplozije, prostor se počeo širiti, a to širenje nastavlja se sve do danas, što potvrđuje prethodno spomenuto detektirano pozadinsko zračenje.

Procjenjuje se da se „Veliki prasak“ dogodio prije približno 13,8 milijardi godina. Međutim, događaji koji su se odvijali u svemiru od samog trenutka Velikog praska, pa do otprilike  $10^{-44}$  sekundi nakon njegova nastanka su izvan domašaja današnje znanosti.<sup>51</sup>

Međutim, teorija Velikog praska dovela je do mnogobrojnih predviđanja i zaključaka o tome kako je svemir izgledao u trenucima nakon prvih  $10^{-44}$  sekundi od njegova nastanka. Širenjem prostora, temperatura svemira se smanjivala i materija se razrjeđivala, te je tako on od vrućeg i homogenog svemira evoluirao do današnjeg „hladnog“ svemira u kojem postoje mnogobrojne galaksije, planeti, i život.

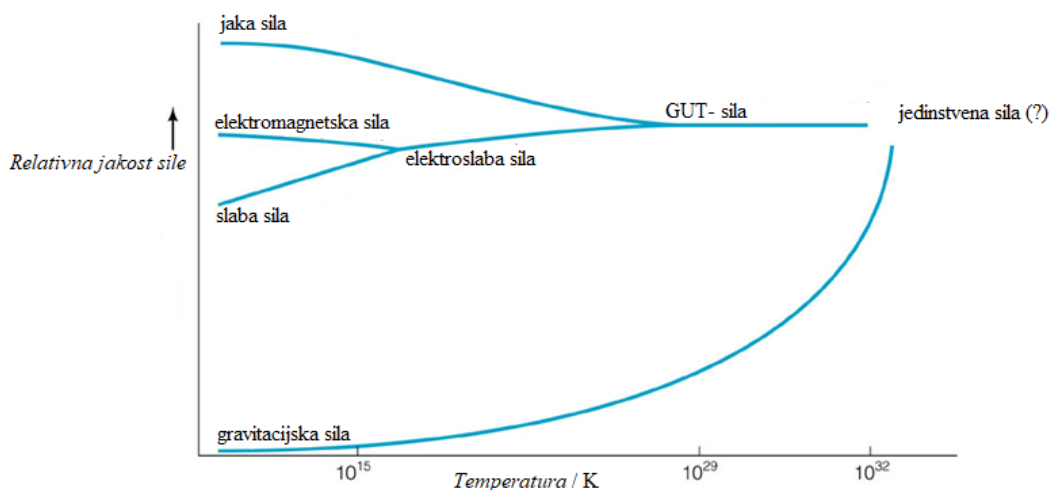
---

<sup>51</sup> Procesi koji su se događali prije tog vremena ne mogu se predvidjeti uz današnje poznavanje fizike, zbog činjenice da Einsteinova opća teorija relativnosti ne funkcionira za sustave manje od tzv. Planckove udaljenosti (koja iznosi  $10^{-35}$  metara) i za događaje koji traju kraće od tzv. Planckovog vremena (koje iznosi  $10^{-44}$  sekundi).[28] O stanju svemira prije tog vremena doduše postoje brojne teorije. Primjerice: „Teorija struna tvrdi da je Svemir imao 10 dimenzija tijekom Planckove ere (zamišljamo tih dodatnih 6 dimenzija kao veoma, veoma malene hipersferne dimenzije između prostora koji se nalazi između elementarnih čestica, 4 velike dimenzije i 6 malih dimenzija). Tijekom Planckove ere, Svemir se najbolje može opisati kao kvantna smjesa (pjena) sa 10 dimenzija koja sadrži crne rupe dimenzije Planckove dužine koje se stvaraju i poništavaju (ukidaju) bez nekog uzroka ili posljedice. Drugim riječima, ne pokušavajte ovu eru zamišljati u uobičajenim terminima!“[29]

Ono što danas većina fizičara smatra najvjerojatnijom opcijom je činjenica da je u veoma ranom svemiru, zbog visokih temperaturnih uvjeta (a proporcionalno tome i visokih energija), postojala mogućnost za interakcije među česticama koje se uvelike razlikuju od današnjih, i koje nije moguće niti simulirati u današnjim laboratorijima.

U trenutcima u kojima je energija svemira iznosila otprilike  $10^{15}$  GeV, prema Teoriji Velikog Ujedinjenja (engl. GUT- Grand Unification Theory) smatra se da su elektromagnetsko, jako i slabo međudjelovanje bili ujedinjeni u jednu zasebnu (GUT) silu. U tom trenutku, svemir je bio star svega oko  $10^{-34}$  s, a njegova temperatura iznosila je oko  $10^{27}$  kelvina.[30][31]

Također, mnogo teorija predviđa i postojanje jedinstvene sile u još ranijim trenutcima nakon Velikog praska, kada je energija svemira iznosila otprilike  $10^{19}$  GeV. Takva jedinstvena sila obuhvaćala je sve četiri danas poznate temeljne sile.[7]



Slika 33- Graf relativne jakosti sile u ovisnosti o temperaturi<sup>52</sup>

Na Slici 33 vidljivo je kako se, povećanjem temperature (a samim time i energije koja je proporcionalna s temperaturom) različite sile „ujedinjuju“, odnosno postaju sve sličnije.

Pomoću današnjih modernih akceleratora čestica, omogućen je detaljan uvid u ujedinjenu elektroslabu silu, ali ne i u GUT i jedinstvenu silu, jer toliko visoke energije nemoguće je postići u današnjim uvjetima. Međutim, eksperimenti su pokazali da se jakost jake sile

<sup>52</sup> Graf je izrađen prema grafu preuzetom iz [32].

smanjuje sa povećanjem energije, što ide u prilog pretpostavci da bi pri višim energijama jakost jake i elektroslabe sile trebala biti približno jednaka.[33]

Smatra se kako je interakcija velikog ujedinjenja, koja je nosila veliku energiju, u kombinaciji sa različitim fluktuacijama uzrokovala veoma ubrzano širenje, odnosno inflaciju svemira.

*„Da bi si dočarali o kakvom je golemom rastu riječ, usporedimo to s povećanjem dimenzija protona ( $10^{-15}$  metara) na kuglu čija je veličina deset milijuna promjera sunčevog sustava u vremenu manjem od  $10^{-34}$  sekundi.“*[34]

Zamisao o postojanju sile velikog ujedinjenja je posebno privlačna zbog razloga što bi ona objasnila raspodjelu materije i antimaterije u današnjem svemiru. Naime, postojanje sile velikog ujedinjenja omogućilo bi „*stvaranje male asimetrije između antimaterije i materije. U kasnijim epohama će se najveći dio materije i antimaterije međusobno poništiti (anihilirati), a ova mala asimetrija<sup>53</sup> će uzrokovati da nešto materije preostane i izgradi danas poznati svemir.*“[34]

#### **4.2.3.2. Od svemira starog $10^{-34}$ sekundi do tri minute**

U trenutku kada je svemir bio star otprilike  $10^{-34}$  sekundi, njegova temperatura iznosila je oko  $10^{27}$  kelvina, te je došlo do razdvajanja jake sile od elektroslabe.[31] Zbog prevladavanja materije nad antimaterijom, u ovoj fazi svemira omogućeno je postojanje „stabilnih“ elementarnih čestica, koje se ne bi odmah anihilirale sa vlastitim antičesticama.

Vremenski period od otprilike  $10^{-36}$  pa do  $10^{-6}$  sekundi nakon Velikog praska naziva se i „*kvarkovska epoha*“.[35] U tom vremenskom intervalu, u odnosu na druge elementarne čestice, u svemiru su brojčano prevladavali kvarkovi (i antikvarkovi.)

Međutim, oni su bili gotovo slobodni, u smislu da se nisu vezali u skupine od dva ili tri kvarka kao što je danas slučaj, već su zajedno sa gluonima bili u stanju takozvane kvarkovsko-gluonske plazme.

Kao što je spomenuto u poglavlju 3.3.4, čestice izmjene za jaku silu nazivaju se gluoni. Oni se mogu zamisliti kao malene elastične trake između kvarkova. U tom slučaju, kada su kvarkovi veoma blizu jedan drugome, „traka“ nije zategnuta, a samim time je i jaka sila među kvarkovima veoma slaba. Upravo zbog takvih uvjeta je u ovoj fazi svemira postojala

---

<sup>53</sup> Navedeni proces u kojem iz prvotne simetrične situacije nastaje asimetrični, materijski svemir kakvog danas poznajemo stručno se naziva *bariogenezom*.

*kvarkovsko-gluonska plazma*. Kako su se s vremenom kvarkovi udaljavali (u kasnijim fazama svemira), jaka sila među njima postajala je jača, što možemo usporediti sa zatezanjem elastične trake.[36]

Kvarkovi i antikvarkovi u kvark-gluonskoj plazmi međusobno su mogli anihilirati<sup>54</sup>, a zbog asimetrije materije nad antimaterijom, preostao je „višak“ kvarkova.

Kada je svemir bio star otprilike  $10^{-10}$  sekundi, njegova je temperatura dosegla otprilike  $10^{15}$  K te je došlo do razdvajanja elektromagnetske i slabe sile, a u otprilike  $10^{-5}$  sekundi nakon Velikog praska, kada se temperatura svemira ohladila ispod 200 MeV, jaka sila postala je dovoljno snažna, pa su se preostali kvarkovi počeli vezati u složenije čestice- barione i mezone, od kojih su najbrojniji bili protoni i neutroni.[37]

Protoni i neutroni su u periodu od  $10^{-6}$  do 1 s nakon Velikog praska mogli raspadanjem prelaziti jedan u drugi, pri čemu su nastajali i odgovarajući leptoni i antileptoni, kao što su elektron i elektronski antineutrino, ili pozitron i elektronski neutrino.

*„No, dok se na temperaturi ispod  $10^{11}$  K protoni ubrajaju u "tvar", laki elektroni se u toj vrućoj zgusnutoj plazmi ponašaju kao "zračenje" i daju svoj udio termičkoj ravnoteži u kojoj uz fotone sudjeluju još i neutrini. Zbog takvog sudioništva leptona (elektrona i neutrina) ta se epoha naziva leptonskom. U takvoj kupelji na svaku milijardu fotona, elektrona ili neutrina, dolazi tek jedan proton ili neutron. Dok temperatura ne padne bitno ispod  $10^{11}$  kelvina protoni i neutroni u leptonskoj kupelji slobodno prelaze jedni u druge, pa ih ima isti broj.“* [37] Međutim, nakon prve sekunde od Velikog praska, kada se svemir ohladio na  $10^{10}$  K, proces raspada protona u neutron postao je nemoguć, zbog čega se koncentracija neutrona počela smanjivati u korist povećanja koncentracije protona.

Također, u ovom periodu, gustoća svemira smanjila se toliko da su neutrini, zbog svojeg slabog međudjelovanja, „prestali igrati aktivnu ulogu u održavanju termičke ravnoteže s elektronima, pozitronima i fotonima. Istodobno s takvim "zamrzavanjem" ("odvezivanjem") neutrina, sve više elektronsko-pozitronskih parova anihilacijom prelazi u fotone.“[38] Kada je svemir dosegao starost od otprilike 3 minute, njegova je temperatura pala na  $10^9$  K[38], a protoni i neutroni počeli su se, zbog jakog nuklearnog privlačenja, vezati u deutron! Samim time, osigurani su preduvjeti za nastajanje jezgara različitih elemenata, od kojih je najveći broj bio onih najlakših (jezgara vodika – protona, i jezgara helija – alfa čestica). Te

---

<sup>54</sup> O procesu anihilacije može se pročitati u poglavlju 4.1.4.2.

jezgre su se, otprilike milijun godina kasnije, uspjele vezati sa elektronima u neutralne atome, koji su, zbog gravitacijskog privlačenja, mogli formirati zvijezde u kojima je procesom fuzije bilo omogućeno stvaranje težih elemenata.

#### 4.2.3.3. *Pogled u fiziku ranog svemira pomoću sudarivača i ubrzivača čestica*

*„Ako vas zanimaju svojstva svemira starog nekoliko mikrosekundi, najbolji način da ih proučite nije izgradnja teleskopa, već izgradnja akceleratora“ - Krishnua Rajagopal, teorijski fizičar koji se na sveučilištu MIT bavi proučavanjem kvark-gluonske plazme.[39]*

Kako bi se ispitalo stanje svemira mlađeg od nekoliko minuta, bilo je potrebno, osim znanja o elementarnim česticama, razviti i uređaje koji bi mogli postići uvjete visoke energije i temperature, i samim time simulirati „rani svemir“. Uređaji koji nam to omogućuju su sudarivači i ubrzivači (akceleratori) čestica, od kojih je najpoznatiji, najsnažniji i najveći Veliki hadronski sudarivač (engl. The Large Hadron Collider, LHC) u Genevi.

Kako bi se rekreirali uvjeti kvarkovsko-gluonske plazme, u akceleratorima se izvode frontalni sudari masivnih iona, primjerice jezgara zlata ili olova, koje sadrže stotine protona i neutrona. Jezgre se sudaraju pri energijama većima od nekoliko bilijuna elektronvolta.[40]

Upravo se 2005. godine u Brookhavenovom „Relativističkom teškom ionskom sudarivaču“ sudaranjem atoma zlata prvi put postigla takva kvarkovsko-gluonska plazma.[41]

Do 2010. godine, utvrđeno je da je početna temperatura takve kvarkovsko-gluonske plazme iznosila otprilike 4 bilijuna Celzijevih stupnjeva, što je otprilike 250 000 puta veće od temperature u Sunčevom središtu.[42] Ova temperatura je 2012. godine zauzela i Guinnessov rekord kao najviša temperatura koji su ljudi ikad uspjeli proizvesti.[43]

U igri „*Kvarkovska tvar*“ početna formacija karata na stolu predstavlja leptone i antileptone zajedno sa kvarkovima i antikvarkovima koji se nalaze u stanju kvark-gluonske plazme, a različite faze igre prate vremensku evoluciju navedenih čestica koja je ekvivalentna njihovom detektiranom ponašanju u eksperimentima s kvark-gluonskom plazmom (što je opet ekvivalentno sa stanjem u ranom svemiru).

O samim svojstvima kvarkovske tvari, poput njenog svojstva ukupne boje i okusa kao i ukupnog barionskog broja, o nenoj gustoći entropije kao i o opisu savršenog kvarkovskog fluida može se saznati više u poglavlju 4.9.2. u kojem se navedena svojstva uspoređuju sa modelom Rubikove kocke na kojem pojedini dijelovi kocke odgovaraju kvarkovima i antikvarkovima!

### **4.3. Igra „DETEKTIRAJMO!“**

Ova igra namijenjena je za dva igrača. Cilj igre je „detekcija“, odnosno sastavljanje različitih raspada. Ovisno o sastavljenim raspadima, svaki igrač dobiva određen broj bodova, a pobjednik je onaj igrač koji prvi skupi 21 bod![13]

#### **4.3.1. Pravila i tijek igre**

Igrači su postavljeni jedan nasuprot drugoga. Prije početka igre, potrebno je dobro promiješati karte (koristi se svih 66 karata iz špila). Nakon što su karte dobro promiješane, svaki igrač dobiva polovicu špila.[13] Karte su okrenute licem prema dolje, tako da igrači ne mogu odmah vidjeti koje se točno karte nalaze u njihovim špilovima (jednako kao i kod igre „ANTI“).

Ova igra se igra u „rundama“ od kojih svaka runda započinje tako da svaki igrač iz svog špila uzima redom pet karata, koje postavlja na stol tako da su karte okrenute licem prema gore. Na taj način, na početku svake runde se na stolu formira skupina od deset karata te oba igrača mogu vidjeti svoje karte, kao i karte suparnika.[13]

Korištenjem tih deset karata, igrači mogu formirati različite raspade ili dijelove raspada. U ovoj igri važna je brzina, jer u svakoj rundi samo jedan igrač može dobiti priliku za sastavljanje raspada ili nekog njegovog dijela.[13] Naime, na početku svake runde, onaj igrač koji prvi dotakne bilo koju od karata na stolu preuzima inicijativu, čime dobiva pravo da u toj rundi samo on uzima karte sa stola. Onaj igrač koji dobije to pravo u pojedinoj rundi, mora uzeti sa hrpe i točno imenovati barem *dvije* komponente (čestice) koje sudjeluju u pojedinom raspadu, formirajući tako cijeli raspad ili jedan njegov dio. Sakupljene karte igrači ostavljaju na posebnom mjestu ispred sebe kojeg su predvidjeli za sastavljanje određenog raspada.[13]

Nakon što pojedini igrač završi sa svojim potezom (odnosno sakupljanjem karata), oba igrača vraćaju preostale karte koje su ostale na hrpi (ako ih ima) natrag u svoje špilove, koje potom dobro promiješaju, nakon čega slijedi iduća runda.

Ako se dogodi situacija da igrač koji je prvi dotaknuo karte na početku runde ne može formirati cijeli raspad ili jedan dio određenog raspada (od minimalno dvije komponente), niti može nastaviti slaganje nekog od svojih prethodno složenih dijelova raspada, taj igrač *gubi* 1 bod nakon svake *druge* takve situacije.[13] Na taj način se sankcioniraju igrači koji svaki put žure preuzeti inicijativu za sakupljanjem karata bez prethodnog promišljanja.

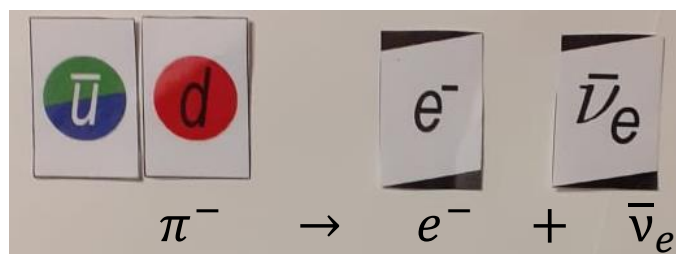


Ako u pojedinoj rundi nakon nekoliko sekundi niti jedan igrač ne preuzme inicijativu doticanjem karata na hrpi, igrači uzimaju natrag karte koje su postavili na hrpu, te ih vraćaju natrag u svoj špil kojeg potom dobro promiješaju, nakon čega kreće nova runda.[13] U tablici u nastavku prikazani su različiti mogući raspadi koje igrači mogu slagati korištenjem karata u špil, kao i broj bodova koji donosi svaki od tih raspada kada ga se sastavi do kraja. Kao što je već prethodno napomenuto, pobjednik je onaj igrač koji prvi skupi 21 bod!

RASPAD	BROJ BODOVA
$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$	7
$\pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$	7
$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$	7
$\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$	7
$K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$	7
$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$	7
$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$	7
$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$	7
$p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu_e$	14
$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$	14
$\Omega^- \rightarrow \Lambda^0 + K^-$	21
$\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \pi^-$	21

Tablica 14 - Mogući raspadi u igri „Detektirajmo!“<sup>55</sup>

Na sljedećoj slici prikazan je primjer raspada negativnog piona u igri. Kada se ovaj raspad uspije sastaviti do kraja, on za igrača donosi 7 bodova.



Slika 34 - Primjer raspada negativnog piona

Kao što je vidljivo iz primjera, igrači tijekom igre ne smiju zaboraviti na činjenicu da svaki barion ili mezon kojeg sastave moraju biti neutralni u boji!

Kako bi se dobio dodatan uvid u to kako bi konačno sastavljeni raspadi trebali izgledati i na što je pritom potrebno obratiti pažnju, u poglavlju 4.3.3 su navedena dva dodatna primjera koji objašnjavaju kako bi trebao izgledati raspad koji donosi 14 bodova, i raspad koji donosi 21 bod (pa samim time i automatsku pobjedu)!

<sup>55</sup> Tablica je napravljena prema tablici dostupnoj u [13].

#### 4.3.2. *Za koga je namijenjena igra „Detektirajmo!“?*

Zbog svoje složenosti, ova igra nije previđena za potpune početnike. Autori su napomenuli da je „razina igre napredna“ [13], što je i očito jer je za uspjeh u igri potrebno dobro predznanje iz različitih područja fizike.

Naime, potrebno je poznavati imena elementarnih četica i antičestica koje su prikazane kartama, kao i njihova temeljna svojstva, poput električnog naboja te leptonskog i barionskog broja. Također, potrebno je znati iz kvarkova formirati odgovarajuće hadrone tako da budu neutralni u boji. Budući da je kod konstrukcije raspada ključno dobro baratanje zakonima očuvanja, a samim time i poznavanje temeljnih sila i svojstava elementarnih čestica, igra nikako nije preporučljiva za mlađu djecu ili laike, ali je odlična za studente ili buduće profesore fizike, koji će u igri dodatno utvrditi svoje znanje o navedenim temama, kao i za znanstvenike ili ljude koji se profesionalno bave fizikom.

Međutim, smatram da se ova igra može na pojednostavljen način uvesti i kod ljudi koji nemaju toliko bogato predznanje. To pogotovo vrijedi kod učenika srednjih škola koji uče o zakonima očuvanja i o elementarnim česticama. Za njih bi moglo biti zanimljivo i korisno pokušati složiti jednostavnije raspade (one koji donose 7 bodova).

Primjerice, moglo bi se započeti samo sa leptonskim raspadima, koji su jednostavniji s obzirom na to da je barionski broj prije i nakon takvih raspada jednak nuli, te ne treba uzimati u obzir kvarkove i njihove boje. U tom slučaju, učenici bi pomoću karata koje predstavljaju različite leptone trebali sastaviti barem jedan valjani raspad. Pritom se mogu diskutirati različiti zakoni očuvanja- poput zakona očuvanja energije, električnog naboja i pojedinačnog leptonskog broja, kao i činjenica spomenuta u poglavlju 3.1.2 da su elektron, elektronski i mionski neutrino stabilni, a mion nestabilan. Cilj takve igre bio bi sastavljanje raspada miona ( $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ ) i antimiona ( $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ ).

Nakon svladavanja takvog izazova, moglo bi se prijeći i na raspade lakih mezona, poput pozitivnog i negativnog piona te pozitivnog i negativnog kaona (koji su navedeni u prvih šest redaka → Tablica 14). Prilikom pokušaja sastavljanja takvih raspada, učenici bi utvrdili i primijenili stečeno znanje o ranije spomenutim zakonima očuvanja, te bi nadogradili svoje znanje novim zakonom očuvanja – očuvanjem neutralnosti u boji.

Kasnije, kada se savladaju ovakva pojednostavljena pravila, igra se može nadograditi i sa drugim mogućim raspadima u kojima je potrebno paziti i dodatne zakone očuvanja (primjerice na zakon očuvanja barionskog broja), pri čemu se mogu spomenuti i Feynmanovi

dijagrami (u kojima će biti riječi u idućem poglavlju) koji opisuju vrstu interakcije koja je dovela do pojedinog raspada.

Budući da je za formiranje validnih raspada potrebno samo paziti na zakone očuvanja, ova igra je odlična za razvoj svijesti o tome da se radioaktivni raspad u školama ne bi trebali učiti „napamet“ i bez razumijevanja, već se dobiva pogled u samu njihovu srž (koja je dana zakonima očuvanja i Feynmanovim dijagramima).

#### 4.3.3. *Fizikalna pozadina igre – O raspadima čestica i zakonima očuvanja*

Kao što je spomenuto u poglavljima 2.2 i 3, određene elementarne čestice (poput miona i tau-leptona), kao i hadroni (primjerice  $\pi$ -mezoni) su nestabilni te se u veoma kratkom vremenu raspadaju na druge čestice.

Važno je znati da u prirodi postoje određena pravila i uvjeti koja određuju moguće produkte raspada. Na temelju takvih pravila, uvedeni su različiti univerzalni zakoni očuvanja, od kojih su na makroskopskim skalama prvi zapaženi zakon očuvanja ukupnog električnog naboja, zakon očuvanja ukupne energije i zakon očuvanja (kutne)količine gibanja zatvorenog sustava. Uzmimo za primjer hipotetske reakcije u kojima proton prelazi u neutron, i obratno, pri čemu ne postoji niti jedan drugi produkt raspada:

$$p^+ \rightarrow n^0 \quad \text{Jednadžba 4}$$

$$n^0 \rightarrow p^+ \quad \text{Jednadžba 5}$$

Ove jednadžbe narušavaju zakon očuvanja naboja, kao i zakon očuvanja energije i količine gibanja. Samim time, ovakve reakcije su zabranjene; one se ne mogu dogoditi niti jednom temeljnom interakcijom (niti njihovim kombinacijama).[44] Međutim, za mnoge od potencijalnih reakcija otkriveno je da se one u prirodi nikad NE događaju, iako ne narušavaju niti jedan od navedena tri zakona očuvanja. Primjerice, razmotrimo raspad protona:

$$p^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0 \quad \text{Jednadžba 6}$$

Vidljivo je kako je u ovoj reakciji očuvan ukupni električni naboj. Količina gibanja mogla bi biti očuvana ako pretpostavimo da su dva novonastala piona nakon nastanka krenula jednakim brzinama u suprotnim smjerovima, a zakon očuvanja energije mogao bi vrijediti ako pretpostavimo da je primjerice svaki pion nakon nastanka dobio ukupnu energiju jednaku polovini početne energije mirovanja protona. S obzirom na to da su sve od čestica

u ovakvom raspadu hadroni, ovakav raspad morao bi se dogoditi veoma brzo, za vrijeme od  $10^{-23}$  s. [45] Međutim, ovakav raspad se u prirodi nikad nije detektirao.<sup>56</sup>

Samim time, jasno je da postoje i neki drugi principi koji, na razini (skupina) elementarnih čestica određuju može li se pojedina reakcija dogoditi, ili ne. Na temelju njih određeni su različiti dodatni zakoni očuvanja koji moraju vrijediti prilikom spontanih raspada čestica, kao što su zakon očuvanja barionskog broja<sup>57</sup> i zakon očuvanja leptonskog broja<sup>58</sup>, za koje se pretpostavlja da vrijede u svim mogućim interakcijama.

Upravo zbog očuvanja barionskog broja, može se objasniti zašto je proces kojeg navodi Jednadžba 6 nemoguć. Naime, ukupni barionski broj prije raspada jedan je +1 (zbog toga što je proton barion), a nakon raspada ukupni barionski broj jednak je 0 (jer pozitivan i neutralni pion pripadaju skupini mezona, a ne bariona, pa je za svakog od njih barionski broj jednak nuli). Samim time, u ovakvom raspadu ukupni barionski broj ne bi bio očuvan, a zbog toga možemo biti sigurni i da se ovakav proces nikada ne bi mogao spontano dogoditi.

U različitim interakcijama očuvane su različite veličine, a osnovni pregled zakona očuvanja u fizici elementarnih čestica dan je u sljedećoj tablici<sup>59</sup>:

(✓ = veličina je očuvana, — = veličina nije relevantna za silu, ✗ = veličina nije očuvana.)

<i>Naziv veličine</i>	<i>Jaka interakcija</i>	<i>Elektromagnetska interakcija</i>	<i>Slaba interakcija</i>
<i>Količina gibanja</i>	✓	✓	✓
<i>Ukupna energija</i>	✓	✓	✓
<i>Kutna količina gibanja</i>	✓	✓	✓
<i>Električni naboj</i>	✓	✓	✓
<i>Okus kvarkova</i>	✓	✓	✗
<i>Leptonski broj (pojedine generacije)</i>	—	✓	✓
<i>Paritet</i>	✓	✓	✗
<i>Kvantni broj nabojne konjugacije</i>	✓	✓	✗
<i>Izotonski spin</i>	✓	✗	✗
<i>Barionski broj</i>	✓	✓	✓
<i>Stranost</i>	✓	✓	✗

<sup>56</sup> Štoviše, općenito nije detektiran bilo kakav spontani raspad protona! Prema današnjim fizikalnim saznanjima, za proton je predviđeno je vrijeme života od otprilike  $10^{31}$  godina, što je znatno veće od trenutne starosti svemira (otprilike  $4 \cdot 10^9$  godina).[45]

<sup>57</sup> Objašnjen u poglavlju 3.2.3

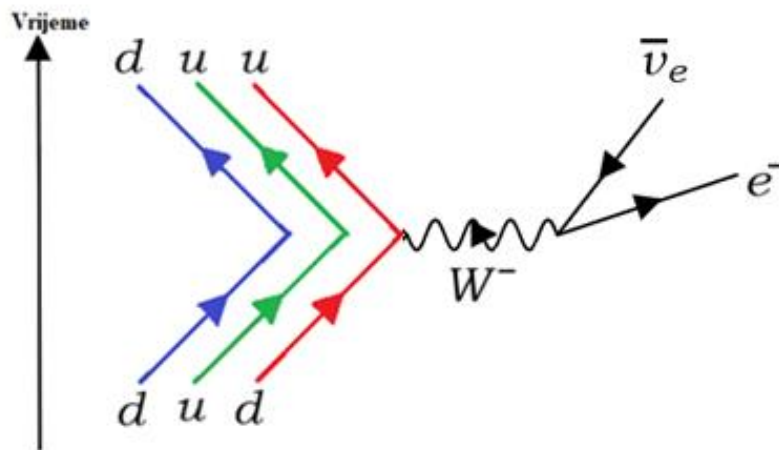
<sup>58</sup> Objašnjen u poglavlju 3.1.2

<sup>59</sup> Tablica je nastala po uzoru na tablicu iz [46] (stranica 322).

Tablica 15- Očuvanje veličina u fizici elementarnih čestica

Dakle, poznavanjem zakona očuvanja moguće je za pojedine reakcije, pa tako i raspade, odrediti jesu li oni mogući, i ako su mogući, o kojoj se vrsti međudjelovanja pritom može raditi. Svako međudjelovanje može se pritom prikladno prikazati Feynmanovim dijagramom.

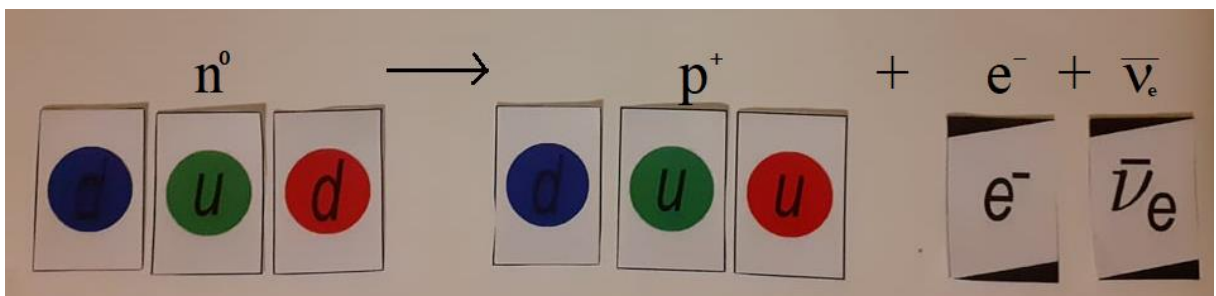
Primjerice, slobodni raspad neutrona  $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$  moguće je prikazati Feynmanovim dijagramom (Slika 10). Ako kod takvog raspada u obzir uzmemo i boje kvarkova, neutralnost u boji hadrona, kao i činjenicu da slaba sila ne može promijeniti boju kvarka, može se konstruirati sljedeći Feynmanov dijagram:



Slika 35 - Feynmanov dijagram raspada neutrona sa uključenim bojama kvarkova

Dakle, u ovom raspadu plavi  $d$  kvark kao i zeleni  $u$  kvark ostat će nepromijenjeni, a crveni  $d$  kvark će prijeći u crveni  $u$  kvark, zbog čega će novonastala čestica biti upravo proton!

Iz dijagrama je jasno da se ovaj raspad može prikazati pomoću karti iz špila na sljedeći način:

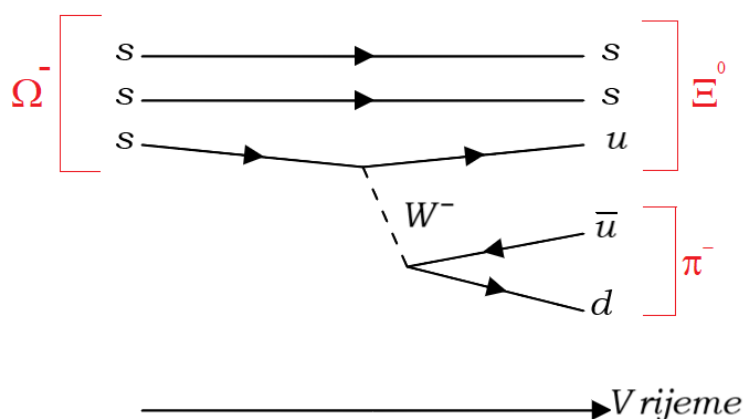


Slika 36- Raspad neutrona prikazan kartama

Kao još jedan primjer možemo uzeti „kompliciraniji“<sup>60</sup> raspad omega minus hadrona koji je naveden u posljednjem redu Tablice 14:

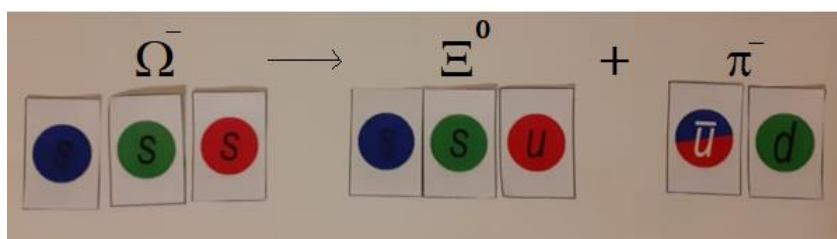
$$\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \pi^-$$

Promatranjem kvarkovskog sadržaja hadrona prije i poslije raspada, vidljivo je da ukupna stranost nije očuvana u ovom procesu.<sup>61</sup> Samim time, jasno je da se on može odvijati samo slabom interakcijom.<sup>62</sup> Dakle, Feynmanov dijagram takvog raspada izgledat će ovako:



Slika 37 - Feynmanov dijagram  $\Omega^-$  raspada

Kao što dijagram prikazuje, jedan s kvark u  $\Omega^-$  prešao je u u kvark, čime je nastao  $\Xi^0$  barion. Pritom je emitiran nestabilan  $W^-$  bozon koji se raspao na  $\bar{u}$  antikvark i d kvark, koji tvore novonastali  $\pi^-$  mezon. Ako se pritom uzmu u obzir i boje kvarkova, ovakav proces može se prikazati kartama na, primjerice, sljedeći način:



Slika 38- Raspad  $\Omega^-$  prikazan kartama

<sup>60</sup> Ovaj raspad (ako ga se ispravno složi) donosi 21 bod i automatsku pobjedu u igri „Detektirajmo“!

<sup>61</sup> Uzmemo li u obzir kvarkovski sadržaj navedenih hadrona dobivamo raspad oblika:  $sss \rightarrow uss + \bar{u}d$ ; ukupna stranost prije raspada = -3, a ukupna stranost nakon raspada = -2, pa je jasno da ona nije očuvana.

<sup>62</sup> Tablica 15.

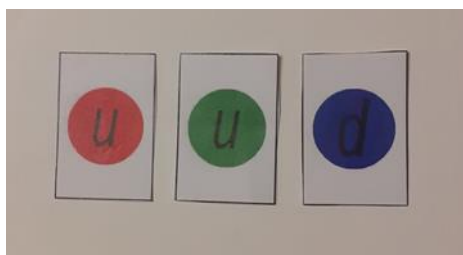
#### 4.4. Igra „KOZMIČKI PLJUSAK“

U ovoj igri može sudjelovati proizvoljan broj igrača, a cilj igre je sastavljanje što većeg i složenijeg „kozmičkog pljuska“.[13]

Tijekom igre, igrači konstruiraju „vlastiti kozmički pljusak“ po uzoru na stvarnu pojavu kozmičkih pljuskova u Zemljinoj atmosferi, poštujući pritom osnovne fizikalne zakone očuvanja poput zakona očuvanja električnog naboja, zakon očuvanja boje, kao i zakona očuvanja leptonskog i barionskog broja.

##### 4.4.1. Pravila i tijek igre

Igra započinje postavljanjem „kozmičkog protona“ na vrh stola.[13] Radi se dakle o kombinaciji  $u$ ,  $u$  i  $d$  kvarka koja mora biti neutralna u boji; odnosno svaka od karata mora biti različite boje. Primjer za jednu moguću kombinaciju karata koja predstavlja početni „kozmički proton“ nalazi se na slici u nastavku:



Slika 39- Primjer "kozmičkog protona" kojim se započinje igra „Kozmički pljusak“

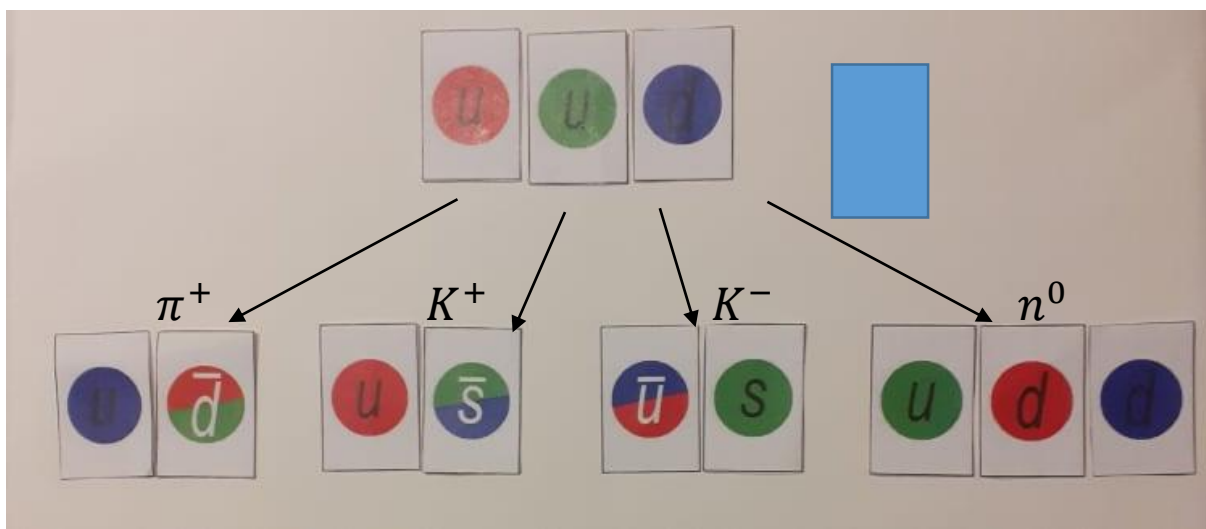
Tako postavljeni proton poistovjećuje se sa kozmičkim protonom veoma visoke energije, koji je upao u Zemljinu atmosferu te se sudario sa nekom od čestica u njoj, čime se počinje stvarati kozmički pljusak. Zamišljamo da ovaj proton ima toliko veliku energiju da u praksi, kada se sudari s atomima i molekulama u atmosferi, zbog gotovo neograničene ulazne energije može nastati ogromna lavina čestica![13]

Kako bi se označilo da je došlo do sudara sa nekim atomom ili molekulom u atmosferi, jedna od preostalih karata postavlja se pored kozmičkog protona.[13] Karta je okrenuta naopačke, što znači da igrači ne trebaju točno znati o kojem se atomu ili molekuli radi.

Ostatak špila potrebno je dobro promiješati, a potom ga staviti na stol. Igrači potom kreću sa konstruiranjem kozmičkog pljuska formiranjem sekundarnih čestica koje u njemu nastaju korištenjem ostalih karata iz špila koje se mogu postavljati u blizini početnog kozmičkog protona u različite „grane“ pljuska.[13]

Na početku je potrebno konstruirati prvu fazu pljuska, u kojoj je pomoću karata koje predstavljaju kvarkove i antikvarkove potrebno formirati različite hadrone.[13] Ovaj dio igre odgovara stvarnoj fizikalnoj pojavi početne faze kozmičkog pljuska, gdje se pri interakciji kozmičkih protona sa česticama u atmosferi formiraju raznolike čestice, od kojih su daleko najbrojniji hadroni. Dakle, u prvoj grani pljuska, igrači od kvarkova sastavljaju odgovarajuće hadrone - barione ili mezone te ih postavljaju na stol ispod početnog kozmičkog protona.

Primjer za jednu moguću opciju slaganja početnih grana nalazi se na sljedećoj slici<sup>63</sup>:



Slika 40 - Primjer slaganja prve faze kozmičkog pljuska, u kojoj nastaju različiti hadroni

Dakle, ovakav primjer opisuje slučaj kada se kozmički proton sudario s nekom nepoznatom neutralnom česticom ili atomom u atmosferi. Ta nepoznata čestica predstavljena je kartom okrenutom naopačke koja je označena plavom bojom na slici i nalazi se pored „kozmičkog protona“. Pri takvom sudaru su nastali različiti hadroni: pozitivan pion ( $\pi^+$ ), pozitivan i negativan kaon ( $K^+$  i  $K^-$ ) te neutron ( $n^0$ ), koji su svi predstavljeni odgovarajućim kartama u prvoj „grani“ kozmičkog pljuska. Broj „grana“ jednak je broju novonastalih hadrona, dakle u ovom slučaju radi se o četiri grane.

Nakon završenog slaganja početne faze kozmičkog pljuska, igrači nastavljaju sa formiranjem sljedećih grana. U konstrukciji daljnjih grana, sukladno stvarnoj propagaciji kozmičkog pljuska, mogu se slagati i različiti dozvoljeni raspadi novonastalih hadrona, u kojima također moraju vrijediti spomenuti zakoni očuvanja.[13] Pritom igrači mogu koristiti bilo koje kvarkove (koje je potrebno formirati u odgovarajuće hadrone) ili leptone, kao i njihove antičestice iz špila preostalih karata.

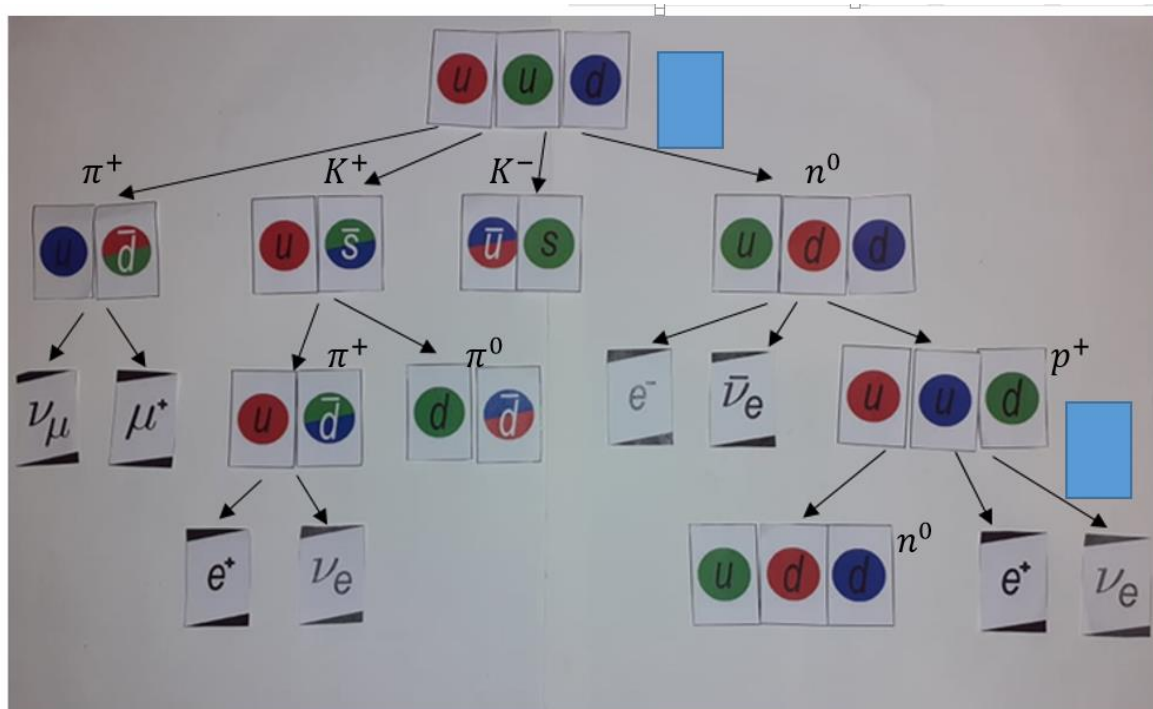
<sup>63</sup> Slika 40 je nastala po uzoru na sliku iz [13].



Ako je stvaranje novih grana moguće samo zbog interakcije sa nekom česticom iz atmosfere, igrači ponovno pored takvog grananja moraju postaviti kartu okrenutu naopačke, čime se sugerira i da pri takvoj interakciji može nastati par čestica-antičestica.[13]

Jednako kao i kod igre „Detektirajmo!“, pri konstrukciji raspada treba obratiti pažnju da tijekom raspada vrijede temeljni zakoni očuvanja. Dakle, mogući raspadi koji se pritom mogu dogoditi navedeni su prethodnom poglavlju (Tablica 14).

Primjer mogućeg razvoja igre i formiranja ostalih grana koje se nadovezuju na Sliku 40, odnosno finalna verzija jednog primjera „kozmičkog pljuska“ nalazi se u nastavku<sup>64</sup>:



Slika 41 – Primjer razvoja kozmičkog pljuska prikazanog kartama u igri<sup>65</sup>

Na slici je dakle vidljivo kako se pozitivni pion ( $\pi^+$ ) raspao na mionski neutrino ( $\nu_\mu$ ) i anti-mion ( $\mu^+$ ). Pozitivni kaon ( $K^+$ ) raspao se na pozitivni i neutralni pion ( $\pi^+$  i  $\pi^0$ ), nakon čega se tako nastali pozitivni pion raspao na pozitron ( $e^+$ ) i elektronski neutrino ( $\nu_e$ ). Neutron ( $n^0$ ) se raspao na proton ( $p^+$ ), elektron ( $e^-$ ), i elektronski antineutrino ( $\bar{\nu}_e$ ), nakon čega se novonastali proton u sudaru sa nekom česticom u atmosferi (što sugerira plava karta pored novonastalog protona) raspao na neutron ( $n^0$ ), pozitron ( $e^+$ ) i elektronski neutrino ( $\nu_e$ ).

<sup>64</sup> Slika 41 je nastala po uzoru na sliku iz [13].

<sup>65</sup> Slika 41 je nastala po uzoru na sliku iz [13].

U ovom primjeru kozmičkog pljuska, ukupan broj grana je 16. Kao što se može primijetiti, ukupan broj grana općenito je jednak broju „strelica“ na slici, odnosno broju leptona i hadrona koji su nastali u kozmičkom pljuskju!

Cilj igre je sastaviti što veći kozmički pljusak, odnosno pljusak sa što više grana.[13]

Pritom igrači mogu međusobno surađivati (što odgovara prvoj razini igre) ili se natjecati jedno protiv drugoga (što odgovara drugoj razini igre). Opis svake od razina naveden je u nastavku.

- RAZINA 1

Ova razina predviđena je za igrače koji se tek počinju upoznavati sa igrom „*Kozmički pljusak*“. Ideja ove razine je da igrači nauče i uvježbaju sastavljati što složenije primjere kozmičkih pljusakova, a paralelno s time i da unaprijede svoje znanje o zakonima očuvanja i različitim mogućim raspadima, kao i o samom razvoju kozmičkih pljusakova.

U ovoj razini, igrači međusobno *surađuju* u razvijanju kozmičkog pljuska, što znači da svaki igrač može dodavati vlastite grane, odnosno odgovarajuće hadrone i leptone u postojeći kozmički pljusak.[13] Pritom se moraju poštivati pravila slaganja karata koja su navedena u prethodnom poglavlju. S obzirom na to da igrači međusobno surađuju, ova razina igre nije natjecateljskog karaktera.

(Naravno, moguća je i verzija igre prilagođena samo jednom igraču, gdje igrač samostalno pokušava sastaviti kozmički pljusak sa što više grana.)

Kada se igrači uvježbaju sastavljati kozmičke pljusakove sa mnogo grana, mogu prijeći na iduću razinu igre u kojoj se mogu međusobno natjecati!

- RAZINA 2

U ovoj razini, nakon postavljanja početnog „kozmičkog protona“ na stol, potrebno je dobro izmiješati karte u špilju, nakon čega svaki igrač dobiva redom po pet karata iz špila.[13] Dobivene karte igrači drže u rukama, tako da ih samo oni mogu vidjeti. Ostatak špila okreće se licem prema dolje, tako da preostale karte u špilju nisu vidljive.

Potom kreće igra „na poteze“. Naime, ovisno o dogovorenom redosljedju (primjerice u smjeru kazaljke na satu), igrači jedan po jedan dolaze na red za sastavljanje grana u pljuskju. Kada određeni igrač dođe na red, on izvlači jednu novu kartu iz ostatka špila te potom može birati hoće li se okušati u sastavljanju grana ili će reći „dalje“ i zadržati sve svoje karte u

rukama.[13] Ako igrač sastavi neku novu granu (dakle ako doda odgovarajući novi lepton ili hadron u pljusak), tada dobiva jedan bod. Na taj način, igrači moraju bilježiti svoje bodove nakon svakog novog koraka u igri.[13]

Kada se dogodi situacija da su sve karte iz špila uzete, tada igrači moraju sve karte koje drže u rukama staviti na stol, tako da su sve preostale karte vidljive svakom igraču. Igra se ponovno nastavlja „na poteze“, samo što u ovoj situaciji, svaki od igrača koji dođe na red ima pravo „ukrasti“ bilo koje karte sa stola od ostalih igrača te pomoću njih sastavljati nove grane za koje se ponovno dobivaju bodove jednako kao i prije.[13]

Igra završava u situaciji kada od preostalih karata više nije moguće sastaviti grane koje bi poštivale zakone očuvanja[13] (ili kada se iskoriste sve postojeće karte), a pobjeđuje onaj igrač koji je do tog trenutka skupio najviše bodova!

#### ***4.4.2. Za koga je namijenjena igra „Kozmički pljusak“?***

Autori igre su u priručniku uz upute za igru[13] naveli kako je Razina 1 po težini „srednja“, a Razina 2 „napredna“. U svakom slučaju, ova igra se ne preporuča za potpune početnike niti laike, jer osnovna pravila igre uključuju poznavanje osnovnih zakona očuvanja – očuvanje leptonskog broja, očuvanje barionskog broja, očuvanje ukupnog električnog naboja te očuvanje boje. Također, igrači moraju biti dobro upoznati sa modeliranjem različitih hadrona i mezona, i njihovim svojstvima, te moraju biti vješti i brzi u formiranju fizikalno dozvoljenih raspada. Zbog toga je ova igra odlična za studente i profesore fizike, kao i znanstvenike i ljude koji su dobro upoznati sa gore navedenim pojmovima.

Međutim, ovu igru mogu naučiti igrati i učenici u srednjoj školi (dakle učenici u dobi od 14-18 godina), koji već imaju neka predznanja o elementarnim česticama i njihovim svojstvima kao i o osnovnim zakonima očuvanja. Za takve učenike ova igra može biti i veoma korisna. Naime, u njoj učenici mogu naučiti povezivati kvarkove i antikvarkove u različite hadrone i antihadrone. Također, u izgradnji različitih grana u kozmičkom pljusk, učenici mogu uvježbavati i usavršiti svoje znanje različitim zakonima očuvanja, a samim time i obogatiti svoje shvaćanje osnovnih koncepata u znanosti. S obzirom na to da učenici moraju paziti da su navedene veličine očuvane nakon svake interakcije ili raspada, samim time oni i razvijaju svoju sposobnost apstraktnog razmišljanja i logičkog zaključivanja. Upravo zbog toga, za takve učenike ova igra može predstavljati i dobar uvod u detaljnije učenje različitih raspada![13]

Smatram kako bi ova igra mogla biti i odlično pomoćno sredstvo za upoznavanje sa samom fizikalnoj pojavom kozmičkih zraka i pljuskova. Mogla bi se tako napraviti radionica, predavanje ili školski sat, koji bi se vrtio oko ove igre, u kojem bi se učenici (ili čak i odrasli ljudi koji su zainteresirani za navedenu tematiku) uz vođeno predavanje od strane nastavnika mogli okušati u igri i usput naučiti osnovne ideje i koncepte o elementarnim česticama, kozmičkim zrakama i kozmičkim pljuskovima.

Više o samoj fizikalnoj pojavi kozmičkih pljuskova može se pročitati u sljedećem poglavlju.

#### ***4.4.3. Fizikalna pozadina igre – Što je kozmički pljusak?***

Sukladno početku igre „*Kozmički pljusak*“, za nastanak stvarnih kozmičkih pljuska odgovorni su takozvani „kozmički protoni“. Oni čine primarne kozmičke zrake, o kojima će biti riječ u poglavlju 4.4.3.1.

Nakon što se primarna kozmička zraka sudari sa nekom česticom ili molekulom u atmosferi, dolazi do pojave kozmičkog pljuska, u kojemu nastaju mnogobrojne čestice prema istom principu kao što nalažu pravila igre. Čestice koje pritom nastaju nazivaju se sekundarnim kozmičkim zrakama, a više o njima, kao i o razvoju i detekciji kozmičkih pljuskova može se pročitati u poglavlju 4.4.3.2.

##### ***4.4.3.1. O primarnim kozmičkim zrakama***

Početak dvadesetog stoljeća primijećeno je neobično svojstvo elektroskopa – naime, svaki nabijeni elektroskop (pa čak i u slučaju kada se nalazi u hermetički zatvorenoj posudi) će se nakon određenog vremena izbiti. U početnim teorijama koje su nastojale objasniti tu činjenicu smatrano je da se elektroskopi izbijaju zbog radioaktivnog zračenja koje potječe od elemenata u Zemljinoj kori, a koje ionizira molekule i atome u zraku.[47]

Prema takvim teorijama, zbog činjenice da radioaktivno zračenje dolazi iz zemlje, ionizacija u zraku trebala bi padati povećanjem nadmorske visine. Međutim, pokazano je upravo suprotno – da ionizacija raste porastom nadmorske visine!

*„Za to otkriće, presudan je bio događaj u kolovozu 1912. godine, kada je austrijski fizičar Victor Hess u letu balonom na 5300 metara pomoću uređaja koji se zove elektrometar mjerio brzinu ionizacije u atmosferi. Rezultati su pokazali da je brzina ionizacije na toj visini u atmosferi čak četiri puta veća nego na razini mora!“* [47]

Samim time, postalo je jasno da postoji nekakvo drugačije visokoenergetsko zračenje koje dolazi iz svemira, a u Zemljinoj atmosferi uzrokuje ionizaciju.

U 1930-im godinama, otkriveno je da se takvo zračenje sastoji od električki nabijenih čestica materije, odnosno da se ne radi o elektromagnetskom  $\gamma$  – zračenju. Istraživanja su pokazala da intenzitet tog zračenja ovisi o zemljopisnoj širini, odnosno da je on najmanji na ekvatoru, a raste prema većim zemljopisnim širinama (odnosno prema polovima).<sup>66</sup>[48]

Takvo zračenje nazvano je primarnim kozmičkim zrakama, a 1936. godine, Victor Hess dobio je Nobelovu nagradu za doprinos u njihovom otkriću.[49]

Što se tiče sastava kozmičkih zraka, ustanovljeno je da se one uglavnom sastoje od protona (odnosno jezgara vodika), koji čini otprilike 89% primarnih kozmičkih zraka. Otprilike 10% primarnih kozmičkih zraka čine jezgre helija (alfa čestice), dok se preostalih 1% sastoji od težih jezgara, kao što su jezgre ugljika, kisika, i tako dalje, sve do uranija.[50]

Kao što je prethodno spomenuto, radi se o zrakama vrlo visokih energija. Energija kozmičkih zraka kreće se u rasponu od otprilike 1 GeV , što je usporedivo s energijom relativno malenog akceleratora čestica, pa do čak 108 TeV, što je daleko više od energije snopa Velikog hadronskog sudarivača! Upravo zbog toga je proučavanje kozmičkih zraka bilo od presudne važnosti za razvoj nuklearne fizike i fizike elementarnih čestica u razdoblju prije izuma visokoenergetskih čestičnih akceleratora početkom 1960-ih godina. O važnosti kozmičkih zraka za znanstvena istraživanja najbolje govori podatak da je CERN, nakon što je osnovan 1954. godine, istraživanje o kozmičkim zrakama uvrstio na listu tadašnjih znanstvenih interesa.[50]

Pitanje „*Odakle točno iz svemira dolaze primarne kozmičke zrake?*“ bila je ključna zagonetka koja je pritom zanimala astronome i fizičare. Prema današnjim saznanjima i teorijama, primarne kozmičke zrake se prema svojem podrijetlu mogu podijeliti u četiri kategorije.

Prvoj kategoriji pripadaju takozvane *anomaljske* kozmičke zrake relativno niskih energija. Za njih se pretpostavlja da vjerojatno nastaju u području na samom rubu Sunčevog sustava, kojeg zovemo heliopauza. U tom području, sunčev vjetar jako je slab, tako da njegov utjecaj postaje zanemariv i dolazi do njegovog međudjelovanja sa međuzvjezdanom materijom.[51] Astronomi vjeruju da se anomaljske kozmičke zrake javljaju kad se električki neutralni atomi u heliopauzi ioniziraju i ubrzavaju. Kada je svemirska letjelica Voyager 1 prešla iz tog

---

<sup>66</sup> To se tumači utjecajem geomagnetskog polja na električki nabijene čestice zračenja.[47]

rupa Sunčevog sustava u međuzvjezdani svemir 2012. godine, tamo je otkrila znatno manje anomalijskih kozmičkih zraka, što podržava navedenu teoriju.[48]

Za drugi tip primarnih kozmičkih zraka vjeruje se da dolazi na Zemlju iz udaljenijih dijelova Mliječnog puta izvan Sunčevog sustava. Najveća količina ovakvih kozmičkih zraka proizvodi se nakon eksplozija masivnih zvijezda - supernova, gdje čestice plinovitog ostatka eksplozije međudjeluju pri isprepletenim magnetskim poljima, čime dobivaju akceleraciju pomoću koje mogu „pobjeći“ iz područja u kojem se nalaze te tako doći i do Sunčevog sustava te konačno do Zemlje.[48] Na slici u nastavku vidimo složenu sliku ostataka jedne od najpoznatijih supernova - Rakove maglice (M1) u zvijezdu Bika, koja je nastala kombinacijom optičke (crveno) i rendgenske (plavo) slike.[52]



Slika 42- Ostatak supernove M1 (Rakove maglice) <sup>67</sup>

Treća vrsta primarnih kozmičkih zraka potječe sa Sunca. Radi se o zrakama relativno niskih energija, koje se uglavnom sastoje od protona koji dobivaju energiju od jakih magnetskih polja sa Sunčeve površine.

Posljednjoj vrsti primarnih kozmičkih zraka pripadaju zrake najviših energija, a njihovo podrijetlo i dalje nije poznato. O podrijetlu ovih zraka vode se brojna istraživanja, primjerice na Auger opservatoriju u Argentini, a u 2017. godini objavljena su predviđanja koja sugeriraju da je ovakva vrsta zraka potekla iz područja izvan naše galaksije. Takva će se

---

<sup>67</sup> Slika je preuzeta s [52] (Autor: X-ray: NASA/CXC/ASU/J. Hester et al.; Optical: NASA/HST/ASU/J. Hester et al.)

predviđanja testirati i istraživanjima pomoću teleskopa Cherenkov koji je trenutno u izgradnji, a trebao bi započeti s radom 2022. godine.[48]

Kada primarne kozmičke zrake upadnu u Zemljinu atmosferu, one se sudaraju i međudjeluju sa drugim molekulama i česticama u atmosferi, čime se generiraju golemi „kozmički pljuskovi“ ili „slapovi“ koji mogu sadržavati milijarde novonastalih čestica.

Pojavu kozmičkog pljuska prvi je otkrio francuski fizičar Pierre Auger 1937. godine, a po njemu je nazvan najveći svjetski opservatorij kozmičkih zraka – Augerov opservatorij u Argentini.[53] Čestice koje pritom nastaju nazivaju se sekundarnim kozmičkim zrakama, a o njima će biti govora u sljedećem poglavlju!

#### **4.4.3.2. O sekundarnim kozmičkim zrakama i kozmičkim pljuskovima**

Dakle, nakon što primarne kozmičke zrake (za koje je u prethodnom poglavlju rečeno da se uglavnom sastoje od protona) uđu u Zemljinu atmosferu, one se sudaraju i međudjeluju sa atomima i česticama koje se već nalaze u Zemljinoj atmosferi, poput dušika i kisika.

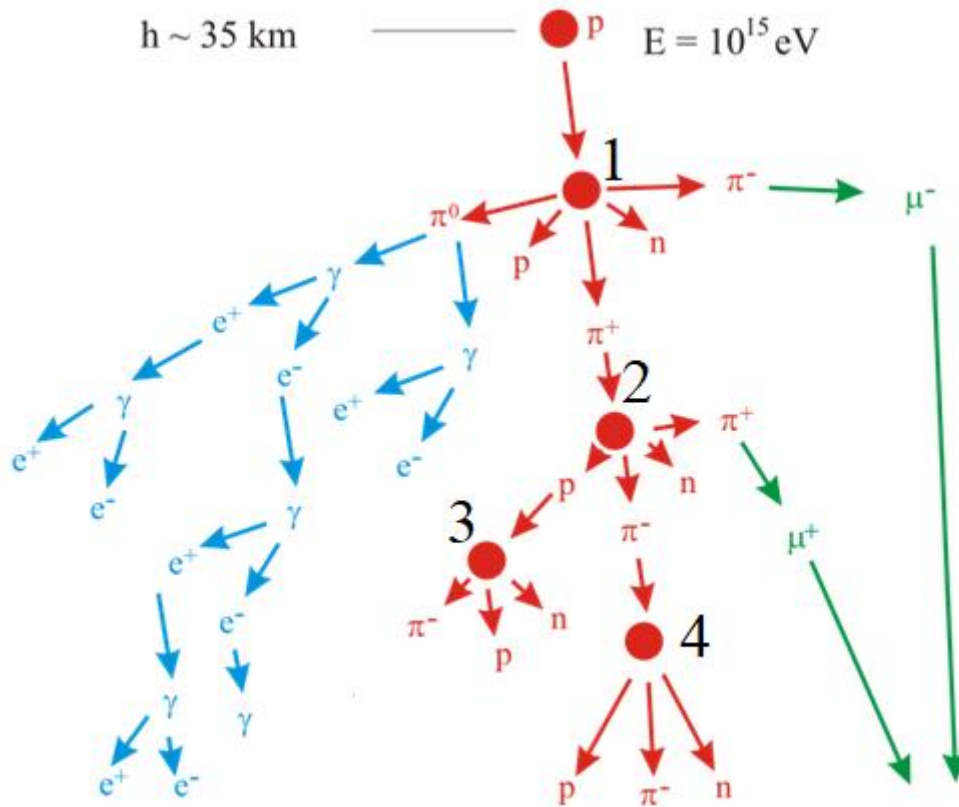
U takvim interakcijama dolazi do stvaranja novih čestica, od kojih su najbrojniji hadroni. Tako se dakle u atmosferu oslobađaju različite vrste mezona, od kojih su najbrojniji pioni i K-mezoni, kao i različiti barioni, poput primjerice neutrona.[47]

S obzirom na to da su proizvedeni hadroni uglavnom nestabilni, oni se u zraku slobodno raspadaju na druge čestice, emitirajući pritom lakše čestice i antičestice, kao i elektromagnetske valove. Na taj način u atmosferu se potom oslobađaju i jednostavnije čestice kao što su alfa čestice, protoni, neutroni, mioni, elektroni, pozitroni i tako dalje.[54] Potom se i mnogi od nastalih hadrona i sami sudaraju i međudjeluju sa drugim česticama koje su prisutne atmosferi!

Rezultat takvih brojnih interakcija jest stvaranje sve većeg i većeg broja čestica u Zemljinoj atmosferi u procesu koji se širi poput „pljuska“. Takvi pljuskovi čestica mogu sadržavati i milijarde čestica, koje se mogu protezati kilometrima u širinu.

U višim dijelovima atmosfere u kozmičkom pljuskovima su prisutne i nastaju raznolike vrste čestica poput bariona, mezona i elementarnih čestica, dok na visinama nižima od otprilike pet kilometara iznad tla dominiraju uglavnom elementarne čestice, od kojih su najzastupljeniji mioni.[13]

Na slici u nastavku prikazan je dijagram interakcija i stvaranja čestica koji može poslužiti kao primjer djelića kozmičkog pljuska.<sup>68</sup>



Slika 43- Prikaz nastanka i širenja mogućeg početnog dijela kozmičkog pljuska

Dakle, kao što je vidljivo na slici, početak kozmičkog pljuska događa se na visini od oko 35 kilometara iznad površine Zemlje, kada se kozmički proton energije reda veličine  $10^{15} \text{ eV}$  sudara sa nekom drugom česticom (označenom brojem 1) u atmosferi. Pritom nastaju različiti hadroni koji su označeni crvenom bojom i prikazani su u prvoj grani kozmičkog „pljuska“. Dakle, vidljivo je da pritom nastaju pozitivni, negativni i neutralni pion ( $\pi^+$  i  $\pi^-$  i  $\pi^0$ ), kao i proton ( $p$ ) i neutron ( $n$ ).

Neutralni pion  $\pi^0$  nestabilan je pa se potom raspada u dva fotona ( $\gamma$ ), koji su prikazani plavom bojom na dijagramu. Proizvedeni fotoni tvore elektromagnetsku „kaskadu“

<sup>68</sup> Dio slike je preuzet iz [54].



stvarajući još više fotona, protona, antiprotona, elektrona i pozitrona[55], koji su svi također prikazani plavom bojom na lijevom dijelu dijagrama.

Pozitivni pion  $\pi^+$  koji je nastao u prvoj fazi kozmičkog pljuska može međudjelovati sa nekom česticom atmosfere, označenom sa brojem 2, što ponovno prouzrokuje oslobađanje novih čestica – pozitivnog i negativnog piona, protona i neutrona. Na slici je vidljivo da produkti te interakcije – proton i negativan pion, i sami kasnije međudjeluju sa drugim česticama u atmosferi (označenima sa 3 i 4), što ponovno prouzrokuje nastajanje novih čestica.

Također, na dijagramu je zelenom bojom prikazano i kako se pozitivan i negativan pion ( $\pi^+$  i  $\pi^-$ ) mogu raspasti (na pozitivan i negativan mion,  $\mu^+$  i  $\mu^-$ , kao i na odgovarajuće lake neutrine i antineutrine koji nisu prikazani na dijagramu).

Dakle, kako se „pljusak“ čestica giba sve niže i niže prema površini Zemlje, broj čestica u „pljusk“ se u početku rapidno povećava nastankom novih interakcija. Međutim, pri svakoj interakciji, čestice gube dio svoje kinetičke energije, pa se mogućnost stvaranja novih čestica s vremenom smanjuje. Na taj način, u određenom trenutku broj čestica u samom pljusk počinje se smanjivati. Upravo zbog toga samo jako malen broj čestica dođe do tla. Broj čestica koje dolaze do tla podložan je mnogim fluktuacijama, ali veći je što je veća početna energija kozmičkih zraka, kao i nadmorska visina tla.[56]

Kozmički pljuskovi se mogu proučavati i detektirati pomoću različitih vrsta detektora, od kojih su najpoznatije sljedeće tri vrste:

*I. Čestični detektori poredani u nizove*

Ovakvi detektori čestica postavljaju se na različite međusobne udaljenosti jedan od drugog ovisno o spektru energija kojeg je potrebno detektirati.

Na primjer, ako se očekuje detekcija pljuskova čija je energija oko  $10^6$  GeV, udaljenost detektora mora iznositi nekoliko desetaka metara.[68]

*II. Zračni Cherenkovi detektori*

Radi se o detektorima takozvne Cherenkove svjetlosti, koju tijekom kozmičkog pljuska u atmosferi mogu emitirati električki nabijene čestice (najčešće se radi o elektronima i pozitronima). Pritom većina svjetlosti nastaje u maksimumu pljuska.[68]

*III. Fluorescentni detektori*

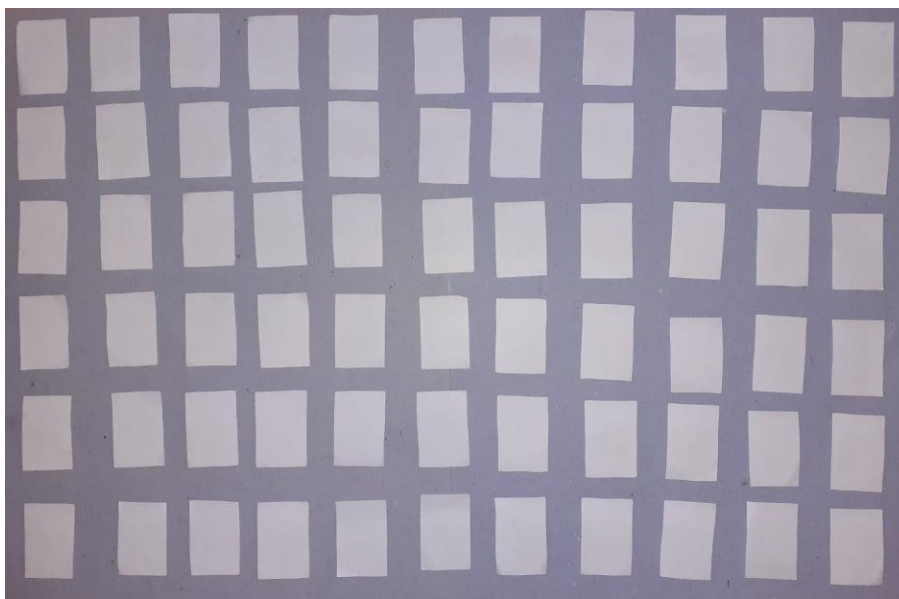
Ova vrsta uređaja detektira fluorescentno zračenje iz atoma dušika koji u atmosferi postaju pobuđeni ionizacijom električki nabijenih čestica u pljusk. Na taj način, visokoenergetski pljuskovi mogu se uočiti na udaljenosti od čak 40 km, a na temelju dobivenih podataka moguće je i procijeniti početnu energiju čestica u pljusk.[68]

#### **4.5. Igra „MEMORY KVARKOVSKOG SADRŽAJA“**

U ovoj igri može sudjelovati proizvoljan broj igrača.[13] Cilj igre je sastavljanje što većeg broja hadrona (bariona ili mezona), kao i parova leptona i njihovih odgovarajućih antileptona[13], a pravila igre baziraju se na konceptu svima dobro poznatih „memory“ igara.

##### **4.5.1. Pravila i tijek igre**

Na samom početku igre, potrebno je dobro promiješati sve karte u špil. Karte se potom postavljaju okrenute licem prema dolje u pravilne redove i stupce[13], primjerice u skupinu od šest redova i jedanaest stupaca, kako je prikazano na sljedećoj slici:



Slika 44- Početna formacija karata u igri "Memory kvarkovskog sadržaja"

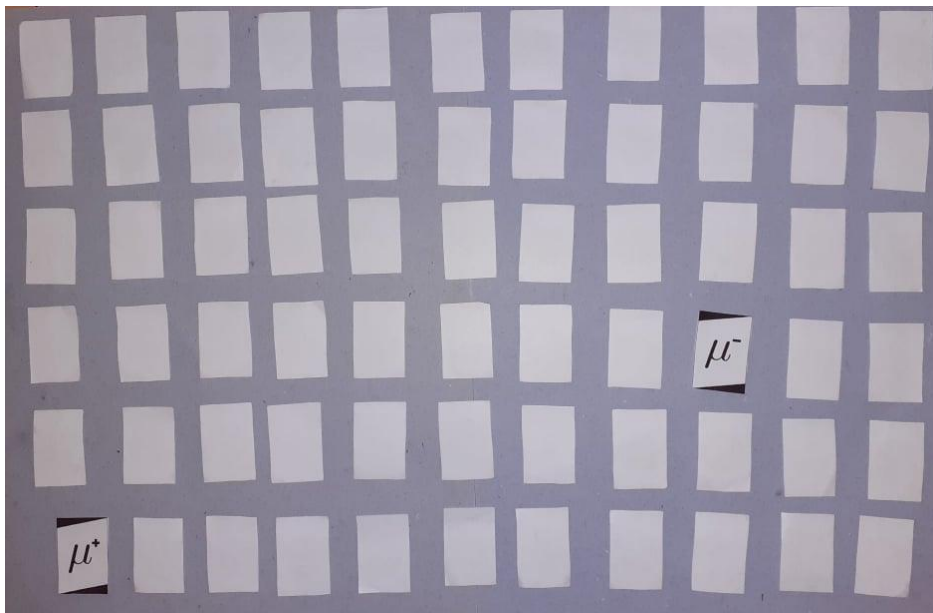
Igra tada može započeti! Igrači dolaze na red ovisno o dogovorenom redosljedu, koji može biti primjerice određen smjerom kazaljke na satu. Svaki put kada pojedini igrač dođe na red, on ima pravo okrenuti dvije karte iz hrpe.[13]

Igrač ima pravo uzeti karte sa hrpe i nastaviti sa daljnjom „potragom“ ako podigne neke od sljedećih kombinacija karata:

1. Odgovarajući par leptona i njegovog vlastitog antileptona[13], odnosno parovi karata:  $e^-$  i  $e^+$ ,  $\nu_e$  i  $\bar{\nu}_e$ ,  $\mu^-$  i  $\mu^+$ , ili  $\nu_\mu$  i  $\bar{\nu}_\mu$ .
2. Validan mezon; odnosno par kvarka i antikvarka koji su suprotnih boja.[13]  
Dakle, moguće su kombinacije bilo kojeg plavog kvarka (plave karte) i anti-plavog antikvarka (karte koja je označena sa svim bojama osim plave; dakle u ovom slučaju radilo bi se o crveno-zelenoj karti). Jednako tako, moguće su i kombinacije bilo kojeg zelenog kvarka i bilo kojeg anti-zelenog antikvarka, kao i kombinacija bilo kojeg crvenog kvarka sa bilo kojim anticrvenim antikvarkom.)<sup>69</sup>
3. Ako igrač odabere dvije karte koje su takve da bi uz podizanje još jedne dodatne karte mogao nastati validan barion ili antibarion, igrač ima pravo podignuti i treću kartu sa hrpe. Ako je treća karta upravo takva da je nastala trojka karata ekvivalentna validnom barionu ili antibarionu, igrač uzima sve tri spomenute karte iz hrpe i nastavlja sa daljnjom „potragom.“[13]

Podrazumijeva se da su validni (anti)barioni oni koji su sastavljeni od bilo koja tri (anti)kvarka od kojih su svi različitih (anti)boja.<sup>70</sup>

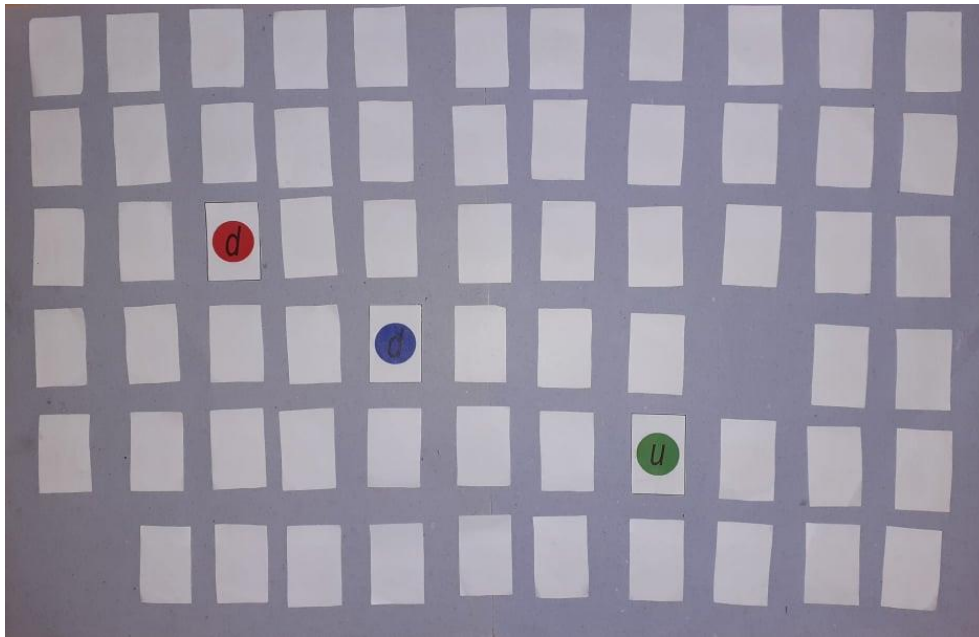
Primjeri navedenih situacija navedeni su na sljedećim slikama:



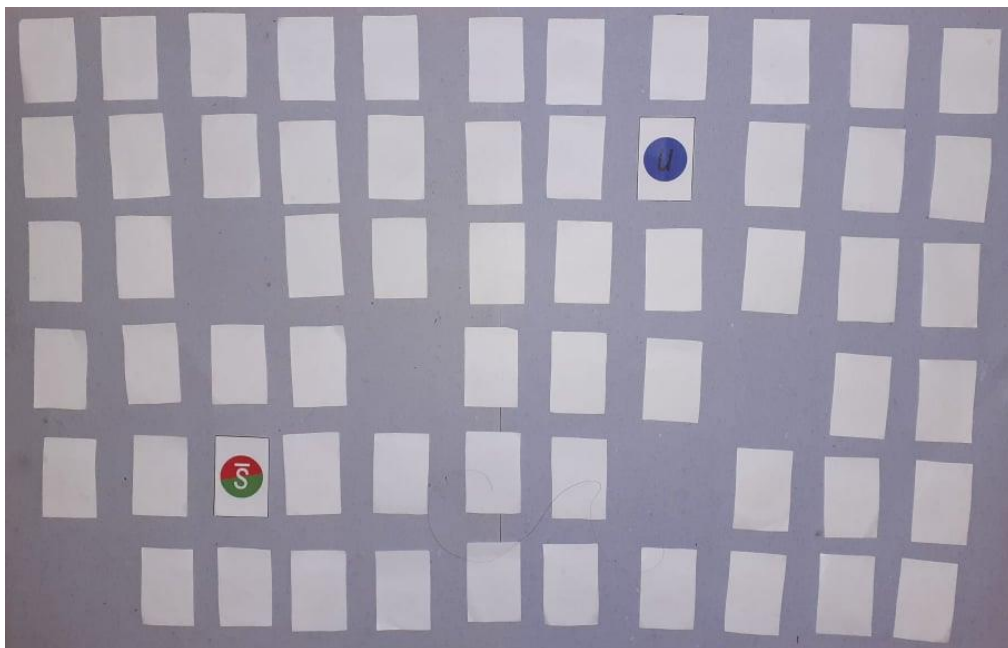
Slika 45 - Validan leptonski par – u ovom konkretnom slučaju radi se o paru miona i antimiona

<sup>69</sup> Popis mezona koje je moguće formirati korištenjem karata iz špila nalazi se u Tablici 26 (str. 144)

<sup>70</sup> Popis bariona koje je moguće formirati korištenjem karata iz špila nalazi se u Tablici 25 (str. 143)

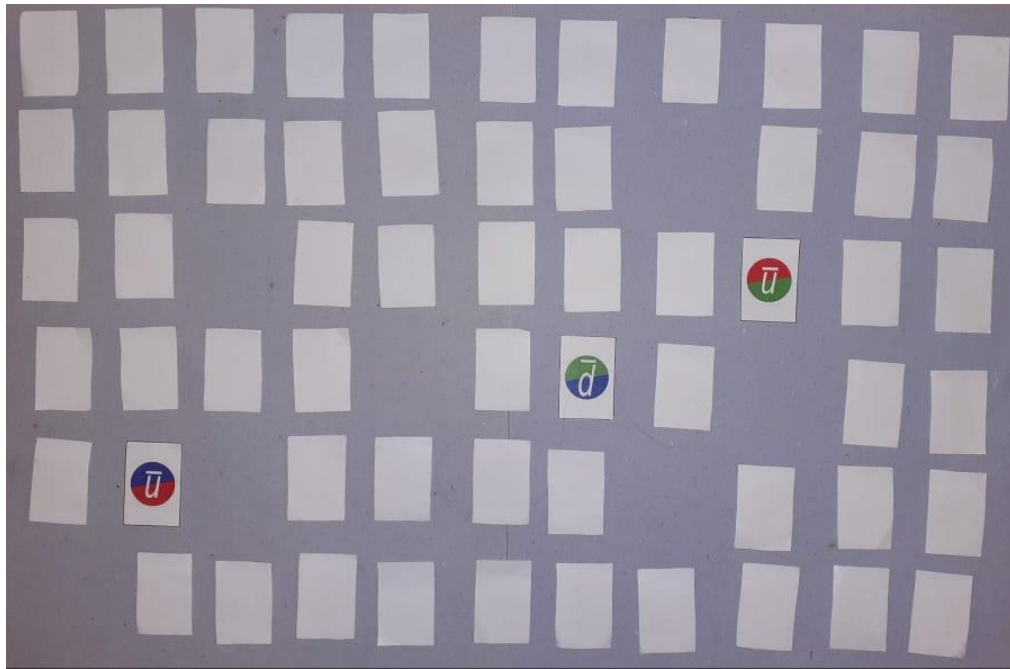


Slika 46- Primjer validnog bariona koji se sastoji od tri kvarka, odnosno tri karte različitih boja



Slika 47- Validan mezon, odnosno par kvarka i antikvarka suprotnih boja.

Može se uočiti da se u slučaju validnih mezona radi o kombinaciji dvije karte koje su takve da su na njima zastupljene sve tri moguće boje karata!



Slika 48- Primjer validnog antibariona. Radi se o kombinaciji tri antikvarka koji su svi različitih anti-boja

Ako igrač okrene dvije karte koje ne odgovaraju niti jednom od gore navedenih slučajeva, on gubi svoj red te mora ponovno vratiti karte na isto mjesto tako da stoje licem prema dolje. Nakon toga, igrač koji je idući na redu dobiva svoju priliku za okretanjem karata.[13]

Igra se završava kada se iskoriste sve karte iz hrpe. Igrači tada broje svoje prikupljene karte, te za svaku od njih dobivaju po jedan bod. Pobjednik je onaj igrač koji ima najviše bodova; odnosno onaj tko je sakupio najviše karata![13]

Osim igranja u skupinama, ova igra može se modificirati i na način da bude prilagođena za samo jednog igrača. Pritom vrijede ista pravila slaganja hadrona i leptonskih parova koja su već navedena u originalnoj verziji igre. I u ovoj verziji igre, igrač može okretati po dvije karte odjednom, a u slučaju pokušaja sastavljanja bariona moguće je okrenuti i treću kartu iz hrpe. Pritom igrač može ukloniti karte iz hrpe samo ako se radi o odgovarajućem paru ili trojci karata. U slučaju da se ne radi o odgovarajućoj kombinaciji karata, igrač okreće odabrane karte natrag tako da su one okrenute licem prema dolje, nakon čega nastavlja sa okretanjem neke druge dvije (ili tri) karte. I u ovom slučaju igra završava onda kada se iskoriste sve karte sa stola; odnosno kada se od njih formiraju odgovarajući hadroni ili leptonski parovi. Pritom bi bilo zanimljivo mjeriti vrijeme koje je potrebno igraču da završi sa spajanjem svih karata u odgovarajuće validne kombinacije. Na taj način, igrač bi svakom novom igrom mogao pokušavati oboriti svoj vlastiti rekord!

#### 4.5.2. *Za koga je namijenjena igra „Memory kvarkovskog sadržaja“*

Igra „*Memory kvarkovskog sadržaja*“ dovoljno je jednostavna, tako da ju mogu igrati i osobe koje ne znaju baš ništa o samim elementarnim česticama i njihovim svojstvima!

Potrebno je samo naučiti navedena pravila igre, koja se mogu dodatno i simplificirati. Recimo, moguće je koristiti špil sastavljen samo od različitih kvarkova (dakle bez korištenja leptona). Sastavljanje bariona i mezona može se jednostavno objasniti pravilom da je moguće spajati po tri karte koje su sve različitih boja (barione), ili parove karata u kojima su zastupljene sve tri boje (kvark + antikvark odgovarajućih boja).

Ako se pravila igre objasne na takav pojednostavljeni način, igru lako mogu svladati i mlađa osnovnoškolska djeca, pa čak i djeca predškolske dobi koja još ne znaju čitati.

Nakon što se savlada takva pojednostavljena verzija igre sa kvarkovima, u igru se mogu dodati i leptoni, pri čemu je potrebno uočiti da su validni parovi oni koji su „vizualno slični, ali ne isti“ – međusobno se razlikuju u predznaku – električnom naboju (kao kod parova  $e^-$  i  $e^+$  te  $\mu^-$  i  $\mu^+$ ), ili u „crtici“ koja označava radi li se o čestici ili o antičestici (kao u primjerima  $\nu_e$  i  $\bar{\nu}_e$  te  $\nu_\mu$  i  $\bar{\nu}_\mu$ )

Upravo zbog svoje jednostavnosti, ova igra može biti i odlična kao uvod u predavanje, radionicu ili nastavni sat u osnovnoj školi, gdje će se učiti o kvarkovima, leptonima i njihovim svojstvima, kao i o formiranju različitih hadrona i parova čestica, njihovim imenima i svojstvima.

Također, s obzirom na to da je u ovoj igri važno biti fokusiran i pokušati zapamtiti lokacije već viđenih karata te ih pravilno povezivati, ova igra može biti jednako zanimljiva djeci kao i odraslima, što ju čini odličnom igrom za cijelu obitelj! Autori igre navode kako „*naše iskustvo pokazuje da je za obitelji sa članovima različitih dobi, vjerojatno najbolja igra za početak Memory kvarkovskog sadržaja.*“ [13] Zanimljivo je i to što u takvom slučaju „*djeca, tinejdžeri i odrasli mogu imati gotovo jednake šanse za pobjedu*“ [13]

#### 4.6. *Dodatak igri 4.5. - Igra „PRONAĐI HIGGSOV BOZON“*

Ova igra je po pravilima veoma slična igri „*Memory kvarkovskog sadržaja*“. Međutim, u igru je dodan i jedan novi element. Naime, igranjem ove igre, moguće je „detektirati“ raspad najnovije otkrivene i detektirane elementarne čestice- Higgsovog bozona. Naime, tijekom

igre je moguće pronaći moguće produkte njegovog raspada, što donosi ili automatsku pobjedu, ili priliku za pobjedom, ovisno o razini igre.

U ovoj igri može sudjelovati proizvoljan broj igrača[13], a detaljna pravila, kao i opis različitih razina igre bit će objašnjena u nastavku.

#### 4.6.1. Pravila i tijek igre

Sam početak igre, kao i većina pravila, jednaka su kao i kod igre „*Memory kvarkovskog sadržaja*“, koja su opisana u poglavlju 4.5.1. Dakle, karte se postavljaju okrenute licem prema dolje u pravilne redove i stupce, nakon čega igrači redom dobivaju priliku za okretanjem karata, pokušavajući sastaviti odgovarajuće leptonske parove ili validne hadrone. Međutim, u ovoj verziji igre, osim navedenih kombinacija karata, moguće je „detektirati“ i odgovarajuće kombinacije leptona koje su ekvivalentne različitim produktima raspada Higgsovog bozona ( $H^0$ ).[13]

Radi se o sljedećih sedam mogućih kombinacija koje se sve sastoje od po četiri leptona<sup>71</sup>:

$e^+, e^-, e^+, e^-$
$\mu^+, \mu^-, \mu^+, \mu^-$
$e^+, e^-, \mu^+, \mu^-$
$e^+, \nu_e, e^-, \bar{\nu}_e$
$\mu^+, \nu_\mu, \mu^-, \bar{\nu}_\mu$
$e^+, \nu_e, \mu^-, \bar{\nu}_\mu$
$\mu^+, \nu_\mu, e^-, \bar{\nu}_e$

Tablica 16 - Mogući produkti raspada Higgsovog bozona u igri

Ovakvi produkti raspada su potvrđeni i detektirani u Velikom Hadronskom Sudarivaču na CERNU 2012. godine. Tamo su osmišljeni eksperimenti koji bi mogli dokazati postojanje do tada nepoznate čestice – Higgsovog bozona.

Radilo se o eksperimentima gdje je sudaranjem protona u akceleratorima čestica između ostalih čestica mogao nastati i Higgsov bozon. Budući da je Higgsov bozon nestabilna

<sup>71</sup> Popis mogućih kombinacija karata preuzeti su iz [13] i [57].

čestica, vrlo brzo nakon njegovog stvaranja, on se i raspadao, te se zbog toga ispitivanjem nastalih čestica nakon raspada (koje su navedene u Tablici 16) neizravno moglo dokazati i samo postojanje Higgsovog bozona, te su potvrđena mnoga njegova svojstva!<sup>72</sup>

Ako se dogodi da igrač, kada je na redu za okretanjem karata, pronade bilo koja dva leptona koji su takvi da uz dodatna dva leptona mogu predstavljati jednu od navedenih sedam kombinacija, onda igrač može u istoj rundi pokušati podignuti i dodatne dvije karte.[57]

Ova situacija predstavlja svojevrstan rizik; naime ako igrač nastavi s okretanjem karata i okrene dodatne dvije karte koje su baš takve da ukupne četiri karte tvore jednu od sedam mogućih gore navedenih kombinacija, igrač je „detektirao“ moguć raspad Higgsovog bozona.

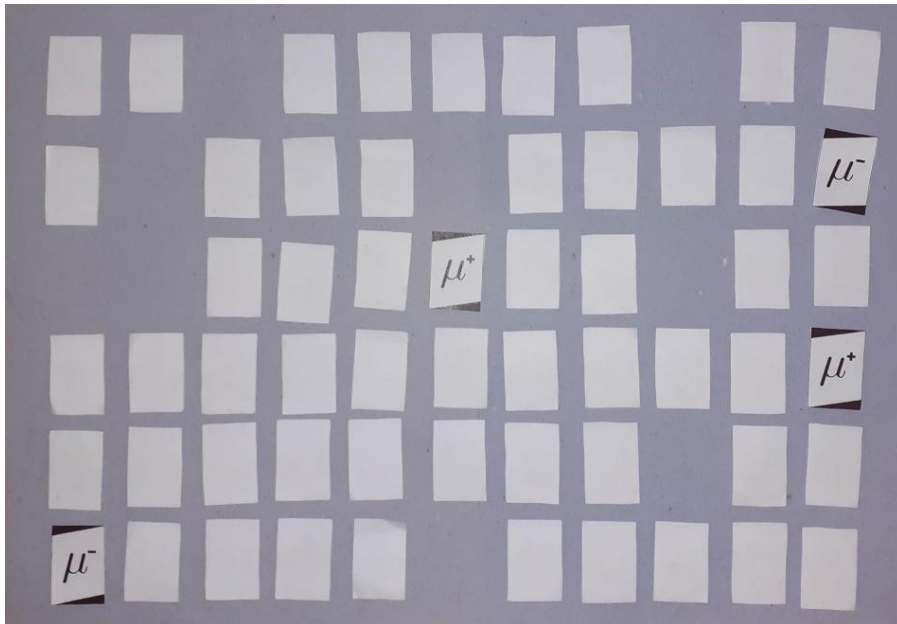
Međutim, ako igrač nastavi s podizanjem dodatnih karata te podigne dvije karte koje nisu odgovarajuće, onda mora vratiti sve četiri karte natrag na njihovo mjesto, nakon čega suigrač koji je idući na redu dobiva svoju priliku za podizanjem karata.[57]

Na sljedećim slikama nalaze se primjeri odgovarajućih raspada Higgsovog bozona, koji odgovaraju kombinacijama iz drugog i četvrtog reda Tablice 16:

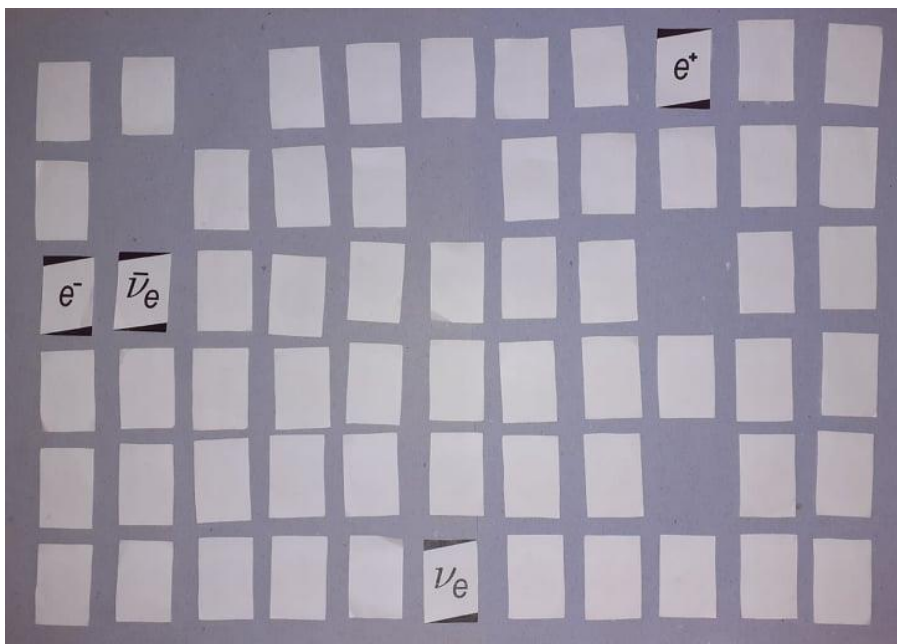
---

<sup>72</sup> Napomena: u potpoglavlju 4.6.3 može se saznati nešto više o Higgsovom bozonu i o detekciji njegova raspada. Tamo je objašnjeno i zašto upravo su produkti raspada koje navodi Tablica 16 relevantni za detekciju Higgsovog raspada (pogledati Tablicu 17. – str.93)





Slika 49- Primjer kombinacije koja označava jednu moguću "detekciju" Higgsovog bozona



Slika 50- Primjer kombinacije koja označava jednu moguću "detekciju" Higgsovog bozona

Ako se tijekom igre dogodi situacija da netko od igrača uspješno „detektira“ moguće produkte raspada Higgsovog bozona, moguća su dva različita razvoja situacije, ovisno o razini igre. Naime, postoje dvije različite razine igre[13], a u nastavku slijedi opis svake od njih:

- RAZINA 1 – OSNOVNA RAZINA

U ovoj razini igre, uspješna „detekcija“ mogućih produkata raspada Higgsovog bozona donosi automatsku pobjedu![13] Dakle, igrač koji tijekom svojeg poteza pronade odgovarajuću kombinaciju četiri leptona (odnosno jednu od kombinacija karata koje prikazuje Tablica 16) automatski pobjeđuje, bez obzira na to koliko je karata sakupio do tog trenutka.

- RAZINA 2 – NAPREDNA RAZINA

U ovoj razini igre, sama detekcija zadanih kombinacija leptona nije dovoljna za automatsku pobjedu, već je u igru uključen i element sreće. Za ovu verziju igre, uz karte je potrebno imati i jednu običnu kockicu za igranje, koja sadrži brojeve od 1 do 6. Naime, kada neki od igrača uspješno „detektira“ moguće produkte raspada Higgsovog bozona, on mora i baciti kocku. Ukoliko kockica padne na broj „6“, tada je igrač uistinu uspješno „detektirao“ raspad Higgsovog bozona, i samim time „otkrio“ Higgsov bozon, što mu donosi i konačnu pobjedu u igri.[13][57]

Međutim, ako igrač baci kockicu, i ona ne padne na broj 6, već na neki od preostalih brojeva (dakle od 1 do 5), „detekcija“ Higgsovog bozona nije uspješna.

Naime, ovakav ishod interpretira se kao „pozadinski događaj“.[57] Radi se o događajima koji su veoma česti u samim eksperimentima na CERNU, a koji daju *jednake* produkte kao i sam raspad Higgsovog bozona, iako se radi o nekim posve drugačijim procesima, koji uopće nisu povezani sa Higgsovim bozonom.

U tom slučaju, igrač ne pobjeđuje u igri automatski, ali može zadržati prikupljene četiri karte (koje mu samim time donose četiri boda), nakon čega igrač koji je sljedeći na redu dobiva svoju priliku za okretanjem karata.[13][57]

U obje verzije igre može se dogoditi situacija da tijekom igre niti jedan igrač ne uspije automatski pobijediti „detekcijom“ raspada  $H^0$ . U tom slučaju, igra se nastavlja kao i kod igre „*Memory kvarkovskog sadržaja*“.[13]

Dakle, nakon što igrači sa stola „pokupe“ sve karte (sakupljanjem valjanih hadrona i leptonskih parova), karte se zbrajaju te na kraju pobjeđuje osoba koja je sakupila najviše karata.

#### 4.6.2. *Za koga je namijenjena igra „Pronađi Higgsov bozon“?*

Budući da je igra „Pronađi Higgsov bozon“ veoma slična igri „Memory kvarkovskog sadržaja“, autori igre također ju preporučuju kao jednu od najboljih igara za cijelu obitelj.[13]

Međutim, potrebno je uzeti u obzir činjenicu da je ova igra nešto složenija od igre „Memory kvarkovskog sadržaja“ zbog toga što je u ovoj igri potrebno poznavati i zapamtiti i odgovarajuće kombinacije leptona (koje prikazuje Tablica 16), a koje predstavljaju produkte raspada Higgsovog bozona.

Smatram da je zbog toga najbolji način za upoznavanje s ovom igrom nakon što se igrači prvotno upoznaju sa pravilima igre „Memory kvarkovskog sadržaja“.

U naprednoj razini ove igre postoji i dodatni „element sreće“ sa bacanjem kockice, koji igru čini još zanimljivijom i zabavnijom u situacijama kada se igra u velikim skupinama.

Iako je sama igra zapravo prilično jednostavna, u njoj se mnogo toga može naučiti – kako o samom formiranju hadrona i o leptonskim parovima, tako i o Higgsovom bozonu, koji, iako naizgled zvuči apstraktno i komplicirano, vjerojatno pobuđuje interes mnoge djece, kao i laika.

„Detekcijom“ raspada Higgsovog bozona u igri, koji se poistovjećuje sa „otkrićem“ samog Higgsovog bozona, svatko može primijetiti kako se velika otkrića u fizici često opažaju *neizravno*, čime se kod djece i laika razvija svijest o samoj prirodi opažanja u znanosti i o konstruiranju istraživanja, te se tako formira i nadograđuje njihov znanstveni način zaključivanja. Ideja sa uključivanjem kockice u igru na odličan način opisuje pojavu „pozadine“ u stvarnom eksperimentu, koja daje jednake rezultate očekivanima, ali koja se ipak mora razlikovati od mnogo rjeđih raspada samih Higgsovih bozona.

Osim što je ova igra zabavna i dinamična, vjerujem da će se svidjeti mnogima i zbog toga što ona na prilično jednostavan način opisuje kako se točno otkrio Higgsov bozon, navodeći konkretne produkte njegovog raspada, koji su ekvivalentni onima detektiranim u procesima u Velikom hadonskom sudarivaču. Na taj način, i ljudi bez velikog fizikalnog predznanja mogu naučiti o osnovnom principu otkrića ove čestice, koja se često navodi kao jedno od najvećih otkrića 21. stoljeća!

Ne treba ni spominjati ogromni potencijal koji ova igra ima za pripremu različitih znanstveno-popularnih predavanja, radionica, kao i dodatnih i „običnih“ nastavnih satova u

kojima bi tematika bila „potraga“ za Higgsovim bozonom kao i njegovo otkriće. U takvim bi aktivnostima zainteresirani mogli igranjem ove igre aktivno „prolaziti“ kroz stvarna opažanja i eksperimente u CERNU, prateći pritom interaktivno predavanje u kojem bi i oni sudjelovali odgovaranjem na pitanja.

U nastavku je dan kratki pregled najvažnijih činjenica koje bi mogle poslužiti za izradu takvog predavanja!

#### **4.6.3. Fizikalna pozadina igre – O potrazi za Higgsovim bozonom**

Fizika kao znanost često mnogim ljudima može ostaviti dojam znanosti u kojoj je „sve već poznato i otkriveno“, i u kojoj ne postoje otvorena pitanja. Mnogi znanstvenici su početkom 19. stoljeća i sami imali takav dojam, poput profesora fizike Phillipa von Jolly-a, koji je predavao fiziku mladom Maxu Plancku, i savjetovao ga da ne upisuje studij fizike jer „*Na ovom polju gotovo je sve već otkriveno, a preostalo je samo popuniti nekoliko rupa.*“ [58]

Međutim, taj dojam je zapravo potpuno pogrešan. Usprkos brojnim revolucionarnim otkrićima i teorijama u 19. i 20. stoljeću, i u današnjoj fizici postoji mnoštvo otvorenih pitanja na koja znanstvenici pokušavaju dobiti odgovor. Neka od tih pitanja su: *Zašto je gravitacijska sila toliko slabija od ostalih elementarnih sila?; Što je tamna tvar koja čini više od 80% materije u svemiru?; Što je tamna energija i zašto se svemir ubrzano širi?; Postoji li još elementarnih čestica koje nismo otkrili?* [59]. Jedno od takvih pitanja bilo je i pitanje: „*Zašto čestice imaju masu?*“, a u potrazi za odgovorom na to pitanje razvila se i „potraga“ za Higgsovim bozonom!

##### **4.6.3.1. O Standardnom modelu i Higgsovom polju**

Teorije i otkrića tisuća fizičara s početkom u 1930-im godinama rezultirali su izvanrednim uvidom u temeljnu strukturu materije - utvrđeno je da je sve u svemiru napravljeno od nekoliko osnovnih građevinskih blokova, koji su nazvani elementarnim česticama, kojima upravljaju četiri temeljne sile. Naše najbolje razumijevanje međusobnog odnosa ovih čestica i tri temeljne sile (elektromagnetske, jake i slabe) sadržano je u Standardnom modelu (SM) fizike čestica. [60]

SM je razvijen početkom 1970-ih, a od tada je uspješno objasnio mnoge eksperimentalne rezultate i precizno predvidio širok spektar pojava.

Jedna od osnovnih ideja Standardnog modela jest da temeljne sile prirode proizlaze iz zakona poznatom pod nazivom simetrija, a prenose ih čestice poznate kao baždarni bozoni. Samim

time, pri određenim uvjetima, elektroslaba interakcija se manifestira kao slaba sila koju prenose masivni baždarni bozoni. Prema simetriji slabe sile, prijenosnici slabe interakcije,  $W$  i  $Z$  bozoni, ne bi trebali imati masu.[1] Međutim,  $W$  i  $Z$  bozoni zapravo su čestice koje imaju masu! Naime, 1980-ih godina, razvojem sudarivača i akceleratora čestica u Ženevi u CERNU uslijedili su eksperimenti pomoću kojih su se uistinu detektirali  $W$  i  $Z$  bozoni, te je na temelju detektiranih rezultata izračunata i njihova masa<sup>73</sup>, koja je za obje čestice otprilike oko 100 puta veća od mase jednog protona![61] Samim time, može se zaključiti da elektroslaba interakcija narušava zakon simetrije.

Međutim, ovaj „problem“ zapravo je uzet u obzir već u ranim 1960-im godinama, kada je razvijena teorija pod nazivom Higgsov mehanizam.<sup>74</sup> Osnovna ideja Higgsovog mehanizma je postojanje specifičnog „Higgsovog polja“ koje se prostire čitavim svemirom, a koje omogućuje  $W$  i  $Z$  bozonima (ali i svim ostalim masenim česticama) da imaju masu.[1] Neposredno nakon Velikog praska, vjeruje se da je Higgsovo polje bilo je jednako nuli, ali kako se svemir hladio i temperatura padala, polje je spontano raslo, tako da je svaka čestica u interakciji s njim stekla masu. Smatra se da su čestice počele međudjelovati sa Higgsovim poljem u vremenu od otprilike  $10^{-12}$  sekundi nakon Velikog praska, a prije toga su sve bile bezmasene! Što jače neka čestica međudjeluje s Higgsovim poljem, to je njena masa veća. Jednako tako, čestice poput fotona koje ne stupaju u interakciju s njim ostale su bezmasene.[61][62]

1964. godine, Higgs je predao rad u kojem je matematički formulirao ovu ideju jednom istaknutom časopisu za fiziku. Međutim, njegov rad prvotno je odbijen, a uredništvo časopisa ocijenilo je da „*nema očigledan značaj za fiziku*“.[63] Pa ipak, Higgs je nastavio vjerovati u svoju ideju, i iste godine ipak je uspio objaviti svoj rad, a s vremenom je njegova teorija stekla povjerenje mnogih fizičara, da bi do 1980. godine postala široko prihvaćena.

U ovom trenutku vjerojatno se mnogima postavlja pitanje: *Kako bismo mogli dokazati da je teorija o Higgsovom mehanizmu podržana?* Kao odgovor na ovo pitanje, prvo treba uzeti u obzir činjenicu da Higgsovo polje, poput svih fundamentalnih polja mora imati

---

<sup>73</sup> Mase navedenih bozona kao i njihova uloga u slaboj interakciji navedena je u poglavlju 3.3.2.

<sup>74</sup> Higgsov mehanizam dobio je naziv po znanstveniku Peteru Higgsu, iako je on zapravo samo jedan od nekoliko fizičara (uz Roberta Brouta, Francois Englerta, Geralda Guralnika, C.R.Hagena i Toma Kibble-a) koji su svi otprilike u isto vrijeme došli na sličnu ideju.[59]

odgovarajuću česticu koja bi predstavljala „nositelja“ tog polja. Samim time, ako mehanizam Higgsovog polja uistinu postoji, onda bi se mogla detektirati i specifična čestica nositelj tog polja, koja je nazvana „Higsov bozon“! To bi trebala biti nestabilna čestica, koja bi se nakon nastanka raspala za oko  $1,6 \cdot 10^{-22}$  sekundi[64], a iz teorije SM mogla su se predvidjeti i neka njena temeljna svojstva, poput naboja i spina.[59] Međutim, masa Higgsovog bozona nije se mogla precizno izvesti iz teorije SM, već je samo bilo poznata njena gornja granica od 1 TeV.[62]

Dakle, kako bi potvrdili mehanizam Higgsovog polja, znanstvenicima je preostalo „samo“ detektirati takvu odgovarajuću česticu. Međutim, potraga za Higgsovim bozonom nije bila nimalo laka. Bilo je teško osmisliti eksperiment kojim bi se potvrdilo postojanje takve (do tada nepoznate) čestice, a i za samo izvršavanje takvih eksperimenata tehnologija, detektori i ubrzivači čestica su morali uznapredovati, tako da se za Higgsovim bozonom tragalo više od trideset godina.

#### **4.6.3.2. O otkrićima u srpnju 2012. godine**

Kao što je prethodno spomenuto, za Higsov bozon pretpostavljalo se da mora biti nestabilna čestica, koja se u vrlo kratkom vremenu raspada na stabilnije. Samim time, trebalo je osmisliti eksperiment u kojem bi se u čestičnim sudarima (primjerice u sudarima protona) „proizveo“ Higsov bozon, koji bi se potom raspao na stabilnije čestice, nakon čega bi se detekcijom tih stabilnijih čestica moglo indirektno izmjeriti i svojstva samog Higgsovog bozona.

Veliki elektronsko-pozitronski sudarivač LEP (Large Electron-Positron collider) u CERNU, kojim se upravljalo od 1989 do 2000. je bio prvi akcelerator koji je značajno utjecao na razvoj istraživanja o Higgsovom bozonu. Naime, ovaj akcelerator nije uspio detektirati Higsov bozon, ali je suzio potragu za njime, potvrdom da njegova masa ne smije biti veća od 114 GeV.[62] 1984. godine u CERN-u su začeta je ideja o mogućem uvođenju protonsko – protonskog akceleratora s vrlo velikom energijom sudara od 10-20 TeV u isti tunel kao i LEP. Ustanovljeno je da bi takav akcelerator mogao ispitivati puni mogući raspon mase Higgsovog bozona, pod uvjetom da je pritom luminozitet izrazito visok.[62]

Također, velik problem je predstavljala i činjenica da bi, kod takvih eksperimenata, trebalo uzeti u obzir i poznate procese koji se događaju pri sudarima čestica, a koji imaju identičan „potpis“ u detektorima kao i očekivani produkti raspada Higgsovog bozona, iako zapravo uopće nisu povezani sa njim. Takvi procesi su statistički mnogo vjerojatniji od raspada

Higgsovog bozona, ali ih je potrebno moći izolirati i razlikovati od njega, zbog čega se oni nazivaju *pozadinom*. [59]

S obzirom na stanje tadašnje detektorske tehnologije, to se činilo strašnim izazovom, zbog čega je na CERN-u pokrenut istraživački i razvojni program koji je omogućio brz napredak na detektorima. Time je pokrenuta suradnja iz koje će se kasnije razviti ATLAS<sup>75</sup>, CMS<sup>76</sup> i drugi poznati uređaji na Velikom hadronskom sudarivaču [62] pomoću kojih su se mogli izvoditi eksperimenti sa elementarnim česticama.

Osnovna ideja LHC-a jest da on protone (ili određene druge hadrone) ubrzava do brzina koje su gotovo usporedive sa brzinom svjetlosti, dajući svakom od njih energiju i do 6.500 GeV. (Uzmimo u obzir da je energija mirovanja protona približno 1 GeV). Tako ubrzani protoni cirkuliraju LHC-ovim tunelom dugim 26,7 kilometara, nakon čega se međusobno sudaraju. Prilikom takvih sudara, dolazi do stvaranja mnoštva novonastalih čestica, a u rijetkim slučajevima nastaju i „neuhvatljivi“ Higgsovi bozoni. [65]

Izgradnja takvog akceleratora i pripadnih detektora potrajala je čak do 2008. godine. LHC je konačno započeo s radom 10. rujna 2008. godine, ali, nažalost, nakon samo deset dana javio se kvar na supervodljivim magnetima, za čiji popravak je trebala godina dana uz uvjet da se energije sudara smanje na 7 TeV. Do kraja 2011. godine, projektom ATLAS je sakupljeno i analizirao  $5 \text{ fb}^{-1}$  podataka o produktima takvih sudara. Rezultati su pokazali da se Higgsov bozon kojeg predviđa Standardni model mora imati masu u malenom rasponu oko 125 GeV! Kako bi se dobili preciznije informacije, 2012. godine je energija LHC akceleratora povećana na 8 GeV. [62]

Konačno „dana 4. srpnja 2012. godine, dva glavna eksperimenta u LHC-u, na ATLAS-u i CMS-u, su nezavisno jedan od drugog prijavila pronalazak, odnosno „detekciju“ nove čestice s masom oko 125 GeV/c<sup>2</sup> koja je po nekim glavnim svojstvima bila dosta slična s (očekivanim) Higgsovim bozonom!„ [1]

ATLAS i CMS eksperimenti uspjeli su „detektirati“ takvu česticu (za koju se pretpostavilo da se radi o  $H^0$ ) u sljedeće tri vrste (kanala) raspada:

---

<sup>75</sup> ATLAS (engl. *A Toroidal LHC ApparatuS*) – Toroidni LHC uređaj

<sup>76</sup> CMS (engl. *Compact Muon Solenoid*) – Kompaktna mionska zavojnica

$H^0 \rightarrow \gamma \gamma$
$H^0 \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow l^+ l^- l^+ l^-$
$H^0 \rightarrow W^+ W^- \rightarrow l^+ \nu l^- \bar{\nu}$

Tablica 17- Detektirani kanali raspada Higgsovog bozona<sup>77</sup>

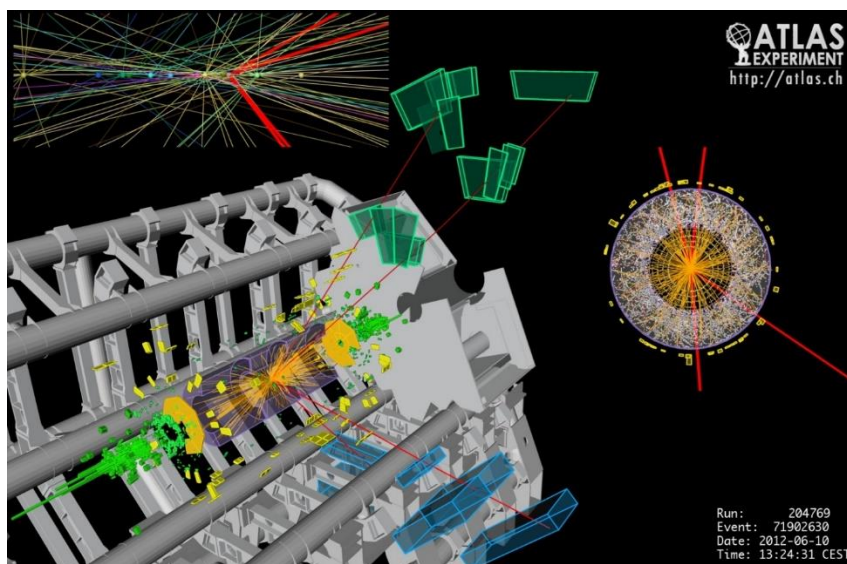
Pritom je u prvom redu Tablice 17 slovom  $\gamma$  označeno da se radi o fotonu,  $l^+$  u drugom i trećem redu općenito označava pozitivno nabijene leptone (primjerice  $e^+$  i  $\mu^+$ ), a  $l^-$  označava negativno nabijene leptone (primjerice  $e^-$  i  $\mu^-$ ). U trećem redu tablice, slovo  $\nu$  označava (anti)neutrino koji odgovaraju istoj generaciji kao i odgovarajući lepton ( $l^+$  ili  $l^-$ ) uz kojeg su navedeni. Samim time, jasno je da u navedenim raspadima vrijedi očuvanje pojedinačnih leptonskih brojeva.

Nakon spektakularnog otkrića u srpnju 2012. godine, bilo je potrebno provesti još mnoga istraživanja i analize ne bi li se dokazalo da se novootkrivena čestica uistinu može poistovjetiti sa Higgsovovim bozonom, a novootkrivenu česticu nazivali su česticom „*nalik*“ Higgsovoj. Osam mjeseci kasnije, 4. ožujka 2013. godine, potvrđeno je da je novootkrivena čestica uistinu Higgsov bozon![1]

Znanstvenici François Englert i Peter Higgs zajedno su, 8. listopada 2013. godine, dobili Nobelovu nagradu za fiziku za „*teoretsko otkriće mehanizma koji doprinosi našem razumijevanju podrijetla mase subatomske čestice, a što je nedavno potvrđeno otkrićem predviđena temeljna čestica, eksperimentima ATLAS i CMS na velikom hadronskom sudarivaču CERN-a.*”[61]

<sup>77</sup> Kanali raspada preuzeti su iz [13]





Slika 51- Prikaz detekcije Higgsovog bozona kanalom raspada koji odgovara slučaju iz drugog retka Tablice 17, gdje su njegovim raspadom nastali leptoni mioni i antimioni. Četiri miona vizualizirani su crvenim linijama, a zelenim i plavim površinama označena su mjesta na kojima su mioni prolazili kroz detektore.<sup>78</sup>

Nakon otkrića Higgsovog bozona, pa sve do danas, nastavilo se sa eksperimentima i istraživanjima, kao i detaljnim statističkim analizama izvedenih mjerenja, ne bi li se dodatno razjasnila njegova svojstva i interakcija sa ostalim česticama kojima su one dobile masu.

Tako je, primjerice, šest godina nakon njegova otkrića, 28. kolovoza 2018. godine, CERN objavio da je detektiran raspad Higgsovog bozona na dva dubinska ( $b$ ) kvarka, što je u skladu sa predviđanjima Standardnog modela. Naime, iz Standardnog modela slijedi predviđanje da će se u čak otprilike 60% slučajeva Higgsov bozon raspada baš na takve parove kvarkova. Za potvrdu tog predviđanja trebalo je čak šest godina zbog činjenice da u sudarima protona postoji cijeli niz drugih načina produkcije dubinskih kvarkova (koji predstavljaju „pozadinu“), zbog čega je detektorima bio teško izolirati one (mnogo rjeđe) slučajeve u kojima se uistinu radi o raspadu Higgsovog bozona, od „pozadine“. Upravo su zbog toga za potvrdu ovog predviđanja korišteni kombinirani podaci ATLAS-a i CMS-a iz prijašnjih godina, sa energijama sudara od 7, 8 i 13 TeV, nad kojima je provedena detaljna statistička analiza.[66]

U svakom slučaju, istraživanja o Higgsovom bozonu i danas predstavljaju jedno od najzbudljiviji i najdinamičnijih područja moderne fizike. Iz godine u godinu razvijaju se sve napredniji detektori i jači akceleratori, količina izmjerenih i obrađenih podataka je sve veća, a sa samim time raste i naše znanje o prirodi elementarnih čestica. Paralelno s tim,

<sup>78</sup> Slika je preuzeta iz [62]. (Izvor: ATLAS Collaboration/CERN)

Standardni model se može ili uvriježiti kao prihvaćena teorija, ili će se možda, jednog dana, zamijeniti i sa nekom prikladnijom, općenitijom teorijom!

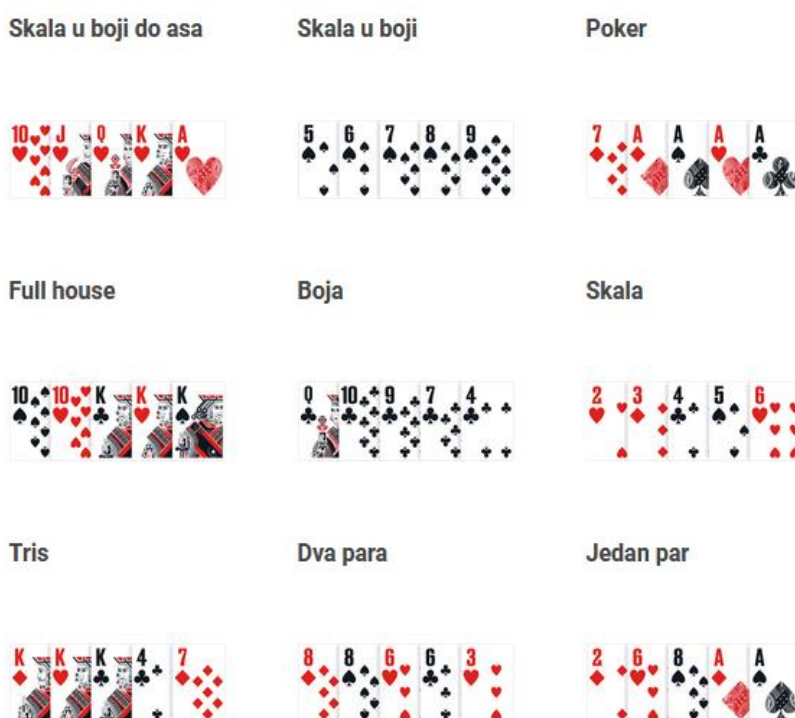
Za kraj, spomenimo samo jednu od tema kojima se bave znanstvenici i istraživači u ATLAS-u u 2020. godini. Naime, korištenjem preciznih mjerenja svojstava Higgsovog bozona, oni pokušavaju ispitati predviđanja potencijalne teorije MSSM<sup>79</sup> koja bi predstavljala proširenje teoriji Standardnog modela, a u kojoj bi moglo postojati čak pet „Higgsovih bozona“ – dva skalarna ( $h$  i  $H$ ), jedan pseudoskalarni ( $A$ ) i dva električki nabijena ( $H^{+/-}$ )![67]

#### 4.7. Igra „ČESTIČNI POKER“

Jednako kao i u ostalim do sada opisanim igrama, i ovoj igri koristi se špil sa kartama koje predstavljaju elementarne čestice.

Osnovna ideja ove igre jest da se klasične „ruke“ (odnosno kombinacije od po pet karata) u klasičnom pokeru zamijene sa odgovarajućim kombinacijama karata iz takvog špila, pri čemu su kombinacije u direktnoj vezi sa stvarnim svojstvima elementarnih čestica.

Za podsjetnik, na slici u nastavku nalaze se nazivi i konkretni primjeri različitih „ruku“ koje postoje u klasičnom pokeru:<sup>80</sup>



Slika 52 – Primjeri različitih „ruku“ u klasičnom pokeru

<sup>79</sup> engl. *Minimal Supersymmetric Standard model* – Minimalni Supersimetrični Standardni Model

<sup>80</sup> Slika je preuzeta iz [77].

Prema pravilu standardnog pokera (pa tako i u ovoj igri), ako dva igrača imaju jednaku „ruku“, pobjeđuje onaj koji ima karte veće jakosti. U klasičnim kartaškim igrama, jakost karata uglavnom je određena redoslijedom: A, K, Q, J, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2.

Međutim, u čestičnom pokeru, jakost karata je jednostavno određena (pretpostavljenim) *masama čestica* koje su prikazane kartama! Na taj način, poredak jakosti karata slaže se sa principom da su čestice viših masa rjeđe u prirodi, pa samim time predstavljaju i vrjednije karte.[78] Poredak čestica koji se mogu prikazati kartama iz špila po masama nalazi se u sljedećoj tablici:

<i>Naziv čestice</i>	<i>Masa (MeV/c<sup>2</sup>)</i>
$\nu_e$	$< 3 \cdot 10^{-6}$
$\nu_\mu$	$< 0,19$
$e^-$	0,511
$u$	$\cong 2,2$
$d$	$\cong 4,7$
$s$	$\cong 96$
$\mu^-$	105,7

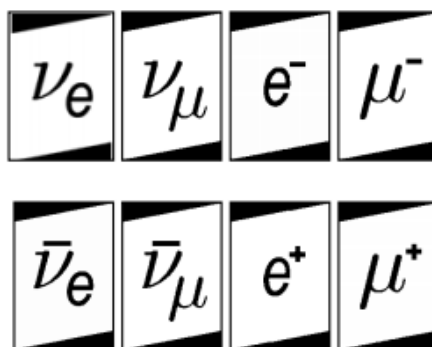
Tablica 18- Čestice koje se mogu prikazati kartama iz špila poredane po masama<sup>81</sup>

(Napomena: mase antičestica jednake su masama njihovih odgovarajućih čestica).

Iz toga slijedi sljedeći poredak karata po jakosti:

- LEPTONI I ANTILEPTONI

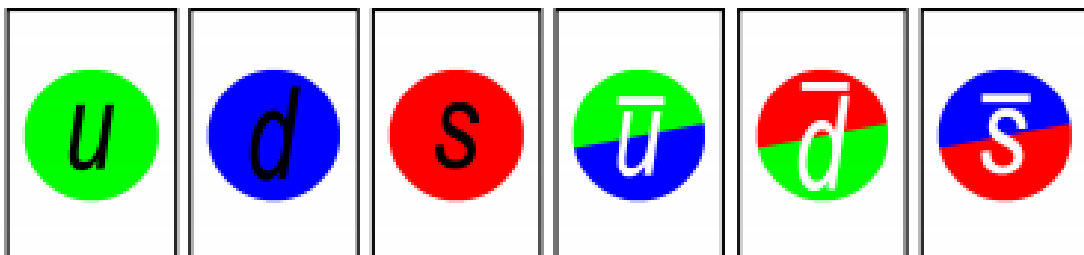
Napomena: Leptoni iz gornjeg reda i antileptoni iz donjeg reda *jednako su jaki*.[78].



Slika 53 - Poredak leptona i antileptona po jakosti (Jakost karata raste s lijeva prema desno.)

Podaci za konstrukciju Tablice 18 preuzeti su iz Tablice 3 (str. 12) i Tablice 7 (str. 20).

- KVARKOVI I ANTIKVARKOVI



Slika 54- Poredak po jakosti kvarkova i antikvarkova (Jakost karata raste s lijeva prema desno)

Napomena: Kao što je vidljivo na gornjoj slici, za razliku od leptona i antileptona, *antikvarkovi su općenito jači od kvarkova!*<sup>82</sup>[78] Boje kvarkova i antikvarkova nisu bitne za poredak prema jakosti, već se gledaju samo njihovi okusi.

Kod pokera sa elementarnim česticama, ruke imaju jednake nazive u odnosu na one u klasičnom pokeru.<sup>83</sup> Međutim, zbog činjenice da karte predstavljaju elementarne čestice, postoje sljedeće kombinacije poredane od najmanje vrijedne do najvrjednije <sup>84</sup>:

- *NAJJAČA KARTA* – U slučaju da niti jedan od igrača nema vrjedniju kombinaciju karata, pobjeđuje onaj igrač koji ima najjaču kartu.
- *JEDAN PAR* – *Može se raditi o paru hadrona ili leptona:*  
 → *HADRONSKI PAR = MEZON* (Kombinacija kvarka i antikvarka koja mora biti neutralna u boji) Primjeri:



Slika 55- Primjeri parova mezona u čestičnom pokeru

<sup>82</sup> Što se i slaže sa činjenicom da su antikvarkovi rjeđi od kvarkova – kako u prirodi općenito, tako i špilu.

<sup>83</sup> Jedina razlika je u tome što, u čestičnom pokeru, ne postoji kombinacija karata koja bi odgovarala „boji“. Naime, uvođenje boja u ovu igru nije se moglo uspješno izvesti obzirom na to da leptoni i antileptoni nemaju svojstvo obojanosti, kao niti validni hadroni, a kombinacija od, primjerice, pet crvenih kvarkova nije se činila prirodnom niti prikladnom.[78]

<sup>84</sup> Pravila i inspiracija za slike (primjere) su preuzeti iz [73] i [78]

→ *LEPTONSKI PAR* – Jednako kao hadronski par, sastoji se od čestice i antičestice. U ovom slučaju radi se o *leptonu i antileptonu*, pri čemu se različite kombinacije mogu podijeliti u sljedeće tri grupe:

a) *Električki neutralan par, lepton i antilepton dolaze iz iste obitelji*



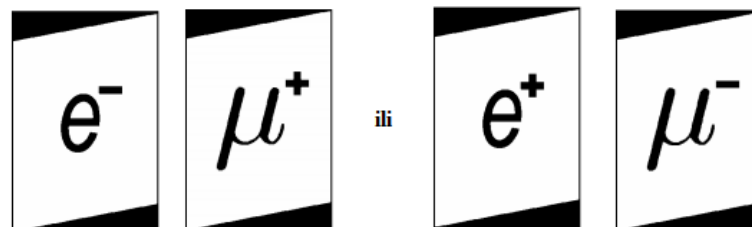
Slika 56- Primjeri dva para u čestičnom pokeru koji su iz iste obitelji i električki su neutralni. Prvi par (lijevo) je par mionskog neutrina i antineutrina, a drugi par (desno) predstavlja elektron i pozitron. Mogući parovi su još i (dakle  $\nu_e$  i  $\bar{\nu}_e$  te  $\mu^{-}$  i  $\mu^{+}$ )

b) *Električki nabijen par, lepton i antilepton dolaze iz iste obitelji*



Slika 57- Primjeri dva para u čestičnom pokeru koji su iz iste obitelji, ali imaju ukupni električni naboj različit od nule. Mogući parovi su još i  $e^{-}$  i  $\bar{\nu}_e$  te  $\mu^{+}$  i  $\nu_{\mu}$ .

c) *Električki neutralan par, lepton i antilepton su iz različitih obitelji*



Slika 58- Moguće kombinacije električki neutralnih parova u kojima čestice isu iz iste obitelji

- *DVA PARA* – Moguće je imati (poredano od najvrjednijeg do najmanje vrijednog para) dva hadrona, hadron i par leptona, ili dva para leptona.
- *TRIS* = Barion ili antibarion neutralan u boji, u kojem su svi kvarkovi ili antikvarkovi različitih okusa!<sup>85</sup>

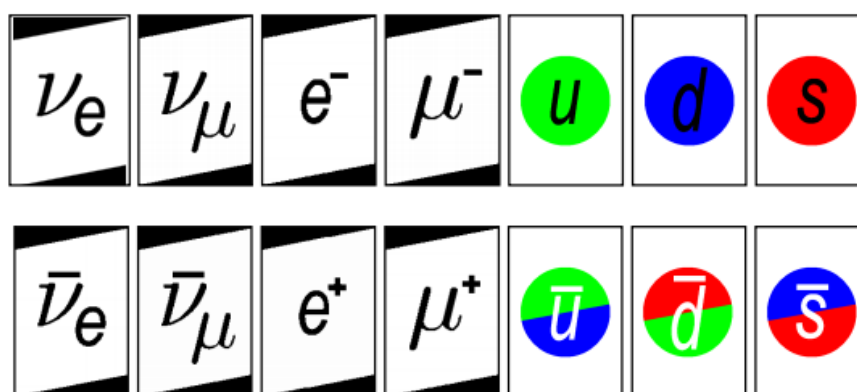
Dakle, radi se o bilo kojoj kombinaciji kvarkova  $u d s$  ili  $\bar{u} \bar{d} \bar{s}$  koja je neutralna u boji! Na primjer:



Slika 59- Primjeri za tris – Skupina od tri kvarka različitih okusa i boja (lijevo) ili tri antikvarka različitih okusa i antiboja (desno)

- *SKALA* = Niz poredanih karata

Niz karata mora pratiti redoslijed dan na Slici 60. Pritom je važno znati da nema razlike u odnosu na antičestice i čestice, odnosno karata na istom mjestu u donjem i gornjem redu, tako da se antičestice i čestice pri formiranju skale mogu „križati“. Također, skala se može formirati i „kružno“, na primjer tako da nakon  $s$  kvarka slijedi elektronski neutrino. Za formiranje skale, boja kvarkova ne igra nikakvu ulogu.



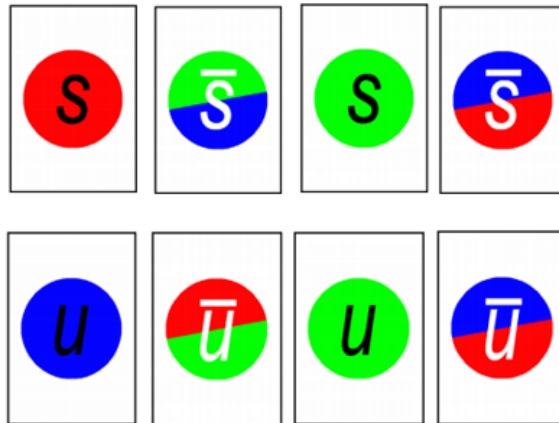
Slika 60- Redoslijed za određivanje skale

Primjerice, slijedeći niz predstavlja važeću skalu:  $\mu^+$ ,  $u$ ,  $d$ ,  $\bar{s}$ ,  $\nu_e$  i  $\bar{\nu}_e$ . [78]

<sup>85</sup> Prirodno bi bilo definirati tris kao bilo koji barion- odnosno bilo koja tri kvarka različitih boja. Međutim, obzirom na broj karata u špilu, u tom slučaju bilo bi više različitih kombinacija koje predstavljaju tris nego kombinacija koje predstavljaju dva para. Zbog toga je, kako bi igra po vjerojatnostima bila što sličnija klasičnom pokeru, uvedena je restrikcija da za tris svi kvarkovi moraju biti *različitih* okusa! [78]

- *FULL HOUSE = TRIS* (Bilo koji hadron; ne moraju svi kvarkovi biti različiti) + *LEPTONSKI PAR* (Bilo koja od ranije navedenih kombinacija leptona i antileptona)
- *POKER* – 4 jednake vrste čestice, ali mora se raditi o dvije čestice i dvije antičestice
  - a) *Poker s hadronima* – dva para kvarka i njegovog odgovarajućeg antikvarka (odgovarajućih boja i antiboja da parovi budu neutralni u boji), pri čemu su parovi jednakog okusa.

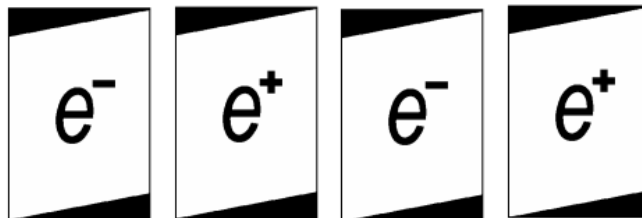
Primjeri:



Slika 61 - Primjeri za "poker" sa kvarkovima u čestičnom pokeru.

- b) *Poker s leptonima* – dva para jednakih lepton-antilepton parova

Primjer:

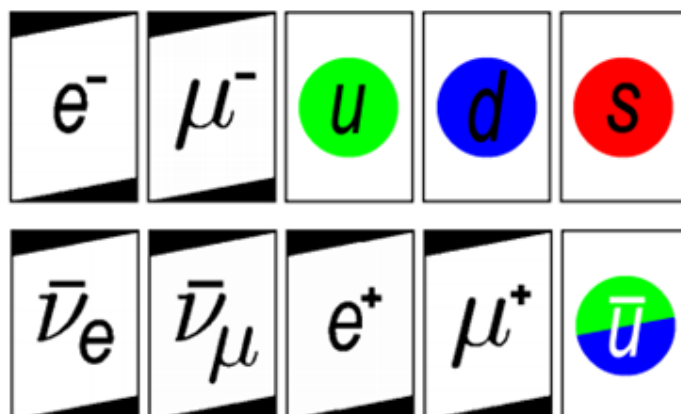


Slika 62- Primjer za "poker" s leptonima u čestičnom pokeru

(Moguće su još i kombinacije  $\mu^- \mu^+ \mu^- \mu^+$ ,  $\nu_e \bar{\nu}_e \nu_e \bar{\nu}_e$  i  $\nu_\mu \bar{\nu}_\mu \nu_\mu \bar{\nu}_\mu$ .)

- *SKALA U BOJI* – Skala kod koje su sve karte ili čestice ili antičestice!

Dakle, karte moraju pratiti redoslijed ili gornjeg reda na Slika 60, ili donjeg reda na istoj slici. Primjeri skale u boji nalaze se na sljedećoj slici:



Slika 63- Primjeri skale u boji. Gornji red predstavlja primjer skale sa česticama, a donji red skalu sa antičesticama. Karte u obje skale poredane su prema redoslijedu zadanom gornjim i donjim redom karata na Slika 60.

- **KRALJEVSKA BOJA**<sup>86</sup> –Skala u boji najveće jakosti

Radi se, dakle o skupini karata  $e^+, \mu^+, \bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ .



Slika 64- Primjer kraljevske boje (koja predstavlja najjaču "ruku" u čestičnom pokeru)

Ovako definirane kombinacije karata povezane su sa kombinacijama u klasičnom pokeru i to ne samo prema svojim svojstvima nego i prema redoslijedu vjerojatnosti posjedovanja pojedinih kombinacija, što je vidljivo u sljedećoj tablici:

Kombinacija	% [poker]	% [ČESTIČNI POKER]
<b>Jedan par</b>	42,3	43,3384
<b>Dva para</b>	4,75	7,2982
<b>Tris</b>	2,11	6,2062
<b>Skala</b>	0,392	3,915
<b>Full house</b>	0,144	1,3926
<b>Poker</b>	0,024	0,6424
<b>Skala u boji</b>	0,00139	0,5322
<b>Kraljevska boja</b>	0,000154	0,033

Tablica 19- Usporedba vjerojatnosti klasičnog poker s pet karata i čestičnog pokera<sup>87</sup>

<sup>86</sup> engl. „Royal Flush“ – najjača kombinacija (ruka) u klasičnom pokeru.

<sup>87</sup> Podaci za konstrukciju tablice preuzeti su iz [78].



Upravo zbog toga, pravila i tijek igre mogu biti jednaki kao i kod klasičnih varijanti pokera (5 karata, Texas Hold'em, Omaha).<sup>88</sup> Zbog toga bi ovakva igra mogla biti posebno zanimljiva i jednostavna za učenje ljudima koji su upoznati sa pokerom.

Međutim, autori igre u [78] spominju i napredniju verziju igre, koju planiraju predstaviti u budućnosti, koja bi imala određenih sličnosti sa pokerom, ali bi imala i veću fizikalnu pozadinu. U takvoj igri bi i sam tijek igre imao veze sa svakodnevnim životom fizičara.<sup>89</sup>

#### **4.8. Igra „KVARKOVSKI RATOVI“**

Ova avanturistička igra razvijena je u Mađarskoj<sup>90</sup>, gdje je i uspješno testirana na dvadesetak učenika koji su bili sudionici Ljetnog kampa znanstvenog kluba „Berze“ u selu Visznek. Učenicima se igra jako svidjela, jer je rezultirala s puno veselja i akcije te je testirala njihovu kreativnost, a uz to, učenici su utvrdili poznavanje čestične terminologije te im se uspješno približio koncept identifikacije i otkrivanja elementarnih čestica (koji ponekad, poput traženja Higgsovog bozona može biti dosta kompliciran, ali i zadovoljavajući kad se čestica konačno identificira).[74]

Igra je zasnovana na kartama koje predstavljaju elementarne čestice kao i na takozvanoj igri predviđenoj za igranje na otvorenom „Mađarski ratovi brojeva“, za koju su kao utjecaj poslužili motivi iz Ratova zvijezda.[74]

Igra „Kvarkovski ratovi“ je timska igra – igrači se tako moraju podijeliti u dvije grupe, pri čemu se preporučuje da svaka grupa imaj barem pet ili više igrača, kako bi igrači mogli razvijati različite taktike, a igra trajati duže. U svakom timu potrebno je odrediti i jednu osobu koja će biti vođa tima, pri čemu se vođi jednog tima, prema protagonistima Ratovima zvijezda može dodijeliti nadimak „Luke Skywalker“, a drugome „Darth Vader“.[74]

Za igru su potrebne karte sa elementarnim česticama koje su navedene u prilogu knjižice [13], plastični držači kartica kao i elastične gumice u dvije različite boje, kao što je prikazano na sljedećoj slici:

---

<sup>88</sup> Doduše, u [78] autori navode da se još nije detaljno testirala mogućnost igranja Texas Hold'em i Omaha varijante.

<sup>89</sup> Primjerice, „punjenje praznih žetona tumačilo bi se kao molba za dodjelu bespovratnih sredstava.“[78]

<sup>90</sup> Igra je nastala prema ideji profesorice fizike Ágote Lang, a autori su navedeni u [74].



Slika 65 - Potreban pribor za igru "Kvarkovski ratovi"<sup>91</sup>

Prije samog početka igre, voditelj igre (na primjer, profesor fizike ili mentor u znanstvenom kampu) u plastične držače mora postaviti karte kao što je prikazano na slici, tako da one predstavljaju neke od sljedećih kombinacija:

- Kombinacije od tri karte – Mora se raditi o *barionima*, [74] odnosno od karata koje predstavljaju tri kvarka koji su svi različitih boja.
- Kombinacije od četiri karte – Moraju biti sastavljene od *mezona* (parova kvarka i antikvarka koji su zajedno neutralni u boji) ili od *lepton-antilepton* parova. [74]
- Preporuka je da se za vođe timova izrade posebne kombinacije koje korespondiraju sa elementarnim česticama za čija su otkrića dodijeljene Nobelove nagrade [74] – primjerice kombinacije koje bi odgovarale produktima raspada Higgsovog bozona<sup>92</sup>  $H^0$  ili  $\Omega^-$  bariona.

Potom se formiraju timovi, te se igrači upoznaju sa pravilima igre. Različiti timovi se potom međusobno udaljavaju, a svaki član tima dobiva plastične držače s kartama. U svakom timu potrebno je odabrati vođu tima, nakon čega timovi dobivaju nekoliko minuta (2-3 minute) kako bi mogli dogovoriti planove i strategiju kojom će pokušati pobijediti. [74]

<sup>91</sup> Slika je preuzeta iz [74]

<sup>92</sup> Više o Higgsovom bozonu može se pročitati u poglavlju 4.6, a kombinacije koje odgovaraju detektiranim produktima njegovog raspada dane su u Tablici 16 (str. 84).

Prije početka igre, igrači moraju dobivene plastične držače s kartama staviti na glavu pomoću elastičnih gumica, (na način da ih ne vide igrači suprotnog tima), pri čemu se svakom timu dodijele gumice jednake boje kako bi se lakše mogli međusobno prepoznati.

Poželjno bi bilo da svaki igrač upamti vlastitu kombinaciju čestica (onu koja se nalazi na njihovim glavama), kako bi mogli lako provjeriti jesu li tijekom igre identificirani ili ne.[74]

Naime, pobjedu igri pojedini tim može ostvariti na dva moguća načina – identifikacijom svih igrača suprotnog tima (koja se ostvaruje glasnim prozivanjem kombinacija elementarnih čestica koje se nalaze na njihovim glavama) ili pronalaženjem i identifikacijom (glasnim čitanjem) čestičnog identiteta vođe (odnosno kombinacije elementarnih čestica koju vođa suprotnog tima nosi).[74] S obzirom na to da vođe timova nose kombinacije koje korespondiraju s  $H^0$  ili  $\Omega^-$  česticama, identifikacija njihovih kombinacija (odnosno produkata raspada tih čestica) odgovarala bi eksperimentalnoj potvrdi njihovog postojanja (koja je do tada bila samo teorijski pretpostavljena), zbog čega su Peter W.Higgs i Francois Englert u 2013., kao i Murray Gell-Mann u 1969. dobili Nobelovu nagradu.[74]

Pravila i tijek igre objašnjeni su u nastavku:

#### **4.8.1. Pravila i tijek igre**

*„Jednom davno u jednom dalekom, dalekom selu...*

*Vrijeme je čestičnih ratova. Pobunjene učeničke grupe, napadajući iz svojih skrivenih baza, izvojevali su svoju prvu pobjedu protiv Carstva zlih čestica.*

*Tijekom bitke, učenici špijuni uspjeli su ukrasti tajni plan za ultimativno oružje Carstva, Kvarkovsku zvijezdu, čestični akcelerator sa snagom dovoljnom da uništi čitav Planet.*

*Progonjena tajnim agentima Carstva, Princeza Lepton bježi kući, čuvajući ukradene planove koji mogu spasiti njen narod i vratiti asimptotsku slobodu njihovim kvarkovima i Ranom Svemiru... “[74] / Uvod<sup>93</sup>*

Kao što je objašnjeno u prethodnom potpoglavlju, prvo je potrebno podijeliti igrače u dva različita tima, pri čemu igrači moraju u oba tima izabrati svog vođu. Potom igrači dobivaju nekoliko minuta kako bi dogovorili svoj plan i strategiju, nakon čega stavljaju svoje kombinacije elementarnih čestica na glave, a igra može započeti.

---

<sup>93</sup> Prema uvodu u film Ratovi zvijezda –Epizoda IV – Nova nada

Preporuka je da se ova igra održava na otvorenom prostoru, što je izvrstan način za provesti dan. U tom slučaju, učenici, a posebno njihovi mentori moraju provjeriti postoje li na terenu predviđenom za igru ikakve potencijalne opasnosti ili zamke. Ako nije moguće pronaći siguran vanjski prostor, igra se može održati i u nekim unutarnjim prostorima, kao što je primjerice školska sportska dvorana.[74]

Prema uzoru na igru „*Mađarski ratovi brojeva*“, ali i zbog sigurnosti igrača, u ovoj igri *nije* dozvoljeno koristiti svjetlosne mačeve, niti bilo kakve druge rekvizite koji bi mogli poslužiti kao „oružje“, a igrači *ne smiju* tijekom igre rukama pokrivati karte koje im se nalaze na čelu. Također, nije dozvoljeno „*Štovati Zemlju*“ na način da se legne i čelom dotakne tlo, čime bi se prikrila kombinacija elementarnih čestica na čelima igrača. (Naime, osim što bi takvo pravilo učinilo igru manje zanimljivom, u ovakvim situacijama osobu bi se lako moglo identificirati na način da igrači suprotnog tima natjeraju osobu da se pomakne sa tla i u tom trenutku pročitaju njenu kombinaciju karata).[74]

Međutim, igračima je dozvoljeno prekrivanje njihovih kombinacija na čelu uz pomoć drugih objekata u njihovoj okolini (primjerice drveća ili zidova). Osim toga, igrači istog tima mogu se udružiti u grupe od dva do četiri igrača i skupiti glave tako da međusobno sakriju njihov čestični identitet.[74] Ovakva metoda smanjuje mogućnost da se identificira identitet takvih igrača, ali valja uzeti u obzir i da igrači koji se koriste takvom taktikom nisu u stanju brzo „napadati“ igrače suprotnog tima, odnosno uočiti i identificirati njihove čestične kombinacije.

Primjer „suprotne“ taktike koja pruža brz napredak prema protivnicima je takozvana „jurnjava“, u kojoj igrač brzo trči, a pritom maše glavom lijevo-desno, kako bi protivnicima bilo teže identificirati njegovu kombinaciju čestica. Međutim, ovakva taktika je fizički zahtjevnija, te za uspješno izvođenje zahtijeva vježbu budući da postoji veći rizik identifikacije igrača.[74]

Prema autorima igre „*najbolja taktika je kretati se tako da je čelo pokriveno objektima na terenu što je više moguće, kretati se sporo ako si zaštićen, a juriti kroz nezaštićena područja kako bi se približilo suparničkom timu.*“[74]

Svi igrači tijekom igre moraju na glavi zadržati dobivene kombinacije sa elementarnim česticama i ne smiju ih skidati, te ih se može isključiti iz igre samo otkrivanjem njihovih kombinacija čestica, odnosno čitanjem elementarnih čestica koje oni nose. Igrači koji su na taj način identificirani moraju postati neaktivni - više ne smiju sudjelovati u „napadu“,

odnosno pokušajima čestične identifikacije igrača u suprotnom timu, kao niti u organizaciji obrane svog vođe. Dakle, u trenutku kada igrač postane identificiran, on se isključuje iz igre, i može samo u tišini promatrati njen daljnji tijek.[74]

Budući da je za pobjedu u igri dovoljno identificirati elementarne čestice koje su na glavi vođe suprotnog tima, tijekom igre mogu se razvijati različite taktike. Primjerice, kada u jednom timu preostane još samo nekoliko igrača, oni i dalje mogu pokušati „provaliti“ među protivnike, pokušati pronaći slabe točke u njihovoj „obrani“ te tako otkriti čestični identitet njihovog vođe i samim time pobijediti, na sličan način kao što i malena skupina pobunjenika može pobijediti veliku vojsku *Carskih trupa* u *Ratovima zvijezda* napadom na *Zvijezdu smrti* u trenutku njihove slabosti.[74]

Vođe timova zbog toga moraju biti posebno pažljivi – primjerice, oni se mogu tijekom cijele igre skrivati u sigurnom i skrovitom području, kojeg će suigrači u njegovom timu pokušati zaštititi. Primjerice, tijekom testiranja igre „*Kvarkovski ratovi*“ u selu Visznek, vođa *Saveza pobunjenika* koji je nazvan Luke Skywalker i koji je nosio čestičnu kombinaciju koja predstavlja  $\Omega^-$  česticu sakrio se iza pomičnog platna za projektor u učionici, a vođa suparničkog tima – Darth Vader (koji je nosio kombinaciju korespondentnu sa  $H^0$ ), sakrio se vani, usred plasta sijena!



Slika 66 - Fotografija na kojoj su vidljiva mjesta na koja su se sakrili vođe timova prilikom igre<sup>94</sup>

Tijekom igre, članovi *Saveza pobunjenika* (čiji vođa je nosio  $\Omega^-$  kombinaciju) uspjeli su identificirati i tako eliminirati iz igre sve članove suparničkog tima. Međutim, čak i u toj situaciji, preostali članovi *Saveza pobunjenika* imali su poteškoća sa lociranjem vođe

---

<sup>94</sup> Slika je preuzeta iz [74].

suparničkog tima (Darth Vader), s obzirom na njegovo vješto sakrivanje u platu sijena. Vjerojatno je to bio prvi put u povijesti čestične fizike da se nakon teške potrage, simbolični „Higgsov bozon“ pronašao i konačno identificirao upravo u platu sijena![74]

#### 4.8.2. Za koga je namijenjena igra „Kvarkovski ratovi“?

Zbog svoje avanturističke naravi i jednostavnih pravila koja su prožeta fizikalnom tematikom, ova igra je odlična aktivnost za djecu i učenike u znanstvenim kampovima koji bi bili vezani za fiziku elementarnih čestica. Kao što i sami autori igre navode, „Igra „Kvarkovski ratovi“ okupila je obične ljude poput učenike osnovnih i srednjih škola, profesora i znanstvenika, da čine izvanredne stvari, koje su pritom postale nešto veće od njih samih.“[74]

Međutim, poželjno je da učenici prije samog igranja postanu upoznati sa osnovnim konceptima i terminologijom fizike elementarnih čestica. Primjerice, tijekom znanstvenog kampa u Viszneku gdje je igra testirana, učenici su se prvo upoznali sa određenim kartaškim igrama kvarkovske materije koje su navedene i opisane u poglavljima 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 i 4.6. Tako su učenici prvo naučili (ili utvrdili znanje) o postojanju dvije vrste elementarnih čestica - kvarkova i leptona te su naučili da su u igri kvarkovi prikazani kartama u tri moguće boje – crvenoj, zelenoj i plavoj (čime je naznačena njihova mogućnost djelovanja jakom interakcijom), dok su leptoni označeni crno-bijelim kartama. Učenici su se upoznali sa konceptom boje kvarkova, i njenom analogijom sa optičkim miješanjem boja u formiranju različitih hadrona, kao i sa svojstvima različitih leptona.[74]

Nakon takvog uvodnog „treninga“ uz kartaške igre, bilo je potrebno objasniti učenicima pravila igre, te je igra „Kvarkovski ratovi“ mogla započeti!

Što se tiče razine predznanja igrača, i ova igra se, poput igara 4.2, 4.5 i 4.6 može prilagoditi na nekoliko različitih načina, tako da postoje tri razine igre:

- RAZINA 1 – POČETNIČKA RAZINA

Na ovoj razini, igrači mogu identificirati suparnike čitanjem njihovih pojedinačnih karata – primjerice: „crveni  $u$ , zeleni  $d$ , plavi  $u$ “ ili „zeleni  $u$ , antizeleni  $u$  i elektron-pozitron par!“ Međutim, trebali bi zapamtiti kombinacije koje identificiraju vođe timova.[74]

- RAZINA 2 – SREDNJE TEŠKA RAZINA

Na ovoj razini, igračima je potrebno objasniti da se  $\Omega^-$  barion sastoji od crvenog, plavog i zelenog  $s$  kvarka, a da se Higgsov bozon može detektirati njegovim raspadom na dva nabijena lepton-antilepton para koji su dani u Tablici 16. [74]

- RAZINA 3 – NAPREDNA RAZINA

Iako se preporučuje da učenici započnu igranje ove igre na prethodnim razinama, kako bi se zabavili a pritom i učili, napredniji učenici mogu se okušati i u ovoj zahtjevnijoj razini. U ovom slučaju, identifikacija igrača „čitanjem“ pojedinačnih elementarnih čestica više nije dostatna, već je za uspješnu identifikaciju igrača suprotnog tima potrebno navesti ime čestice koja je predstavljena kombinacijom karata na njegovoj glavi. Primjerice, učenici moraju znati da kombinacija  $u, u$  i  $d$  kvarka neutralna u boji (bijela) predstavlja proton, da „bijela“ kombinacija kvarkova  $u, d$  i  $d$  predstavlja neutron, a bijela kombinacija  $u$  i  $\bar{d}$  pozitivni pion, i tako dalje...[74] (popis različitih bariona i mezona koji se mogu dobiti od karata iz špila navedeni su u tablicama Tablica 25 i Tablica 26) Prilikom takvog načina identificiranja, preporučuje se da tijekom cijele igre profesor ili mentor nadgleda situaciju, kako bi mogao potvrditi jesu li pojedini pokušaji identifikacije bili uspješni ili ne.

#### 4.9. „RUBIKOVA KOCKA KVARKOVSKJE TVARI“

U ovoj igri, karte koje predstavljaju  $u, s$  i  $d$  kvarkove i njihove antikvarkove o kojima je bila riječ u prethodnim poglavljima postavljaju se na površinu  $3 \times 3$  Rubikove kocke.

Slaganje takve kocke dovodi do simboličke reprezentacije gotovo savršenog fluida kvarkovske materije, a pritom se igrači mogu upoznati sa osnovnim svojstvima takvog stanja, u kojem prevladava visoka gustoće entropije, ukupna neutralnost u boji i ukupan barionski broj jednak nuli.[76]

Igra je razvijena 2014. godine, točno 70 godina nakon rođenja tvorca Rubikove kocke<sup>95</sup>, 40 godina nakon nastanka prvog prototipa Rubikove kocke, 60 godina nakon utemeljenja CERNA i 10 godina nakon otkrića savršene fluidnosti kvarkova prilikom sudaranja atoma zlata u RHIC akceleratoru![76]

---

<sup>95</sup> Erno Rubik, mađarski izumitelj i tvorac Rubikove kocke rođen je 13.srpnja 1944.godine.[79]

Prikaz takve verzije Rubikove kocke sa kvarkovima i antikvarkovima nalazi se na sljedećim slikama<sup>96</sup>:



Slika 68 – Fotografija Rubikove kocke s kvarkovskom materijom



Slika 67 - Fotografija druge strane Rubikove kocke s kvarkovskom materijom

Dakle, uz pomoć obojenih karata koje predstavljaju kvarkove i antikvarkove iz [13], može se izraditi ovakva kocka uz sljedeće upute:

- Tri strane koje se spajaju u jednom od kutova kocke moraju imati kvarkove crvene, zelene i plave boje. Dijagonalno suprotan kut kocke mora biti mjesto na kojem se spajaju tri anti-boje (anti-crvena, anti-zelena i anti-plava).[76]
- Boje na kocki moraju biti postavljene tako da su kvarkovi određenih boja na suprotnoj strani od antikvarkova istih anti-boja. Na primjer, crveni kvarkovi su na suprotnoj strani od zeleno-plavih antikvarkova.[76]

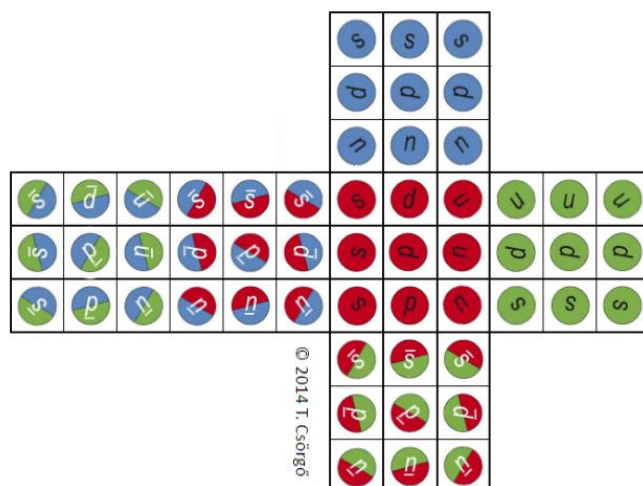
Samim time, suprotne strane kocke ukupno se mogu „zbrojiti“ u bijelu boju, a zbroj svih čestica i antičestica predstavljenima kartama na kocki kao cjelina je neutralan u boji.

Shema koja odgovara takvim pravilima nalazi se na sljedećoj slici:

---

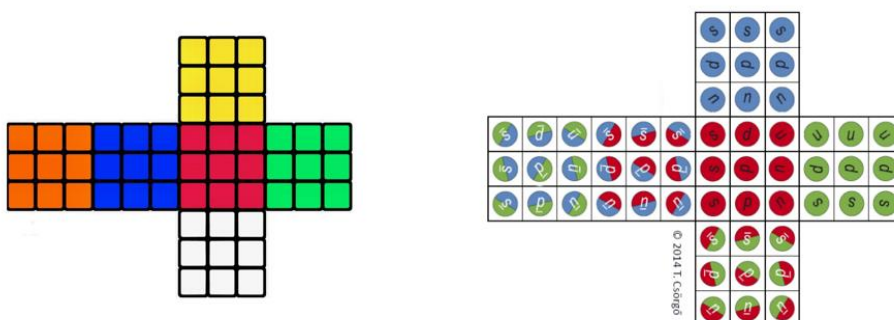
<sup>96</sup> Slike su preuzete iz [75]. Napomena: „Rubikova kocka i njen trodimenzionalan prikaz kao i bilo kakva njena grafička ili fotografska reprezentacija u bilo kojem obliku, obojena ili neobojena, sadržavala ona RUBIK'S CUBE ime ili logo ili ne, zaštićena je u cijelom svijetu zakonima intelektualnog vlasništva. Rubik's Brand Ltd. zadržava sva međunarodna prava Rubikove kocke. Autorsko pravo pripada Ernő Rubiku, izumitelju Rubikove kocke koji je dao puno i ekskluzivno ovlaštenje tvrtki Rubik's Brand Ltd za licenciranje i upravljanje njegovim pravima, kao i provođenje bilo kakvih potrebnih pravnih sredstava u slučaju bilo kakvog kršenja tih prava.“[76]





Slika 69 - Raspored kvarkova i atikvarkova za  $3 \times 3$  kocku<sup>97</sup>

Takav dizajn Rubikove kocke može se usporediti sa rasporedom boja u originalnoj Rubikovoj kocki, kao što je i prikazano u nastavku:



Slika 70 - Usporedba boja na klasičnoj  $3 \times 3$  Rubikovoj kocki (lijevo) i Rubikovoj kocki s kvarkovskom materijom (desno)<sup>98</sup>

Suprotne plohe originalne Rubikove kocke obojane su na način da je jedna strana u određenoj boji, a njoj suprotna strana je u boji koja je nastala miješanjem te iste boje sa žutom bojom. Tako se, kada se stranice formiraju u kocku, suprotno bijeloj plohi nalazi žuta ploha, nasuprot plave plohe nalazi se zelena (plava + žuta) ploha, a suprotno crvenoj plohi smješten je narančasta (crvena + žuta) ploha. Kod kocke sa kvarkovskim sadržajem, nasuprotne plohe odgovaraju boji i njejoj anti-boji što prikladno reflektira ukupnu neutralnost u boji kvarkovske materije.[76] Matematička svojstva klasične i kvarkovske Rubikove kocke navedena su u sljedećoj tablici<sup>99</sup>:

<sup>97</sup> Slika je preuzeta iz [76].

<sup>98</sup> Slika je nastala kombiniranjem Slike 69 i rasporeda boja originalne Rubikove kocke koji je preuzet iz [80].

<sup>99</sup> Podaci za konstrukciju tablice preuzeti su iz [76].

<b>ORIGINALNA RUBIKOVA KOCKA</b>	<b>RUBIKOVA KOCKA KVARKOVSKJE TVARI</b>
3×3×3 kocka, 6 boja 8 kockica u kutovima: 3 boje, 3 pozicije 12 kockica na rubovima: 2 boje, 2 pozicije 6 kockica u centru plohe: 1 boja, 1 pozicija Samo parne permutacije!	3×3×3 kocka, 3 boje + 3 antiboje 8 kockica u kutovima: 3 boje, 3 pozicije 12 kockica na rubovima: 2 boje, 2 pozicije 6 kockica u centru plohe: 1 boja, 4 pozicije Samo parne permutacije!
<i>Kockice u kutovima:</i> 8! permutacija $3^8 / 3 = 3^7$ mogućih orijentacija <i>Kockice na rubovima:</i> 12! permutacija $2^{12} / 2 = 2^{11}$ mogućih orijentacija <i>Kockice u centru:</i> nema orijentacije Kocka: indiferentne globalne orijentacije	<i>Kockice u kutovima:</i> 8! permutacija $3^8 / 3 = 3^7$ mogućih orijentacija <i>Kockice na rubovima:</i> 12! permutacija $2^{12} / 2 = 2^{11}$ mogućih orijentacija <i>Kockice u centru:</i> $4^6 / 2 = 2^{11}$ orijentacija Kocka: 6×4 različitih orijentacija
<b>Broj mogućih stanja:</b> $8! \times 3^7 \times 12! \times 2^{11} \times 1 \times 1/2$ $\sim 4,3 \times 10^{19}$	<b>Broj mogućih stanja:</b> $8! \times 3^7 \times 12! \times 2^{11} \times 2^{11} \times 24/2$ $\sim 2,1 \times 10^{24}$

Tablica 20- Usporedba matematičkih svojstava originalne i kvarkovske Rubikove kocke

Važno je napomenuti da je položaj  $u$ ,  $s$  i  $d$  kvarkova u sudarima teških iona fizikalno relevantna veličina budući da mase i druga svojstva kvarkova variraju. Zbog toga je potrebno razlikovati fizikalnu orijentaciju Rubikove kocke kvarkovske tvori, koja daje dodatni faktor  $6 \times 4 = 24$  za broj mogućih stanja. Uz to, zbog različitih slova  $u$ ,  $s$  i  $d$  koja se nalaze na kockicama i predstavljaju različite čestice, kockice koje se nalaze u središtima ploha orijentirane su tako da je ukupan broj mogućih konfiguracija Rubikove kocke kvarkovske tvori veći nego kod klasične Rubikove kocke.[76]

Prirodni logaritam broja mogućih stanja u ovom slučaju bi odgovarao „entropiji“ kocaka. Ako se tako dobivena entropija podijeli sa ukupnim volumenom kocke (označenim sa  $L^3$ ), dobiva se „gustoća entropije“ pojedinih kocaka. Navedeni izračun entropije i gustoće entropije za obje vrste kocke nalazi se u tablici u nastavku<sup>100</sup>:

<b>NAZIV VELIČINE</b>	<b>ORIGINALNA RUBIKOVA KOCKA</b>	<b>RUBIKOVA KOCKA KVARKOVSKJE TVARI</b>
<i>Broj stanja,</i> $N$	43252003274489856000	212592246494725402112000
<i>Entropija,</i> $S = \ln N$	$\sim 45,21$	$\sim 56,02$
<i>Duljina</i> $L / \text{mm}$	57	57
<i>Gustoća entropije</i> $\sigma = \frac{S}{L^3} / \text{m}^{-3}$	$\sim 2,4 \times 10^5$	$\sim 3,0 \times 10^5$

Tablica 21 - Usporedba fizičkih svojstava originalne i kvarkovske Rubikove kocke

<sup>100</sup> Podaci za konstrukciju tablice preuzeti su iz [76].

Kao što prikazuje Tablica 21, za dobivanje gustoće entropije pojedinih kocaka za obje kocke je uzeta klasična duljina bridova Rubikove kocke od 57 milimetara, koja je optimalna za držanje u rukama. Zanimljivo je to što se tako dobivena gustoća entropije Rubikove kocke kvarkovske tvari može usporediti sa gustoćom entropije savršeno fluidne kvarkovske tvari proizvedene u sudarima teških iona u RHIC i LHC akceleratorima! Tako možemo doći do podatka da bi duljinu bridova Rubikove kocke kvarkovske tvari morali smanjiti sa 57 milimetara na čak  $2 \cdot 10^{-12}$  metara kako bi sama kocka imala jednaku gustoću entropije kao i kvarkovska materija dobivena u akceleratorima![76]

Kako bi se lakše predočila usporedba gustoće entropije kvarkovske tvari u prirodi sa gustoćom entropije Rubikove kocke kvarkovske tvari (koja je određena u Tablici 21), moguće je izračunati gustoću entropije kvarkovskog fluida korištenjem sljedeće formule[76]:

$$\sigma = (1 + c_s^2) \varepsilon / T \quad \text{Jednadžba 7}$$

Pritom  $c_s$  označava brzinu zvuka,  $\varepsilon$  predstavlja gustoću energije koja za savršeni kvarkovski fluid iznosi  $15 \text{ GeV}/f\text{m}^3$ , a  $T$  označava temperaturu za koju je uzeto da u slučaju savršenog kvarkovskog fluida iznosi  $0,22 \text{ GeV}$ . [76] Iz takvih podataka slijedi gustoća entropije savršenog kvarkovskog fluida  $\sigma = 7,5 \cdot 10^{46} \text{ m}^{-3}$  koju možemo usporediti sa ranije izračunatom gustoćom entropije za Rubikovu kocku kvarkovske tvari od  $\sim 3,0 \times 10^5 \text{ m}^{-3}$ .

#### 4.9.1. *Pravila i tijek igre*

Igra s ovakvom kockom predviđena je za jednu osobu, iako se mogu organizirati različita natjecanja u što bržem slaganju u kojima bi se okupio veći broj igrača.[76]

Cilj igre je riješiti kocku, odnosno iz nasumične konfiguracije doći do osnovnog stanja njene boje i okusa. Pritom osnovno stanje označava kombinacije u kojima slova koja predstavljaju  $d$  kvarkove u centralnim kockicama plohe moraju pokazivati prema rubu na kojem se spajaju crvena, zelena i plava stranica kocke, a oznake  $\bar{d}$  koja predstavlja anti  $d$  antikvarkove istovremeno moraju pokazivati prema suprotnoj strani kocke, gdje se spajaju plohe anti-crvene, anti-zelene i anti-plave boje.[76]

Prije samog početka slaganja, igrači mogu proučiti dobivenu kocku i njenu nasumičnu konfiguraciju, nakon čega postavljaju kocku na stol. Moguće je koristiti bilo koju od uobičajenih ustaljenih metoda slaganja klasične Rubikove kocke – korištenjem obje ruke, jedne ruke, zavezanih očiju, pod vodom, i slično.[76]

Ovisno o vještini igrača, postoje tri različite razine igre:

- RAZINA 1 – POČETNIČKA RAZINA

Ova razina namijenjena je početnicima, odnosno onima koji se prvi puta susreću sa slaganjem Rubikove kocke. Kao što i sam autor igre kaže, „*samostalni pokušaji slaganja zahtjevna su zadaća, ali vrijedi pokušati.*“ [76]

Za studente i profesore fizike očekuje se da će biti uspješni u završetku slaganja prve faze<sup>101</sup> (a poneki čak i druge faze) bez previše muke. [76]

Uz pomoć raznih javno dostupnih materijala sa uputama slaganja Rubikovih kocaka koje postoje u današnje vrijeme, igrači početnici bi mogli samostalno složiti kocku prema bojama. Međutim, u tom slučaju, orijentacija  $d$  kvarkova u centrima ploha neće uvijek biti ispravno postavljena, već će oni pokazivati u nasumičnim smjerovima. [76]

- RAZINA 2 – SREDNJA RAZINA

Cilj ove razine je postići konfiguraciju osnovnog stanja boje i okusa. [76] Dakle, nakon što se kocka posloži prema boji, svi  $d$  kvarkovi u centrima trebali bi biti usmjereni prema suprotnim kutovima gdje se spajaju crvena, zelena i plava boja, a svi anti  $d$  antikvarkovi trebali bi biti usmjereni tako da pokazuju prema suprotnim rubovima gdje se spajaju tri različite anti-boje. Samim time, igrači moraju naučiti kako promijeniti orijentaciju centralnih dijelova na plohama kocke, bez da naruše uređenost kocke po bojama.<sup>102</sup> Za ljude koji se bave fizikom, ali nemaju iskustva u slaganju Rubikove kocke ne očekuje se da će samostalno uspjeti u takvom pothvatu [76], ali uz upute im to ne bi trebalo predstavljati problem.

- RAZINA 3 – NAPREDNA RAZINA

Igrači kojima je ova razina namijenjena naučili su kako u potpunosti složiti Rubikovu kocku kvarkovske materije – dakle, dobro su upoznati sa tehnikom pravilne orijentacije centralnih dijelova, odnosno odgovarajućih kvarkova i antikvarkova. U ovom slučaju, izazov za igrače predstavlja pokušaj obaranja vlastitog vremenskog

---

<sup>101</sup> Slaganje Rubikove kocke može se podijeliti u tri različite faze, za čiji je završetak autoru Rubikove kocke – Ernu Rubiku bilo potrebno nekoliko tjedana. [76]

<sup>102</sup> Ovakav problem poznat je pod imenom „Super-kocka“ (Super Cube), „Prilagođena kocka“ (Custom Cube) ili „Kocka sa slikama“ (Picture Cube) [76], a njegovo rješavanje također se može naći u različitim materijalima na internetu.

rekorda koje im je potrebno za slaganje, kao i svladavanje novih i drugačijih metoda i tehnika u samom postupku slaganja (na primjer, slaganje jednom rukom, ili zavezanih očiju).[76]

#### 4.9.2. *Fizikalna pozadina igre- O Rubikovej kocki i njenoj vezi sa kvarkovskom tvari*

Edukacijske vrijednosti Rubikove kocke u razvoju vizualno-spacijalne inteligencije i strategije te poboljšanju pamćenja, koncentracije i ustrajnosti u rješavanju problema, kao i marketinške vrijednosti Rubikove kocke u popularnoj znanosti, tehnologiji, inženjerstvu i matematici<sup>103</sup> opisane su u [81] i [76].

Kako bi se ilustriralo koliko je znanja i vještine potrebno za rješavanje „*Rubikove kocke kvarkovske tvari*“, može se napraviti zgodna procjena. Naime, ako pretpostavimo pokušaj rješavanja kocke samo korištenjem nasumičnih rotacija, uz podatak da je svemir star  $4,35 \cdot 10^{17}$  sekundi, i uz broj mogućih stanja<sup>104</sup> kocke koji otprilike iznosi  $2,1 \cdot 10^{24}$ , može se doći do podatka da bi u jednoj sekundi bilo potrebno rotirati kocku više od 4,8 milijuna puta, ako bismo htjeli riješiti kocku u vremenskom intervalu koji je jednak duljini trajanja svemira.[76] Veoma je fascinantno usporediti takve podatke (koji su nastali nasumičnim potezima) sa stvarnim rekordima u rješavanju Rubikove kocke – Trenutni rekord u slaganju jedne klasične  $3 \times 3$  Rubikove kocke iznosi 3,4 sekunde, a postigao ga je Yusheng Du tijekom Wuhu-Open natjecanja 2018. godine.[82]

Što se tiče povezivanja Rubikove kocke sa teorijskom fizikom, zanimljivo je napomenuti i da je rješavanje Rubikove kocke nedavno zamišljeno kao model kojim bi se mogle opisati promjene u unutrašnjosti crnih rupa prilikom emitiranja Hawkingovih čestica, čime se crna rupa smanjuje, što odgovara i smanjenju njene entropije. Takva analogija crnih rupa koje isparavaju do vakuuma sa rješavanjem Rubikove kocke iz stanja velike početne entropije, odnosno nereda, u stanje nulte entropije može poslužiti kao inspiracija za daljnja izučavanja.[76] Ideju o povezivanju Rubikove kocke i svojstava simetrije kvarkova prvi je predstavio američki matematičar i inženjer S.W. Golomb 1981. godine u članku u kojem je odredio broj obojanih konfiguracija Rubikove kocke.[76]

Marx i suradnici smatrali su Rubikovu kocku svojevrsnim modelom svijeta, u kojem vrijede zakoni očuvanja i pravila transformacije, zbog čega su primijetili da se barioni i mezoni mogu prikazati na Rubikovej kocki na kutnim ili rubnim kockicama.

---

<sup>103</sup> Engl. STEM - Science, Technology, Engineering, and Mathematics

<sup>104</sup> Broj mogućih stanja kocke prethodno je određen (pogledati Tablicu 20 – str. 111).

Hofstadter se nadovezao na Golombovu ideju primijetivši ključnu važnost ponavljanja istih tema kao osnovni element inovacije, a zbog njegovog članka iz 1982. godine, Rubikova kocka sa uvijenim<sup>105</sup> rubnim dijelom našla se na naslovnoj stranici časopisa „Scientific American“.[76]

Do 1987. godine, Ernő Rubik i njegovi suradnici izradili su sažet prikaz osnovnih matematičkih i projektantskih svojstava Rubikove kocke, ali, poneka matematička svojstva ostala su sakrivena, predstavljajući teške i intrigantne izazove. Primjer takvog izazova bio je određivanje i dokazivanje minimalnog broja orijentacija koji je potreban da se iz savršeno simetrično složene Rubikove kocke dobije bilo koja druga dana konfiguracija. Takav broj orijentacija nazvan je „Božji broj“, a tek je 2014. godine Rokicki dokazao da je taj broj jednak dvadeset.[76]

Kao što autor igre „*Rubikova kocka kvarkovske tvari*“ T. Csörgő navodi u [76], „*Koliko znam, „Božji broj“ za Rubikovu kocku kvarkovske tvari ili druge generalizacije Rubikove kocke sa orijentiranim centrima ploha još uvijek nije određen*“[76]

Savršeni kvarkovski fluid<sup>106</sup> čija svojstva se mogu upoznati i ilustrirati uz pomoć takve kocke, je oblik tvari najveće temperature koju su ljudi ikad uspjeli proizvesti- temperature takvog fluida mogu doseći i više od  $5 \cdot 10^{12}$  K.[76]

Takvo stanje tvari detektirano je 2004. godine u djelićima ostataka sudara visokoenergetskih teških iona<sup>107</sup> u BNL-ovom RHIC akceleratoru, a rezultati su potvrđeni i pri većim energijama sudara u eksperimentima ALICE, ATLAS I CMS u CERN-ovom Velikom Hadronskom Sudarivaču.[75][76] „Savršenost“ takvog fluida odgovara njegovim unutarnjim svojstvima – Naime, prirodna, unutarnja skala disipativnog kretanja koja se naziva dinamička viskoznost je za ovakve fluide najmanje vrijednosti od svih drugih poznatih materijala koje su ljudi uspjeli proizvesti.[76]

Savršeni fluid mogao bi dakle teći bez unutarnjih disipacija, a to svojstvo moglo bi se prikazati pomoću modela Rubikove kocke kvarkovske tvari koja je savršeno podmazana i tako prikladna za natjecanja u što bržem slaganju.[76]

U veoma ranom svemiru, svega nekoliko mikrosekundi nakon Velikog praska, kvarkovska tvar nastala je pri posebnim uvjetima, u kojima je broj antikvarkova bio približno jednak

---

<sup>105</sup> Engl. „quarked“

<sup>106</sup> Odnosno kvarkovska tvar

<sup>107</sup> Poput atoma zlata [76].

broju kvarkova.<sup>108</sup> Takvo svojstvo ranog svemira vjerno je predstavljeno na samoj kocki, u kojoj je broj antikvarkova jednak broju kvarkova. (Za razliku od takve kocke, u špilu karata s elementarnim česticama koji je predstavljen u [13], broj čestica (pa tako i kvarkova) veći je od broja antičestica (u ovom slučaju antikvarkova), jednako kao što je u sudarima visokoenergetskih teških iona u čestičnim akceleratorima broj nastalih kvarkova veći od broja antikvarkova.[76]

U priručniku sa uputama za igru [76] navedena su različita fizikalna svojstva kvarkovske tvari koja se mogu dovesti u vezu sa ovom igrom i tako predstavljati temu za razgovor i diskusiju sa igračima, a sve će one biti navedene u nastavku!

Kao prva fizikalna tema za razgovor navedeno je svojstvo boje kvarkovske tvari.[76] Prilikom obrade ove teme, treba imati na umu da je savršen fluid kvarkovske tvari kao cjelina u stanju bez svojstva obojanosti, ali na lokalnoj razini, njegovi gradivni elementi - kvarkovi i antikvarkovi posjeduju svojstvo boje. U slučaju kvarkova, boja može biti crvena, zelena ili plava, a kod antikvarkova može se raditi o anticrvenoj, antizelenoj ili antiplavoj boji. Jednako tako, sastavni elementi Rubikove kocke kvarkovske tvari, odnosno pojedinačne kockice koje predstavljaju  $u$ ,  $s$  i  $d$  kvarkove i njihove antikvarkove svaki za sebe posjeduju svojstvo boje koja je prikladno predstavljena različitim optičkim bojama na oznakama pojedinih kockica. U početnom stanju nasumične konfiguracije kocke, njeni različiti lokalni dijelovi bit će ispunjeni nasumičnim bojama. Međutim, ako se cijela kocka promotri na globalnoj razini, lako se može shvatiti da je ona kao cjelina takva da se sve boje „ponište“ sa njihovim antibojama, čime se stvara dojam neutralnosti u boji koji korespondira sa samom kvarkovskom tvari. Suprotno tome, promatranjem kocke koja je uspješno složena do kraja, može se uočiti da su na njoj međusobno suprotne stranice obojane parovima boje i njene antiboje, čime se stvara jasan dojam globalnog „poništanja“ svojstva boje.

Potom se sa igračima može raspraviti i o okusu kvarkova. Za početak, potrebno je spomenuti postojanje šest različitih okusa kvarkova<sup>109</sup>, kao i primjetiti da su samo tri od njih (gornji, donji i strani kvark) prisutni na kocki. Pritom je važno napomenuti da baš ti kvarkovi koji se nalaze na kocki (kao i njihove antičestice) odgovaraju okusima kvarkova koji najčešće nastaju u eksperimentima sa sudarima čestica u RHIC-u i LHC-u![76] U ovom slučaju zanimljiva bi bila i verzija igre u kojoj je potrebno poredati stranice kocke tako da se na

---

<sup>108</sup> Više o stanjima i svojstvima ranog svemira, kao i o kvarkovsko-gluonskoj plazmi može se pročitati u poglavlju 4.2.3.

<sup>109</sup> Pogledati poglavlje 3.2.1

pojedinoj stranici kocke nalaze samo čestice jednakog okusa.[76]. Potom se može diskutirati ukupni barionski broj, koji je u nekom sustavu kvarkova i antikvarkova definiran kao ukupan broj kvarkova umanjen za ukupan broj antikvarkova, a potom podijeljen sa tri.[76]. Prilikom ovakve diskusije, može se postaviti pitanje koliki je ukupan barionski broj u osnovnom stanju kocke (odnosno pri konfiguraciji u kojoj je kocka do kraja složena prema uputama), te mijenja li se ukupni barionski broj pri različitim rotacijama kocke.[76]

Iduća tema može biti i već spomenuta gustoća entropije kocke kao i njena usporedba sa gustoćom entropije kvarkovske materije, te usporedba gustoće entropije sa velikim brojem različitih konfiguracija, odnosno različitih stanja kocke. Igrači se pritom mogu upoznati sa izračunom broja mogućih stanja kocke (Tablica 20), a u kojem su uzete u obzir 24 moguće orijentacije dane kocke u prostoru, kao i sve moguće orijentacije središnjih dijelova.[76]. Dobiveni rezultat od približno  $2,1 \cdot 10^{24}$  različitih stanja može se potom usporediti sa nešto manjim Avogadrovim brojem ( $6,02 \cdot 10^{23}$ ), a potom se igrači mogu naučiti i kako dobiti gustoću entropije kocke uz njene poznatu duljinu bridova od 57 mm.<sup>110</sup>[76]

Za kraj, može se sa igračima raspraviti o samom pojmu savršenog fluida koji bi, po definiciji, trebao biti bez unutarnjih disipacija. Otpor fluida unutarnjem trenju karakteriziran je takozvanom kinematičkom viskoznošću, koja se označava sa  $\frac{\eta}{\sigma}$ . [76] Ova veličina je donekle usporediva sa otporom stranica Rubikove kocke prilikom rotacije: u savršenom modelu savršenog fluida, rotirajuća vanjska trećina kocke mogla bi se nastaviti zauvijek rotirati bez otpora. Međutim, zbog disipativnih sila, rotacija stvarne kocke se brzo zaustavlja.[76] Na temelju takvih analogija, igrače se može tražiti da procijene kinematičku viskoznošću  $\frac{\eta}{\sigma}$  za

$3 \times 3$  Rubikovu kocku kvarkovske tvari, ukoliko je zakretni moment potreban za rotaciju trećine vanjskog sloja takve kocke u redu veličine 0,1 Nm.<sup>111</sup> Također, potpitanje može biti i koliko je daleko takva kocka od pretpostavljene kvantne granice za savršeni fluid[76], za kojeg vrijedi da je[76]:

$$\frac{\eta}{\sigma} = \frac{\hbar}{4\pi} \quad \text{Jednadžba 8}$$

<sup>110</sup> Navedeni izračun opisan je i izveden u Tablica 21.

<sup>111</sup> A gustoća entropije  $\sigma$  jednaka je onoj izračunatoj u Tablici 21.



## 5. Prijedlozi novih igara

Inspirirana igrama opisanim u prethodnom poglavlju, odlučila sam se i sama okušati u osmišljavanju igara za koje bi se mogao iskoristiti špil karata s elementarnim česticama iz [13], a koje bi se mogle povezati sa dijelovima fizike elementarnih čestica koja već nisu spomenuta u prethodnim igrama. Tako su nastale dvije igre – “*Međudjelovanje elementarnih čestica*” i “*Osmostruki put*” koje su navedene i opisane u ovom poglavlju.

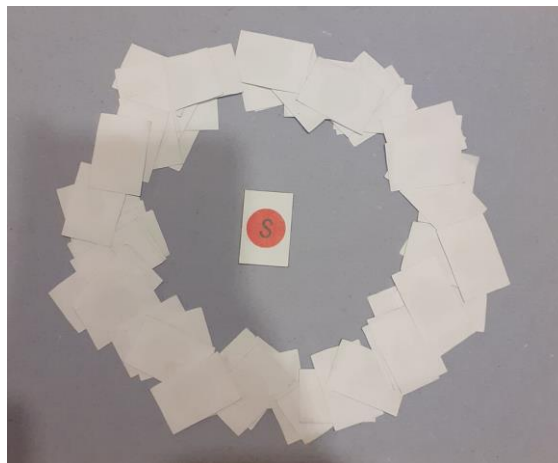
### 5.1. Igra „MEĐUDJELOVANJE ELEMENTARNIH ČESTICA“

Pravila ove igre povezana su sa osnovnim zakonima prirode koji opisuju četiri temeljna međudjelovanja elementarnih čestica. Samim time, igranjem ove igre se produbljuje i utvrđuje znanje o osnovnim interakcijama elementarnih čestica, koja su veoma značajna, jer pomoću njih se može opisati i svako međudjelovanje bilo koja dva tijela!

Igra je optimalna za 2-4 igrača (zbog ograničenog broja pojedinih karata u špilu), ali može se igrati i sa većom skupinom igrača.

#### 5.1.1. Pravila i tijek igre

Na početku igre, potrebno je odabrati jednu od karata u špilu (koja mora predstavljati česticu, a ne antičesticu), koja se postavlja na središte stola okrenuta licem prema gore. Ostalih 65 karata potrebno je dobro izmiješati, a potom ih postaviti u krug oko središnje karte, tako da su navedene karte u krugu okrenute licem prema dolje, kako je prikazano na sljedećoj slici:



Slika 71 - Primjer postavljanja karata na početku igre. Središnja karta u ovom je slučaju crveni s-kvark

Potom svaki igrač izvlači po 4 karte iz kruga karata postavljenog oko središnje karte. Izvučene karte igrači drže u rukama, tako da samo oni mogu vidjeti o kojim se kartama radi.

U ovom trenutku potrebno je odrediti redosljed kojim će igrači dolaziti na red (primjerice, u smjeru kazaljke na satu). Potom kreće igra na poteze! Igrači redom moraju postavljati po jednu kartu po izboru (od karata koje drže *u rukama*) na središnju kartu, i pritom imenovati interakciju poštujući sljedeća pravila:

### **Pravila postavljanja karata:**

#### **→ Postavljanje čestica na središnju kartu**

Pravila postavljanja karata na središnju kartu u korelaciji su sa uvjetima međudjelovanja elementarnih čestica kod svake od četiri temeljne sile. Naime, na središnju kartu moguće je staviti samo onu kartu koja predstavlja česticu koja *može* međudjelovati sa središnjom kartom, a pritom je potrebno uvijek i *navesti o kojem se međudjelovanju radi!*

Moguća su, dakle, sljedeća četiri međudjelovanja:

- **JAKO MEĐUDJELOVANJE**

Zbog kratkog doseg a jake sile, u ovoj igri se pretpostavlja da jakim međudjelovanjem mogu međudjelovati samo kvarkovi *unutar jednog bariona*, pri čemu kod međudjelovanja dolazi do izmjene boje između njih, pri čemu je očuvana ukupna neutralnost boje bariona.

Zbog toga su mogući sljedeći potezi: *na svaki kvark (u, c, ili d) moguće je staviti bilo koji drugi kvark (u, c, ili d), pod uvjetom da je njihova boja različita od boje početnog kvarka!*

Tako je, primjerice, na crveni *s* kvark sa Slike 71 moguće postaviti plavi ili zeleni *u*, *s*, ili *d* kvark! Da bi se potez smatrao validnim, potrebno je svakako prilikom postavljanja karte i reći da se radi o *jakoj* sili.

- **ELEKTROMAGNETSKO MEĐUDJELOVANJE**

Temeljno svojstvo ove sile je da njome mogu međudjelovati samo dvije električki nabijene čestice. Sukladno tome, *na bilo koju električki nabijenu česticu (u, s ili d kvark bilo koje boje, kao i  $e^-$  ili  $\mu^-$ ) moguće je staviti bilo koju drugu električki nabijenu česticu* (dakle, bilo koji kartu koja predstavlja *u, s ili d kvark,  $e^-$  ili  $\mu^-$* ). Također i u ovom slučaju važno je glasno reći da se radi baš o elektromagnetskom međudjelovanju.

Ako ponovno uzmemo primjer središnje karte kao na Slika 71, na crveni  $s$  kvark moguće je dakle postaviti jednu od sljedećih karata: bilo koji  $u, s$ , ili  $d$  kvark,  $e^-$  ili  $\mu^-$ ; u principu bilo koju kartu osim električki neutralnog elektronskog i mionskog neutrina!

- **SLABO MEĐUDJELOVANJE**

Kod ovog međudjelovanja, uzima se u obzir da ono djeluje između leptona iste generacije te između određenih kombinacija kvarkova (unutar i izvan iste generacije), čime oni mijenjaju svoju vrstu iz jedne čestice u drugu.

Samim time, pravila su sljedeća:

<b>LEPTONI</b>	<b>KVARKOVI</b>
<p>→ Na elektron se može staviti elektronski neutrino, i obratno.</p> <p>→ Na mion se može staviti mionski neutrino, i obratno</p>	<p>→ Na <math>u</math> kvark može se staviti <math>d</math> kvark ili <math>s</math> kvark, ali samo ako su jednake boje kao <math>u</math> kvark.</p> <p>→ Na <math>d</math> kvark može se postaviti samo <math>u</math> kvark jednake boje.</p> <p>→ Na <math>s</math> kvark može se postaviti samo <math>u</math> kvark jednake boje.</p>

Tablica 22- Pravila slaganja karata vezana za slabu silu

(Činjenica da kvarkovi koji se postavljaju na zadani kvark moraju biti jednakih boja reflektira činjenicu da slaba sila može promijeniti okus, ali ne i boju kvarka.

Detaljnije o slaboj sili i njenom međudjelovanju kod navedenih kvarkova može se pročitati u poglavlju 3.3.2. (Slika 9). Dakle, ako ponovno uzmemo kao primjer da se u središtu stola nalazi crveni  $s$  kvark, na njega je, ako gledamo međudjelovanje slabe sile, moguće staviti samo crveni  $u$  kvark! Naravno, i kod ovakvog postavljanja karata je potrebno navesti da se radi baš o slabom međudjelovanju!

*DODATAK – Neutrinske oscilacije:* Ako se na sredini stola nalazi elektronski neutrino, moguće je na njega postaviti mionski neutrino, i obratno. U tom trenutku potrebno je reći da se radi o neutrinskoj oscilaciji!<sup>112</sup>

*DODATAK – Gravitacijsko međudjelovanje:* S obzirom na to da gravitacijski mogu međudjelovati bilo koje dvije čestice koje imaju masu, ako bismo htjeli pratiti pravila slaganja za gravitacijsku silu po istom principu kao i do sada, slijedi da se na bilo koju središnju kartu može postaviti bilo koja od karata iz špila. Međutim, gravitacijsko

<sup>112</sup> O samoj pojavi neutrinskih oscilacija može se pročitati u poglavlju 3.1.1.

međudjelovanje je među elementarnim česticama zbog njihove malene mase jako slabo izraženo, što je u igri preslikano na sljedeći način:

*Samo jednom tijekom igre (ali ne i u trenutku kada je igraču preostala samo jedna karta u ruci, a sve karte sa središnjeg kruga su već uzete), igrač može iskoristiti priliku za „gravitacijsko međudjelovanje“, i postaviti bilo koju od karata (koja nije antičestica) na središnju kartu. Ova situacija može biti vrlo zabavna, jer može promijeniti tijek igre i dati značajnu prednost igraču koji ju iskoristi u pravom trenutku.*

### ➔ Postavljanje antičestica na središnju kartu - ANIHILACIJA

U ovoj igri, karte koje predstavljaju antičestice se mogu postaviti na središnju kartu *samo ako se uistinu radi o antičestici središnje karte!* U toj situaciji, igrač mora reći „Anihilacija!“, što odgovara fizikalnoj pojavi poništavanja materije i antimaterije. Dakle, mogući su sljedeći potezi:

<i>LEPTONI</i>	<i>KVARKOVI</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➔ Na elektron se može staviti pozitron.</li> <li>➔ Na elektronski neutrino može se staviti elektronski antineutrino.</li> <li>➔ Na mion se može staviti antimion.</li> <li>➔ Na mionski neutrino može se staviti mionski antineutrino.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➔ Na <math>u</math> kvark može se staviti njegov antikvark (<math>\bar{u}</math>), ali samo ako je antikvark odgovarajuće anti-boje. Primjerice, na plavi <math>u</math> kvark može se postaviti samo anti-plavi <math>\bar{u}</math> antikvark (odnosno <math>\bar{u}</math> karta obojana crveno – zeleno).</li> <li>➔ Na isti način mogu se postavljati i <math>\bar{s}</math> i <math>\bar{d}</math> antikvarkovi na <math>s</math> i <math>d</math> kvark.</li> </ul>

Tablica 23- Pravila postavljanja antičestica na središnju kartu

Postavljanje odgovarajućih karata koje predstavljaju antičestice na središnju kartu veoma je korisno i poželjno u igri, jer nakon što igrač postigne „Anihilaciju“, on može u istom potezu postaviti i bilo koju od svojih drugih karata na stol, te se tako u jednom potezu riješiti dvije svoje karte. Osim toga, postavljanjem karte po svojem izboru u središnji red igrač svjesno mijenja tok igre, pri čemu je moguće taktizirati - Primjerice, postavljanjem neutrina velike su šanse da će igrač koji je idući na redu upasti u „probleme“, budući da oni ne međudjeluju s velikim brojem raspoloživih čestica.

**Važno je u igri slijediti i sljedeća pravila:**

- I. Ako igrač ne navede odgovarajuće međudjelovanje tijekom svojeg poteza, a drugi igrač(i) ga na to upozore, on mora uzeti tri dodatne karte u svoje ruke. (osim ako u središnjoj hrpi na stolu više nema raspoloživih karata).
  
- II. Ako se dogodi situacija da je igrač na središnju kartu postavio kartu koja može sa središnjom kartom međudjelovati sa više od jedne temeljne interakcije (ne brojeći gravitacijsku), a nije naveo o kojim se sve interakcijama radi, već je naveo samo jednu od njih, bilo koji drugi igrač može ga „prozvati“ navodeći koju je točno vrstu interakcije je igrač zaboravio. U tom slučaju, igrač koji je zaboravio navesti sve moguće interakcije mora uzeti dodatne dvije karte sa sredine stola.  
Na primjer, ako jedan od igrača na crveni  $s$  kvark koji se nalazi na sredini stola stavi plavi  $u$  kvark, a navede da je riječ samo o elektromagnetskoj interakciji, drugi igrač ga može prozvati i navesti da je između ove dvije čestice moguća i jaka interakcija, te ga u tom slučaju natjerati da uzme dodatne dvije karte.
  
- III. Ako se dogodi situacija da neki igrač pogrešno „prozove“ drugog suigrača, onda on sam mora za kaznu uzeti dvije karte sa sredine stola. Na ovaj način, igra postaje još zanimljivija, i spriječena je mogućnost da igrači samo brzinski i bez previše razmišljanja navode elektromagnetsku interakciju između električki nabijenih čestica, ne razmišljajući pritom i o drugim mogućim interakcijama. Samim time, za igrače je također posebno važno u svakom trenutku biti koncentriran na poteze drugih, i aktivno razmišljati o mogućim interakcijama.
  
- IV. Ako se dogodi situacija da igrač koji je na redu nema u rukama odgovarajuću kartu koju bi mogao (ili znao) staviti na središnju kartu i pritom imenovati odgovarajuće međudjelovanje, on izvlači sa središnje hrpe onoliko karata koliko mu je potrebno dok ne izvuče kartu koju bi mogao postaviti na središnju. Ako se ovakva situacija dogodi igraču u trenutku kad su već sve karte sa središnjeg kruga uzete, on izvlači redom karte koje su već postavljene na središnju kartu, počevši od one na dnu hrpe.
  
- V. Ako tijekom igre neki od igrača ostanu bez karata u rukama, ali još sve karte sa središnjeg kruga nisu uzete, tada igrač koji je ostao bez karata kada dođe na red mora nasumično uzimati karte iz središnjeg kruga dok ne izvuče kartu koju može staviti na središnju, jednako kao i u prethodnoj situaciji.

Igra završava u onom trenutku kad su sve karte sa središnje hrpe uzete, a jedan od igrača je ostao bez svih karata koje predstavljaju *čestice* (smije dakle imati u rukama karte koje predstavljaju antičestice!) Taj igrač je pobjednik, a ostali igrači se rangiraju prema broju karata koje predstavljaju čestice koje su im preostale, na način na je posljednji onaj igrač kojem je u rukama ostalo najviše karata.

### **5.1.2. Za koga je namijenjena igra „Međudjelovanje elementarnih čestica“?**

Zbog činjenice da se igra oslanja na temeljna međudjelovanje elementarnih čestica, osobe koje su upoznate sa osnovama fizike elementarnih čestica, kao i sa četiri temeljna međudjelovanja brzo će savladati pravila igre. U tom slučaju, dovoljno je znati da se *na središnju kartu moraju postavljati one čestice koje mogu međudjelovati sa njom, a pritom je potrebno i navoditi o kojim se interakcijama radi*, te igra odmah može započeti.

Takvim igračima bi ova igra mogla biti posebno zanimljiva zbog povezanosti sa fizikom, ali i činjenice da je moguće „taktizirati“ postavljanjem čestica koje ne međudjeluju sa velikim brojem drugih u pravim situacijama; primjerice ako se iskoristi potez „anihilacije“, ili „gravitacijskog međudjelovanja“ u pravom trenutku, moguće je protivniku postaviti kao središnju kartu neku od karata koje slabo međudjeluju sa drugima (poput neutrina), ili mu postaviti onu kartu za koju je moguće pretpostaviti da ju protivnik nema u svojim rukama na temelju njegovih prethodnih poteza.

Također, osobe koje su dobro upoznate sa međudjelovanjima u fizici, moći će brzo i primjetiti pogreške drugih, odnosno situacije u kojima suigrači ne navedu ispravne ili sve moguće interakcije. Uočavanjem takvih situacija, igrači mogu natjerati protivnike na uzimanje dodatnih karata i tako steći prednost nad njima.

Pa ipak, ovu igru mogu igrati i osobe koje nisu dobro upoznate sa međudjelovanjem elementarnih čestica (a koji bi igranjem svoje znanje naravno jako povećali). U tom slučaju, može se krenuti od učenja navedenih pravila igre, koje se kasnije mogu nadograditi fizikalnom pozadinom. Sama pravila igre nisu ništa kompliciranija od tipičnih kartaških igara, a njihovo savladavanje i razumijevanje automatski znači i da je osoba naučila koje čestice mogu međudjelovati određenim interakcijama!

Moje mišljenje je da ovu igru mogu lako savladati i djeca u srednjoj školi (a uz određene simplifikacije i djeca u osnovnoj školi) koja uče o elementarnim česticama i fundamentalnim silama, a u tom slučaju ona može biti odlično sredstvo za aktivno utvrđivanje i produbljivanje znanja. Na primjer, za mlađu djecu moglo bi se započeti sa jednostavnijim

verzijama igre, u kojoj se prvo koriste samo karte koje predstavljaju čestice, a pravila slaganja se uvode jedno po jedno, paralelno sa upoznavanjem i učenjem pojedinih sila. Kasnije se u igru mogu uvesti i antičestice, te pravila povezana sa njima, nakon što se upoznaju njihova svojstva i razlika u odnosu na čestice.

### **5.1.3. Fizikalna pozadina igre – O međudjelovanjima elementarnih čestica**

Osim navedenih pravila igre koja su u korelaciji sa različitim tipovima međudjelovanja, igrači moraju poznavati osnovne pojmove vezane za fiziku elementarnih čestica; naime oni moraju poznavati elementarne čestice i antičestice koje su predstavljene kartama u špilju, kao i njihove električne naboje, a za kvarkove i antikvarkove moraju poznavati svojstvo njihove „obojanosti“, kao i konačne neutralnosti u boji hadrona. (O svim ovim temama bilo je riječi u poglavlju 3.)

U ovoj igri osnovna pravila direktno su vezana za međudjelovanje elementarnih čestica putem četiri temeljne sile, čime se bavi poglavlje 3.3. U tom poglavlju mogu se pronaći neke od osnovnih informacija o svakoj od četiri temeljne sile, kao što je relativna jakost pojedine sile, te vrste elementarnih čestica koje mogu međudjelovati pojedinom silom. Također, u navedenom poglavlju opisano je i što se točno na razini elementarnih čestica događa kod različitih tipova međudjelovanja, pri čemu dolazi do razmjene izmjenjskih čestica, koje je u širem razmatranju navedenih sila svakako potrebno spomenuti.

U nastavku je navedeno nekoliko pitanja povezanih sa ovom igrom, koja su direktno povezana sa međudjelovanjem elementarnih čestica, a koja stoga nakon igre mogu predstavljati teme za daljnji razgovor i diskusiju:

- ***Gravitacijsko međudjelovanje u igri se moglo iskoristiti samo jednom. Kako biste interpretirali ovakvo pravilo u stvarnom kontekstu čestične fizike?*** (Gravitacijsko međudjelovanje javlja se između bilo koje dvije čestice pa je tako ono moguće i između bilo kojih kvarkova i leptona. Međutim, iznos gravitacijske sile između dvije čestice proporcionalan je sa masama navedenih čestica, zbog čega je ono kod elementarnih čestica jako slabo izraženo, što je preslikano pravilom da se ono smije koristiti samo jednom tijekom igre. U poglavlju 3.3.1 spomenuto je da je ono čak  $10^{-40}$  puta manje relativne jakosti od jake sile, a slaba sila, koja je u čestičnoj fizici sljedeća po jakosti nakon gravitacijske sile je relativne jakosti koja je čak  $10^{35}$  puta veća od gravitacijske.)

- ***Prema pravilima igre, postoji li neko međudjelovanje kojim može međudjelovati samo jedna vrsta elementarnih čestica (kvarkovi ili leptoni)?*** (Da - radi se o jakom međudjelovanju, kojim mogu međudjelovati samo kvarkovi, ali ne i leptoni. Kao što je navedeno u poglavlju 3, upravo prema navedenoj činjenici se elementarne čestice dijele u dvije velike skupine – kvarkove (koji mogu međudjelovati jakom silom) i leptone (koji ne osjećaju jaku silu).)
- ***Koji uvjet je u igri vrijedio kod jakog međudjelovanja, i na koji način je to pravilo povezano sa stvarnim jakim međudjelovanjem kod kvarkova?*** (U igri je bilo moguće jako međudjelovanje između bilo koja dva kvarka koja se razlikuju u boji. Ova situacija reflektira stvarnu pojavu međudjelovanja dva kvarka unutar bariona (u kojem se radi neutralnosti boje hadrona uvijek moraju nalaziti tri kvarka koji su svi različitih boja). U takvom međudjelovanju, dva kvarka različitih boja međudjeluju razmjenom gluona, pri čemu dolazi do zamjene njihovih boja (pogledati poglavlje 3.3.4). Zbog kratkog dosega jake sile, u ovoj igri se pretpostavlja da jakim međudjelovanjem mogu međudjelovati samo kvarkovi unutar jednog bariona.)
- ***Kakvo pravilo je vrijedilo pri korištenju slabe sile u igri vezano za karte koje predstavljaju leptone? Kako biste mogli povezati navedeno pravilo sa stvarnim slabim međudjelovanjem leptona?*** (Što se tiče leptona, u igri je korištenjem slabe bile dozvoljeno postavljati leptone iz iste generacije jedan na drugi. Ovo pravilo povezujemo sa stvarnim slabim međudjelovanjem leptona, koje može djelovati samo na leptone iste generacije, ali ne i između generacija. (Pogledati Sliku 8 (str. 28), kao i poglavlje 3.3.2 u kojem je opisan princip djelovanja slabe sile koje mijenja okuse leptona zajedničkih generacija).
- ***Kakvo pravilo je vrijedilo pri korištenju slabe sile u igri vezano za karte koje predstavljaju kvarkove? Kako biste mogli povezati navedeno pravilo sa stvarnim slabim međudjelovanjem kvarkova?*** (U igri su kod međudjelovanja slabe sile bile moguće samo točno određene kombinacije kvarkova koje su navedene u Tablici 22 (str. 122), koje su nastale po uzoru na Sliku 9 iz poglavlja 3.3.2, gdje su navedeni



mogući prijelazi kvarkova djelovanjem slabe sile. Pritom su karte koje označavaju kvarkove koji se postavljaju na zadani kvark morali biti jednakih boja, što predstavlja pravilo koje vrijedi kod slabog međudjelovanja elementarnih čestica da slaba sila može promijeniti okus, ali ne i boju kvarka. Više o slabom međudjelovanju kvarkova može se pročitati u poglavlju 3.3.2.)

- ***Prema iskustvu i igri, što je zajedničko svim elementarnim česticama (prikazanima na kartama) koje mogu međudjelovati elektromagnetskom silom? Kako elementarne čestice pritom međudjeluju?*** (Elektromagnetskim međudjelovanjem mogu međudjelovati bilo koje električki nabijene čestice, odnosno bilo koji kvarkovi (od kojih su u igri zastupljeni  $u$ ,  $s$  i  $d$  kvarkovi) ili nabijeni leptoni (od kojih su u igri zastupljeni elektron i mion). Iznos električnog naboja za čestice koje su prikazane kartama u špilu naveden je u Tablici 24 (str. 133), a za sve elementarne čestice spomenut je i njihov iznos električnog naboja u poglavljima 3.1 i 3.2. Kod elektromagnetskog međudjelovanja, električki nabijene elementarne čestice međusobno razmjenjuju fotone, kao što je opisano u poglavlju 3.3.3, gdje je prikazan Feynmanov dijagram elektromagnetskog međudjelovanja dva elektrona.)
- ***Prema iskustvu u igri, koje čestice najmanje međudjeluju s ostalima? Zbog čega?*** (Čestice za koje u igri postoji najmanji broj kombinacija slaganja su elektronski i mionski neutrino. Naime, oni ne mogu međudjelovati jakom silom (zbog toga što pripadaju skupini leptona), niti elektromagnetskom silom (zbog toga što su električki neutralni). Oni mogu međudjelovati slabom interakcijom, ali zbog toga što je ona ograničena samo na leptone iste generacije, moguće je postaviti elektronski neutrino samo na elektron, a mionski neutrino samo na mion. O slabom međudjelovanju elektronskog, mionskog i tau neutrina sa ostatkom materije, zbog čega se za neutrine ponekad kaže da u „čestice-duhovi“ može se više pročitati u poglavlju 3.1.1.)
- ***Kako biste na temelju igre objasnili neutrinске oscilacije? Zbog čega je njihovo otkriće bilo veoma važno?*** (Prema pravilima igre, elektronski i mionski neutrino mogli su se postavljati jedan na drugog, što označava „neutrinску oscilaciju“. Inspiracija za ovakvo pravilo igre razvijena je iz same fizikalne pojave neutrinških oscilacija, odnosno otkrića periodičnih promjena okusa neutrina iz jedne generacije

u drugu, kojima je otkriveno da neutriini imaju masu. U poglavlju 3.1.1 navedeno je da su za otkriće neutrinskih oscilacija Takaaki Kajita i Arthur B. McDonald 2015. godine dobili Nobelovu nagradu za fiziku.

- ***U kojim slučajevima je moguća anihilacija elementarnih čestica? Kakvi moraju biti parovi čestica u tom slučaju?*** (Anihilacija je moguća između čestice i njene antičestice, kao što je i opisano u Tablici 23 u kojoj su navedena pravila postavljanja antičestica na središnju kartu u igri, što odgovara procesu anihilacije karte koja predstavlja antičesticu sa središnjom kartom koja predstavlja česticu. Više o antičesticama, njihovoj sličnosti i razlici u odnosu na čestice, kao i o samom procesu anihilacije može se pročitati u poglavlju 4.1.4)

## ***5.2. Igra „OSMOSTRUKI PUT“***

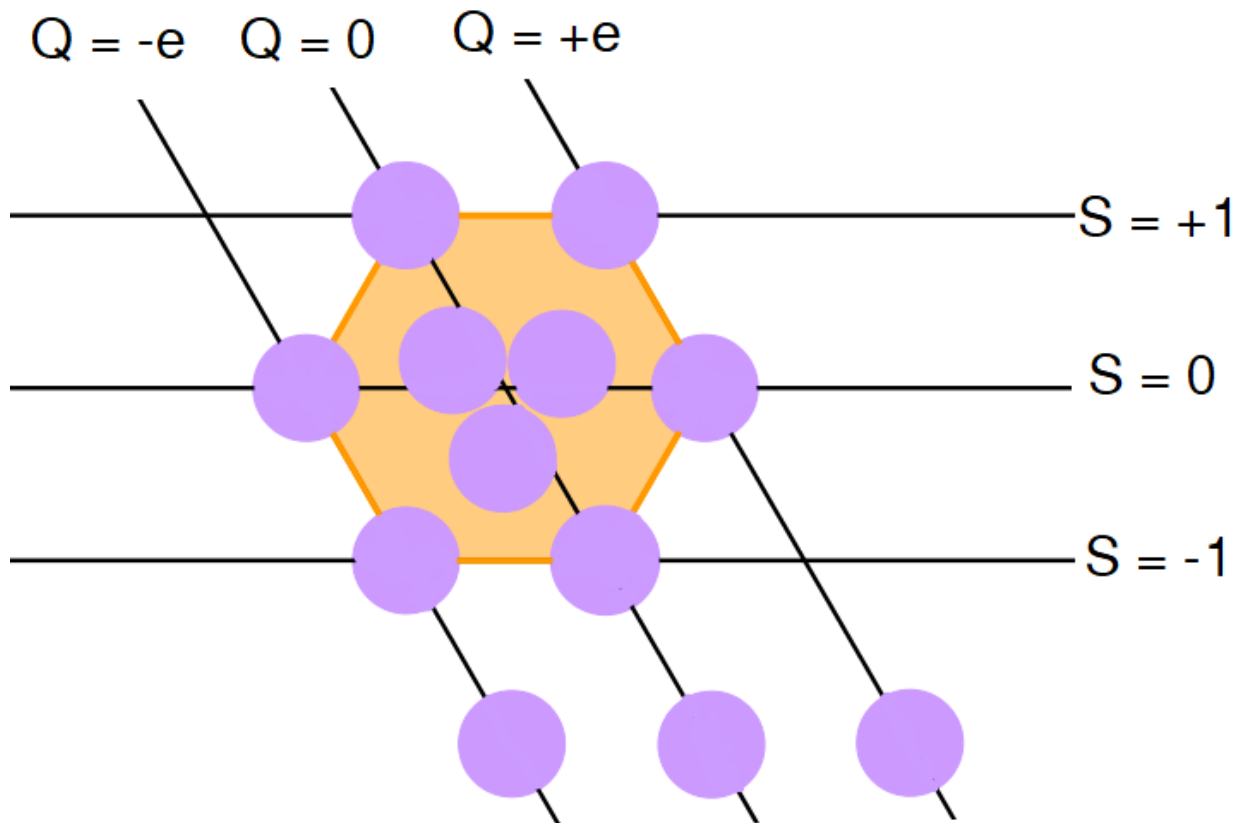
U ovoj igri iskorišteno je svojstvo „simetrije“ u prikazu bariona i mezona, koje su 1961. godine neovisno uočili Muray Gell-Mann i Yu'val Ne'eman[69], a čije je otkriće igralo ključnu ulogu u razvoju fizike elementarnih čestica i nuklearne fizike.

Naime, uočeno je da se hadroni mogu prikazati u prikladnim simetričnim skupinama prema njihovom naboju (Q) i svojstvu stranosti (S). Zbog činjenice da se prilikom takvog grupiranja često radi o skupinama od osam (ili više) hadrona, ovo svojstvo je, prema budističkom konceptu „plemenitog osmostrukog puta“, nazvano „osmostruki put“, a formiranje ovakve klasifikacije hadrona utjecalo je i na sam nastanak i budući razvitak kvarkovske teorije.

Igra je namijenjena za dva do četiri igrača (zbog ograničenog broja pojedinih karata u špilu).

Za ovu igru se, uz karte iz špila, koriste i sljedeće ploče (mogu se nacrtati na velikom komadu papira/kartona ili isprintati prema sljedećem predlošku):

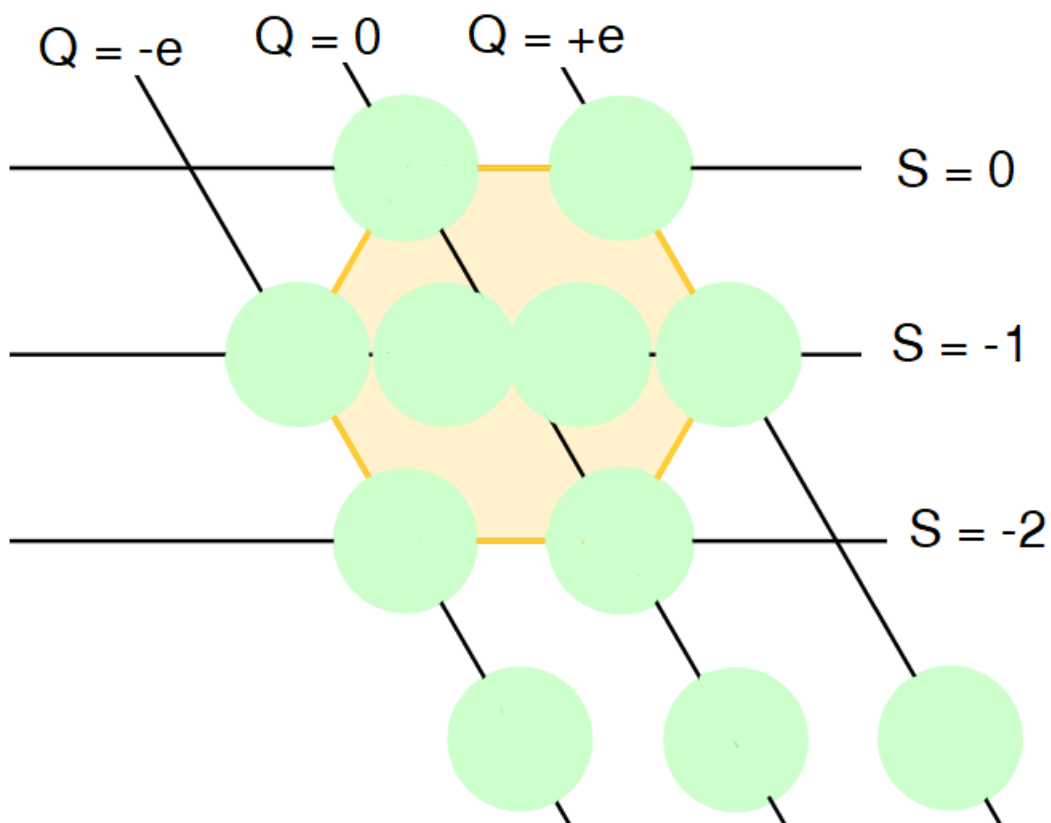
Prva ploča – „Mezonski šesterokut“



Slika 72 – „Mezonski šesterokut“

Napomena: Za tri mezona koji se nalaze u sredini šesterokuta, vrijedi da su oni po svojim svojstvima ukupne stranosti ( $S$ ) i ukupnog električnog naboja ( $Q$ ) takvi kao da se nalaze u samom središtu šesterokuta, gdje je  $S=0$  i  $Q=0$ .

## Druga ploča: „Barionski šesterokut“



Slika 73 – „Barionski šesterokut“

Napomena: Za dva bariona koji se nalaze u sredini šesterokuta, vrijedi da su oni po svojim svojstvima  $S$  i  $Q$  takvi kao da se nalaze u samom središtu šesterokuta, gdje je  $S=-1$  i  $Q=0$ .

Kao što se može primjetiti, ploče odgovaraju barionskom i mezonskom heksagonu prema konceptu „Osmostrukog puta“<sup>113</sup> uz tri dodana kruga na dnu.

Ideja igre jest da igrači moraju popuniti zadane krugove na pločama sa odgovarajućim kartama, poštujući pravila igre, tako da je unutar svakog kruga ukupna stranost jednaka onoj označenoj sa velikim slovom  $S$  u zadanom retku, a ukupni električni naboj u svakom krugu mora biti jednak električnom naboju  $Q$  koji je zadan kosim crtama. Također, prilikom

---

<sup>113</sup> Pogledati poglavlje 5.2.3

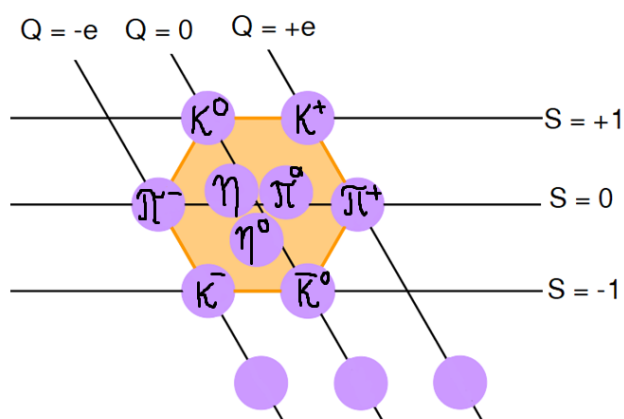
slaganja odgovarajućih hadrona, igrači moraju uzeti u obzir činjenicu da oni moraju biti validni; odnosno neutralni u boji.

Donja tri kruga na svakoj slici koji se nalaze izvan šesterokuta predstavljaju krugove koji se moraju popuniti sa 4 karte koje mogu biti leptoni ili antileptoni (ili njihova kombinacija), tako da je njihov ukupan električni naboj jednak naboju koji je zadan na pripadnim kosim crtama.

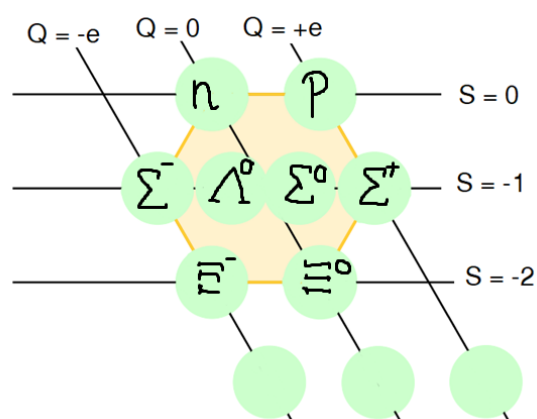
Moguće su dvije razine ove igre:

- **RAZINA 1 - Jednostavnija razina:** U ovoj razini, na ploči se mogu napisati imena odgovarajućih bariona ili mezona koje je potrebno složiti, a igrači se prilikom njihovog slaganja mogu poslužiti tablicama Tablica 25 i Tablica 26.

U tom slučaju, ploče za igru izgledaju ovako:



Slika 75- "Mezonski šesterokut" prilagođen jednostavnijoj verziji igre



Slika 74- "Barionski šesterokut" prilagođen jednostavnijoj verziji igre

- **RAZINA 2 - Teža razina:** U ovoj razini, igrači nemaju na ploči unaprijed napisane hadrone koje moraju sastavljati, već ih moraju sami smjestiti na odgovarajuće mjesto na ploči, na temelju njihovog ukupnog naboja  $Q$  i stranosti  $S$ .

Za ovu razinu igrači moraju dakle biti upoznati sa pojedinačnom stranosti i nabojem svake od elementarnih čestica u špilju, jer ukupna stranost  $S$  i električni naboj  $Q$  svakog hadrona (ili skupine leptona) jednaka je zbroju stranosti ( $s$ ), odnosno električnog naboja ( $q$ ) svih pojedinačnih čestica koje ga izgrađuju.

Navedene vrijednosti za svaku vrstu karata iz špila nalaze se u sljedećoj tablici:

Ime čestice	Stranost (s)	Električni naboj (q / e)
$u$	0	+2/3
$d$	0	-1/3
$s$	-1	-1/3
$\bar{u}$	0	-2/3
$\bar{d}$	0	+1/3
$\bar{s}$	+1	+1/3
$e^-, \mu^-$	0	-1
$e^+, \mu^+$	0	+1
$\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	0	0

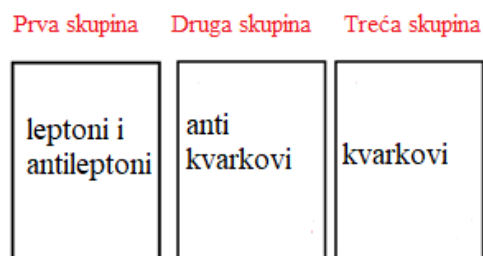
Tablica 24 - Vrijednosti električnog naboja i stranosti za karte iz špila

U ovoj verziji igre potrebno je dakle brzo i uspješno baratati sa zbrajanjem navedenih vrijednosti pojedinih karata, kako bi se dobila ukupna stranost i električni naboj, kao i biti vješt u uočavanju potencijalne „prilike“ sastavljanja odgovarajućeg hadrona koji je ostao nepopunjen u tablici!

Sam tijek igre, kao i sva pravila, objašnjena su u nastavku.

### 5.2.1. Pravila i tijek igre

Na samom početku igre, potrebno je podijeliti karte iz špila u tri skupine – u prvoj skupini moraju se nalaziti leptoni i antileptoni, u drugoj skupini antikvarkovi, a u trećoj skupini kvarkovi. Nakon što se karte podijele u odgovarajuće skupine, potrebno je dobro izmiješati karte u svakoj od njih, nakon čega se karte u svakoj skupini postavljaju na stol tako da su okrenute licem prema dolje. Na taj način, na stolu se formira red od tri skupine karata:



Slika 76 - Početna formacija karata. Karte su poredane prema vrsti elementarnih čestica, ali su okrenute licem prema dolje, tako da ih igrači ne mogu vidjeti.

Na početku igre, svaki igrač mora uzeti po **dvije** karte iz svake hrpe. Sukladno tome, svaki igrač mora na početku igre imati šest karata – dva (anti)leptona, dva antikvarka i dva kvarka. Svoje karte igrači drže u rukama, tako da ih samo oni mogu vidjeti.

Potom kreće prvi dio igre, u kojem se koristi ploča „Mezonski šesterokut“!

## PRVI DIO IGRE – SLAGANJE ANTILEPTONA, LEPTONA I MEZONA

Igra se na poteze, tako da je potrebno dogovoriti redosljed kojim će igrači dolaziti na red – primjerice u smjeru kazaljke na satu. U svakom potezu, pojedini igrač ima pravo na jednu od sljedeće dvije opcije:

- a) Igrač može jednu kartu (koju god želi) iz svog špila vratiti natrag na DNO odgovarajuće hrpe (primjerice lepton se može staviti samo u hrpu predviđenu za leptone i antileptone). Potom igrač može uzeti jednu novu kartu iz VRHA bilo koje druge hrpe (naravno igrač pritom ne zna koju kartu će točno izvući, ali može odabrati želi li izvući (anti)lepton, kvark ili antikvark).

Nakon takve zamjene karata, igrač gubi svoj red i idući igrač dolazi na red.

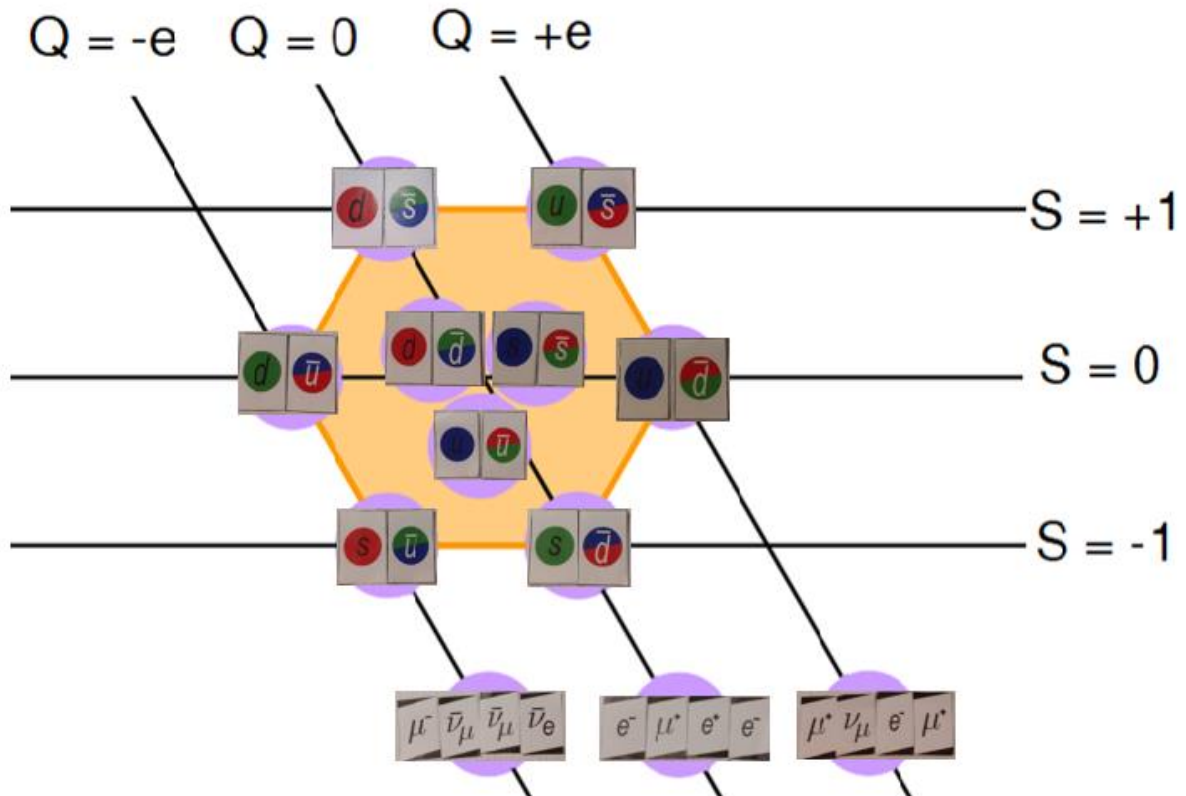
- b) Ako ima odgovarajuće karte u rukama, igrač ih može postaviti na prikladno nepopunjeno mjesto na ploči. Karte se unutar svakog kruga moraju postaviti u jednom potezu - Dakle, mora se na odgovarajuće mjesto na ploči odjednom postaviti ili mezon (sastavljen od kvarka i antikvarka odgovarajućih (anti)boja) na neko od odgovarajućih mjesta unutar šesterokuta, ili četiri karte koje su kombinacija leptona i antileptona čiji naboj je jednak traženom u odgovarajućem krugu izvan šesterokuta.. Nakon što igrač postavi karte na ploču, mora uzeti onoliko karata sa središnjih hrpica koliko je karata postavio na ploču, tako da na kraju poteza u rukama ponovno ima šest karata, pri čemu može sam birati koliko će karata uzeti iz koje hrpice!

I u ovom slučaju vrijedi pravilo da se karte uzimaju redom sa vrha svake skupine, tako da igrač ne može znati koje će karte točno izvući, ali može birati vrstu čestica.

Svako postavljanje odgovarajućeg mezona ili skupine od četiri odgovarajuća (anti)leptona na ploču igraču donosi 1 bod. Ako igrač postavi na ploču skupinu karata koja nije odgovarajuća – dakle ne predstavlja validan mezon ili skupinu leptona čija svojstva odgovaraju onome zadanom u pojedinom krugu, onaj igrač koji ga na to upozori dobiva jedan bod, a sam igrač koji je pogriješio dobiva jedan negativan bod, nakon čega se pogrešno postavljene karte vraćaju na dno odgovarajućih hrpica na Slika 76.

Ovakva igra na poteze se nastavlja do trenutka dok se cijela ploča ne popuni sa odgovarajućim kartama.

Primjer završne situacije za prvi dio igre nalazi se na sljedećoj slici:



Slika 77 - Primjer ispravno popunjene ploče na kraju prvog dijela igre

Kao što se može uočiti, u središnjim krugovima nalaze se mezoni koji su sastavljeni od parova kvarka i njegova vlastitog antikvarka, a za svaki mezon na rubovima vrijedi da se na onom rubu koji je njemu nasuprot nalazi upravo njegov vlastiti anti-mezon!

Nakon završenog prvog dijela igre, slijedi drugi dio igre, u kojem se koristi ploča „*Barionski šesterokut*“.

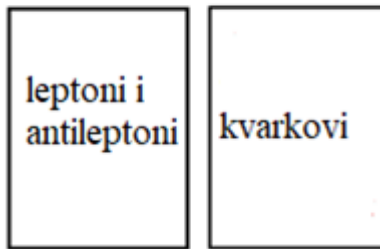
### DRUGI DIO IGRE – SLAGANJE ANTILEPTONA, LEPTONA I BARIONA

Nakon što je prvi dio igre završen, igrači moraju vratiti sve svoje preostale karte, kao i sve karte koje se nalaze na ploči „*Mezonski šesterokut*“ na odgovarajuće hrpice, nakon čega je potrebno dobro izmiješati karte u svakoj od hrpica i postaviti ih na stol jednako kao i u početnom dijelu prethodne igre.

Međutim, u ovom dijelu igre hrpica sa antikvarkovima se ne koristi, tako da se na stolu u početku nalaze sljedeće dvije skupine karata (okrenute licem prema dolje).



Prva skupina      Druga skupina



Slika 78- Skupine karata na stolu za drugi dio igre

I u ovom dijelu igre igrači dolaze na red jedan po jedan, a prilikom svakog poteza, pojedini igrač ima pravo na jednu od sljedeće dvije opcije (koje su veoma slične pravilima u prethodnoj igri):

- a) Igrač može jednu kartu (koju god želi) iz svog špila vratiti natrag na DNO odgovarajuće hrpe, te umjesto nje može uzeti jednu novu kartu iz VRHA bilo koje druge hrpe, jednako kao i u prethodnoj igri sa slaganjem mezona.

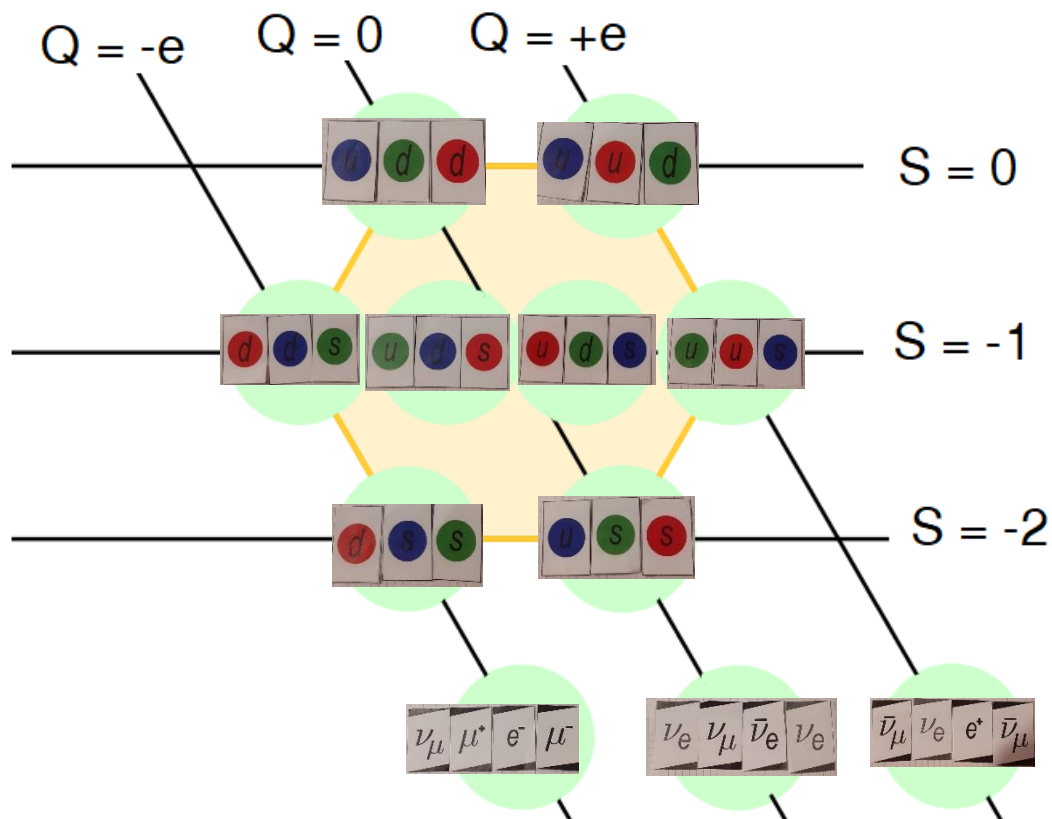
Nakon takve zamjene karata, igrač gubi svoj red i idući igrač dolazi na red.

- b) Jednako kao i u prethodnom dijelu igre, ako igrač ima odgovarajuće karte u rukama, može ih postaviti na prikladno nepopunjeno mjesto na ploči. Karte se unutar svakog kruga moraju postaviti u jednom potezu - Dakle, mora se na odgovarajuće mjesto na ploči odjednom postaviti ili odgovarajući barion (sastavljen od tri kvarka različitih boja) ili četiri karte koje su kombinacija leptona i antileptona čiji naboj je jednak traženom.

Isto tako, nakon što igrač postavi karte na ploču, mora uzeti onoliko karata sa središnjih hrpica koliko je karata postavio na ploču, tako da na kraju poteza u rukama ponovno ima jednak broj karata kao i prije, pri čemu može sam birati koliko će karata uzeti iz koje hrpice!

I u ovom slučaju, svako popunjavanje kruga na ploči, odnosno postavljanje odgovarajućeg bariona ili skupine od četiri (anti)leptona na pravilno mjesto na ploči igraču donosi 1 bod. Također, jednako kao i u prethodnoj igri, svaka pogreška pojedinog igrača donosi jedn negativan bod tom igraču, kao i bod osobi koja uoči njegovu pogrešku.

I u ovom slučaju, igra se nastavlja do trenutka dok se cijela ploča ne popuni sa odgovarajućim kartama, primjerice na način koji je prikazan u nastavku:



Slika 79 - Primjer ispravno popunjene ploče na kraju drugog dijela igre

Nakon što su svi krugovi na ovoj ploči popunjeni odgovarajućim kartama, igra je gotova, a pobjeđuje onaj igrač koji je u oba dijela igre ukupno sakupio najveći broj bodova!

### 5.2.2. Za koga je namijenjena igra „Osmostruki put“?

Jednostavnija razina igre primjerena je za sve one igrače koji igraju i razumiju i druge slične igre u kojima se iz kvarkova sastavljaju hadroni (primjerice za igrače koji su upoznati sa srednjom razinom igre „Kvarkovska tvar“).

Prilikom igranja, igrači mogu utvrditi svoje poznavanje navedenih hadrona i njihove neutralnosti u boji, ali mogu i uočiti nešto novo – da se oni mogu organizirati u simetrične skupine (u ovom slučaju šesterokute) prema njihovom ukupnom električnom naboju i svojstvu stranosti, što je zapravo temeljna ideja „Osmostrukog puta“, iz kojeg je razvijen kvarkovski model hadrona, kao i mnoga svojstva simetrije elementarnih čestica koje danas predstavljaju temelj Standardnog modela. Samim time, shvaćanjem temeljnih koncepata „Osmostrukog puta“, kao i poznavanjem njegovog utjecaja na daljnji razvoj fizike, razvija se svijest o fizikalnom načinu razmišljanja, kao i o samom povijesnom razvoju znanosti.

Nakon što igrači utvrde sva pravila i savladaju igru na jednostavnijoj razini, mogu prijeći i na složeniju razinu, za koju je potrebno poznavati i svojstva elementarnih čestica koja su navedena u Tablica 24. U ovoj razini igre potrebno je vješto baratati sa nekoliko različitih „varijabli“; naime potrebno je u svakom trenutku razmišljati o ukupnom zbroju pojedinačnih električnih naboja i stranosti svake od karata, te ih pravilno organizirati i baratati sa svojim kartama i izvlačenjem novih karata tako da se što uspješnije popune tražena prazna mjesta. Zbog toga smatram da ova igra nikako ne bi mogla biti prikladna za jako mladu djecu (primjerice mlađu od 12 godina) koji još nemaju razvijeno apstraktno razmišljanje i logičko zaključivanje, kao ni osnovno znanje o navedenim veličinama.

Međutim, moje mišljenje je da ovu igru mogu savladati starija djeca, kao i odrasli ljudi koji nemaju bogato predznanje o navedenim temama, te da bi i njima ova igra mogla biti jednako zanimljiva kao i ljudima koji znaju mnogo više o fizici elementarnih čestica. Sam rezultat igre ovisi o elementu sreće, jer igrači ne znaju koje od karata će točno izvući iz različitih skupina, ali je važna i brzina razmišljanja kao i koncentrirano i aktivno praćenje igre, uz poznavanje svojstava čestica, jer igrači mogu zadobiti prednost pravilnom zamjenom karte koja im nije potrebna u špilju sa kartom iz neke od drugih skupina koje su im potrebne za uspješno sastavljanje određenih hadrona.

Samim time, igra je dinamična i zanimljiva, rezultati su nepredvidivi, ali je dobro poznavanje fizike, kao i aktivno praćenje mogućih kombinacija i vješto korištenje odgovarajućih prilika itekako poželjno!

Kao što je već spomenuto, ova igra je bazirana na fizikalnoj ideji „*Osmostrukog puta*“ u prikazu hadrona. Radilo se o uočavanju simetričnih obrazaca, poput onih koji su korišteni na pločama tijekom igre, pomoću kojih je moguće prikazati grupe različitih bariona i mezona. Razvoj ove ideje bio je veoma važan u daljnjem razvoju kvarkovske teorije i Standardnog modela, a o njemu se više može pročitati u sljedećem poglavlju.

### **5.2.3. Fizikalna pozadina igre – „*Osmostruki put*“ u prikazu hadrona**

Otkrićem neutralnog kaona 1947. godine, pozitivno nabijenog kaona 1949. godine, kao i lambda čestice 1950. godine, uočeno je da ove čestice posjeduju neobično svojstvo. Naime, sve njih izrazito lako se moglo proizvesti u sudarima čestica (u akceleratorima i primjerice tijekom kozmičkih pljuskova), ali nakon stvaranja, utvrđeno je da se one raspadaju mnogo sporije nego što se očekivalo.

Primjerice, istraživanjem kozmičkih zraka 1947. godine, utvrđeno je da lambda čestica, koja je nastala u sudaru dva protona, ima vrijeme života od otprilike  $10^{-10}$  s, umjesto predviđenih  $10^{-23}$  sekundi (što je predviđeno na temelju mase ove čestice i činjenice da ona međudjeluje jakom interakcijom.)[70]

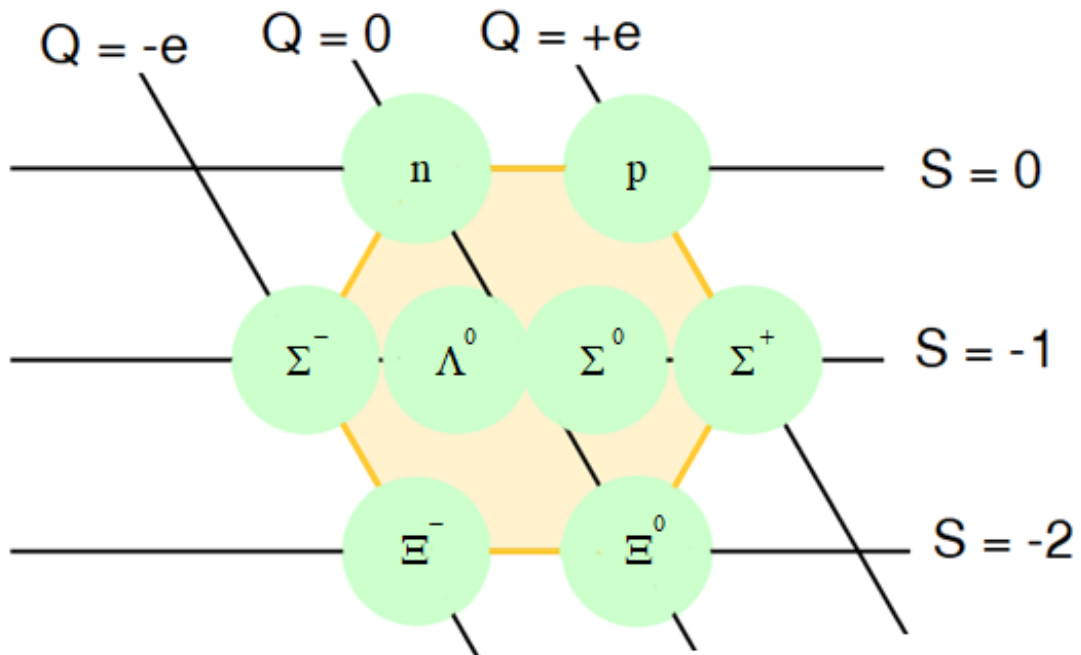
1953. godine, Murray Gell-Mann, Tadao Nakano i Kazuhiko Nishijima nezavisno su predložili postuliranje novog kvantnog broja, koji je nazvan „stranost“ ( $S$  – engl. strange), a koji je očuvan prilikom stvaranja, ali ne i prilikom raspada ovakvih hadrona, čime je objašnjeno njihovo „neobično“ svojstvo.[71]

Kao što je spomenuto u poglavlju 2.2, tijekom 1950-ih i 1960-ih godina, razvojem prvih sudarivača čestica kao i unaprjeđenjem detektora otkrivene su mnogobrojne nove čestice.

Broj novootkrivenih čestica postao toliko velik da su se one počele kategorizirati u tri različite kategorije, ovisno o njihovoj masi i načinu interakcije. Najlakše čestice (poput elektrona) nazvane su leptonima, srednje teške čestice (poput piona) nazvane su mezonima, a najteže (poput protona i neutrona) nazvane su barionima. Za sve ove čestice prvotno se smatralo da nemaju unutrašnje strukture, odnosno da bi sve one mogle biti „elementarne“ čestice.

1961. godine, Gell-mann i Yu'val Ne'eman neovisno su uočili da se mnogobrojni hadroni mogu organizirati u simetrične skupine ovisno o njihovom stranom kvantnom broju ( $S$ ) i naboju ( $Q$ ).[6] Radilo se o sistemu organizacije različitih hadrona u pravilne geometrijske uzorke, koji je, zbog činjenice da se često radi o skupinama od osam hadrona, zajedničkim imenom nazvan „osmostruki put“.

Primjerice, osam najlakših bariona može se prikazati u heksagonalnom obrascu kao što je prikazano na sljedećoj slici:



Slika 80 – Primjer simetrične klasifikacije bariona

Kao što je vidljivo na horizontalne linije označavaju linije jednakog „stranog“ kvantnog broja (S), a na kosim linijama nalaze se hadroni jednakog naboja (Q).

Pritom svaki od navedenih osam bariona ima barionski broj 1, spin  $\frac{1}{2}$  i pozitivni paritet.

Iz ovakvog načina organizacije, uočeno je da postoji veza između masa pojedinih čestica:[72]

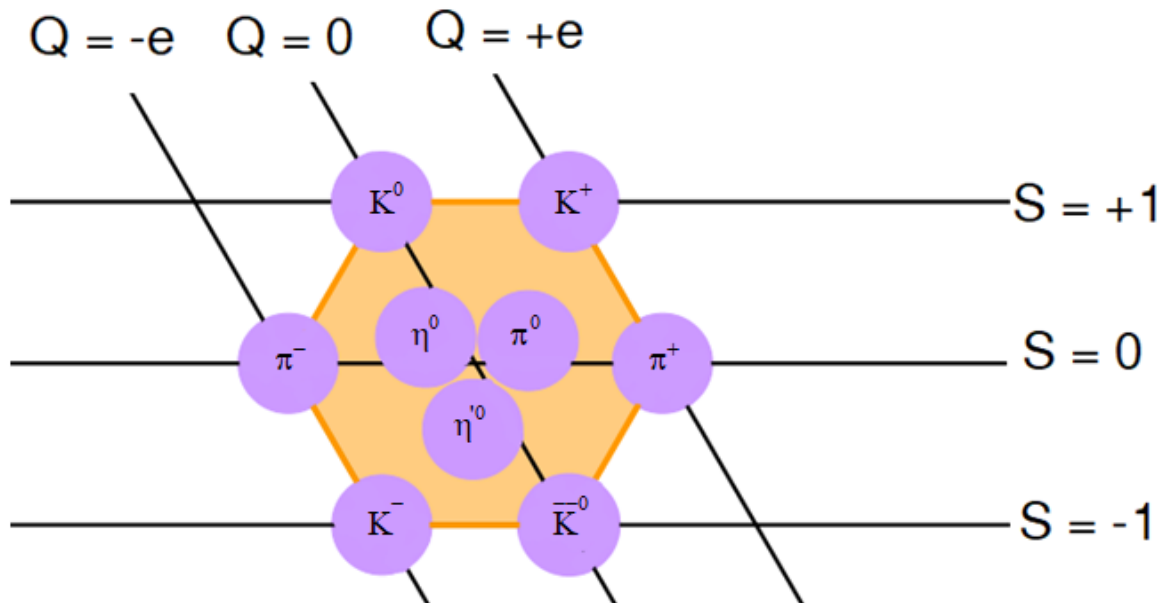
$$m(n) - m(\Xi^0) = \frac{1}{2} [3m(\Lambda^0) + m(\Sigma^0)] \quad \text{Jednadžba 9}$$

$$m(\Xi^-) - m(\Xi^0) = m(\Sigma^-) - m(\Sigma^+) + m(p) - m(n) \quad \text{Jednadžba 10}$$

Obzirom na to da su se i brojni drugi hadroni mogli prikazati u sličnim oktetima, otkriveno je da njihove mase također poštuju navedene jednadžbe, ako ih se uvrsti na način da se masa

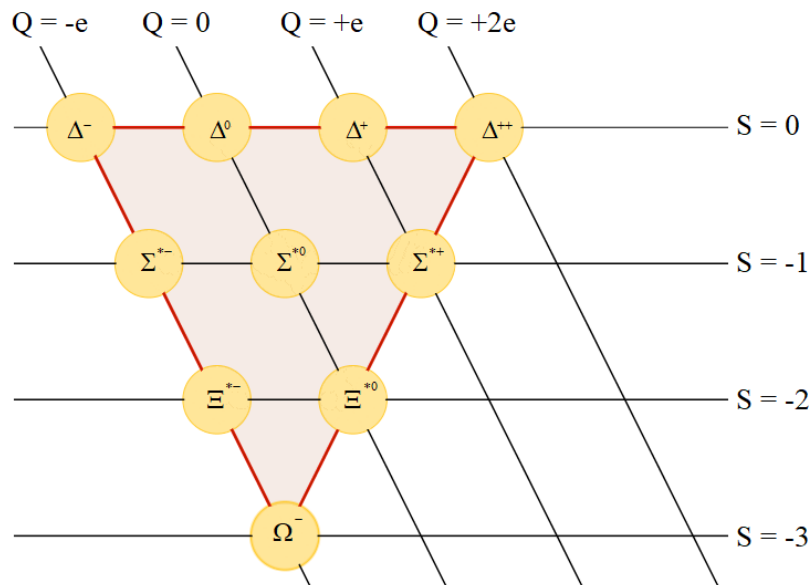
svake čestice u drugim oktetima stavi na mjesto u jednađbi koje korespondira sa njenim položajem u oktetu kakvog prikazuje Slika 80!

Na primjer, na sasvim jednak način mogu se prikazati i sljedećih devet mezona čija je stranost +1, 0 ili -1, električni naboj  $-e$ , 0 ili  $e$ , a spin im je svima jednak nuli:



Slika 81- Primjer simetrične klasifikacije mezona

Na sličan način, u odnosu na njihov električni naboj i vrijednost stranosti, teži barioni sa spinom  $3/2$  mogu se organizirati u simetrične „trokutaste“ obrasce, kao što je prikazano primjerom u nastavku:



Slika 82- Primjer „Barionskog trokuta“ za teže barione

1961. godine, kada je ovakav način organizacije uočen, čestica na dnu „trokuta“ (označena oznakom  $\Omega^-$ ) još uvijek nije bila otkrivena! Međutim, Gell – Mann ju je predvidio upravo na temelju ovakvih simetričnih obrazaca, te na temelju njih i pretpostavio svojstva koje bi ova čestica morala imati – primjerice iznos njene mase mirovanja (1672 Mev), spin (3/2), stranost (-3), kao i naboj (-e).[72]

Na temelju navedenih predviđenih podataka mogli su se izmisliti odgovarajući eksperimenti čiji cilj je bio traženje točno takve čestice, a 1964. godine takva čestica, nazvana  $\Omega^-$  uistinu je i detektirana[6], što je potvrdilo validnost ovakvog načina klasifikacije!

Ovakav način predviđanja nepoznatih čestica i njihovih svojstava veoma je sličan Mendeljejevom pristupu u kojem su se, na temelju praznih mjesta u periodnom sustavu elemenata, mogli predvidjeti do tada nepoznati kemijski elementi, kao i njihova svojstva.

Još jedno zapažanje iz koncepta „Osmostrukog puta“ je o podrijetlu jake sile. Naime, pri razmatranju ovog modela uočeno je da se, jednako kao što se električna sila između dva nabijena tijela prenosi česticom izmjene fotonima, jaka sila mora prenesti između nekih drugih manjih nabijenih čestica pomoću čak osam mogućih čestica izmjene.[72]

Na tragu takvih spoznaja, 1964. godine, prema ideji Murray Gell-Manna i njegovih suradnika, razvijeni su početci teorije kvarkova, prema kojoj su upravo kvarkovi, odnosno

čestice spina  $\frac{1}{2}$  koji međudjeluju jakom silom osnovni gradivni elementi mezona i bariona.<sup>114</sup>

Samim time, jasno je da je ideja „Osmostrukog puta“ značajno utjecala na nastanak Standardnog modela i razvitak fizike elementarnih čestica kakvu danas poznajemo.

## 6. Zaključak

Pomoću navedenih i opisanih kartaških igara, različite ideje i koncepti čestične fizike koji se naizgled čine veoma kompliciranima mogu se, kroz zabavu i druženje, približiti igračima različitih uzrasta i sa različitim predznanjem, zbog čega ovakve igre pokazuju velik potencijal u eventualnim pokušajima popularizacije fizike elementarnih čestica.

Uz već postojeće igre, posebno je zanimljiva i značajna mogućnost osmišljavanja novih, različitih igara, koje bi se mogle razviti oko postojećeg špila karata, a u kojima bi se mogle spomenuti i naučiti neke dodatne teme.

Samim time, ovakve igre mogu se nastaviti razvijati paralelno sa novim fizikalnim otkrićima i teorijama, koji se pak onda na taj način mogu približiti različitim skupinama ljudi.

Za kraj ovog rada, spomenuti ću misli dva velika fizičara:

*„Igra je najuzvišeniji oblik istraživanja“ – Albert Einstein[86]*

i

*„Sretni smo što živimo u doba u kojem još možemo otkrivati“ – Richard P. Feynman[87]*

---

<sup>114</sup> Ako dobro promotrimo kvarkovski sadržaj hadrona koji su prikazani na Slikama 80, 81 i 82, možemo uočiti da se u svim ovim slučajevima radi o hadronima koji su izgrađeni od kombinacije tri kvarka - *u*, *s* ili *d*. Upravo je razmatranjem navedenih hadrona i njihovih svojstava simetrije nastala početna kvarkovska teorija iz 1964. godine, u kojoj je predviđeno postojanje navedena tri kvarka!



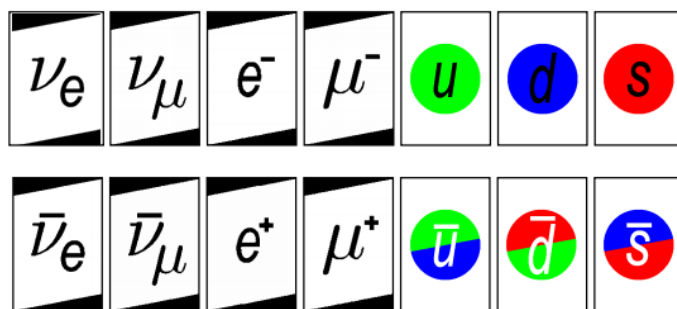
## 7. Dodatak

### 7.1. Upoznavanje sa čestičnim kartama

U špilu karata iz [13] postoji 66 karata, pri čemu svaka od karata prikazuje neku česticu ili antičesticu. Kvarkovi i antikvarkovi označeni su bojama, dok su leptoni i antileptoni označeni crno-bijelim kartama. Kvarkovi koji su prikazani na kartama su gornji ( $u$ ), donji ( $d$ ) i strani ( $s$ ) kvark, a svaki od njih može biti obojan crvenom, zelenom ili plavom bojom, čime je označen i naboj boje pojedinog kvarka. Primjerice, na slici 83 u prvom redu desno možemo vidjeti karte koje predstavljaju zeleni gornji ( $u$ ) kvark, plavi donji ( $d$ ) kvark, kao i crveni strani ( $s$ ) kvark.

Leptoni koji su prikazani kartama u špilu su leptoni prve i druge generacije; dakle elektron ( $e^-$ ), elektronski neutrino ( $\nu_e$ ), mion ( $\mu^-$ ) i mionski neutrino ( $\nu_\mu$ ). Također, u špilu se nalaze i antileptoni navedenih leptona, koji su označeni oznakama  $e^+$ ,  $\mu^+$ ,  $\bar{\nu}_e$  i  $\bar{\nu}_\mu$ . Leptoni su prikazani slijeva u prvom redu slike 83, dok su antileptoni prikazani ispod leptona, u donjem redu. Antikvarkovi  $\bar{u}$ ,  $\bar{s}$  i  $\bar{d}$  obojani su dvjema bojama tako da, primjerice, zeleno-crveno obojani  $d$  antikvark (koji je prikazan u donjem redu na slici) označava „antiplavi“  $d$  antikvark, odnosno antičesticu plavog  $d$  kvarka.

Primjer nekih od karata iz špila nalazi se na sljedećoj slici:



Slika 83 - Prikaz određenih karata u špilju. U gornjem redu nalaze se karte koje predstavljaju čestice, dok se u donjem redu nalaze karte koje predstavljaju antičestice.

### 7.2. Imenovanje hadrona

U sljedećim tablicama nalaze se imena hadrona koji se mogu sastaviti iz dobivenog špila karata. Tablica 25 navodi različite barione, a u Tablica 26 različite mezone.

Tablice prikazuju imena čestica i njihove simbole kao i kvarkovski sadržaj svake od njih. Simboli služe fizičarima za jednostavniji zapis različitih čestica, a možemo uočiti da se simboli hadrona označavaju različitim slovima iz grčkog alfabeta, uz gornji indeks koji zapravo predstavlja naboj hadrona.

#### BARIONI KOJI SE MOGU SASTAVITI OD KARATA U ŠPILJU:

KVARKOVSKI SADRŽAJ	IME ČESTICE	SIMBOL
$uuu$	Delta ++	$\Delta^{++}$
$uud$	proton	$p^+$
	Delta +	$\Delta^+$
$udd$	neutron	$n^0$
	Delta 0	$\Delta^0$
$ddd$	Delta -	$\Delta^-$
$uus$	Sigma +	$\Sigma^+$
$uds$	Lambda 0	$\Lambda^0$
	Sigma 0	$\Sigma^0$

$dds$	Sigma -	$\Sigma^-$
$uss$	Xi 0	$\Xi^0$
$dss$	Xi -	$\Xi^-$
$sss$	Omega	$\Omega^-$

Tablica 25- Popis bariona koji se mogu sastaviti korištenjem karata iz špila<sup>115</sup>

Napomena: U tablici je vidljivo da jednak kvarkovski sadržaj u određenim slučajevima može odgovarati dvjema različitim česticama (primjerice kvarkovski sadržaj  $uud$  može upućivati na proton ili na Delta + česticu). Takva pojava je moguća zbog činjenice da se različite čestice jednakog kvarkovskog sadržaja ipak *razlikuju* u kvantnim brojevima sveukupnog impulsnog momenta  $J$  i pariteta  $P$ . [13]

#### MEZONI KOJI SE MOGU SASTAVITI OD KARATA U ŠPILU:

<b>KVARKOVSKI SADRŽAJ</b>	<b>IME ČESTICE</b>	<b>SIMBOL</b>
$u \bar{d}$	Pozitivni pion	$\pi^+$
$u \bar{u}$	Neutralni pion	$\pi^0$
$d \bar{d}$	Neutralni pion	$\pi^0$
$\bar{u} d$	Negativni pion	$\pi^-$
$u \bar{s}$	Pozitivni kaon	$K^+$
$d \bar{s}$	Neutralni kaon	$K^0$
$\bar{d} s$	Neutralni anti-kaon	$\bar{K}^0$
$\bar{u} s$	Negativni kaon	$K^-$
$s \bar{s}$	Eta mezon	$\eta^0$

Tablica 26- Popis mezona koje je moguće sastaviti korištenjem karata iz špila<sup>116</sup>

Autori su u ovom dodatku spomenuli da su učinili neke simplifikacije kako bi igre koje su sastavili bile jednostavnije i lakše za početnike.

<sup>115</sup> Tablica je napravljena prema tablici iz [13]

<sup>116</sup> Tablica je napravljena po uzoru na tablicu iz [13].

Naime, treba uzeti u obzir da su mezoni takozvani *pseudoskalari*, te da je za razumijevanje njihovih svojstava potrebno napredno znanje kvantne mehanike, zbog čega su učinili sljedeća dva pojednostavljenja:

*Prvo pojednostavljenje:* S obzirom na to da su neutralni pioni zapravo *kombinacije* udruženih kvantno-mehaničkih stanja  $u\bar{u}$  i  $d\bar{d}$ , predlaže se da se svaka sastavljena komponenta (dakle  $u\bar{u}$  ili  $d\bar{d}$ ), može zasebno smatrati neutralnim pionom, kako je navedeno u tablici.[13] Na taj način, primjerice, kod napredne razine u igri „*Kvarkovska tvar*“, ako igrači sastave par karata  $u\bar{u}$  (ili par  $d\bar{d}$ ) koji su neutralni u boji, taj par sam po sebi mogu nazvati neutralnim pionom i tako dobiti dva boda.

*Drugo pojednostavljenje:* Kombinacija karata  $s\bar{s}$  (neutralna u boji) može se smatrati eta mezonom, kako je i navedeno u posljednjem stupcu Tablice 26, iako se realni eta mezoni osim dominantne  $s\bar{s}$  komponente još sastoje i od određenih  $u\bar{u}$  i  $d\bar{d}$  komponenata.[13]

## Popis literature

- [1] Veselinović, S. Elementarne čestice. Završni rad. Osijek: Sveučilište u Osijeku – Odjel za fiziku, 2014.
- [2] Povijest modela atoma, *Edutorij.e-skole*, <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/f8d552c1-03ca-47a1-943a-61ea3e2d1bd0/povijest-modela-atoma.html>, , 23.11.2020.
- [3] Empedoklo, *Wikipedia*, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Empedoklo> , 6.11.2020.
- [4] Demokritova teorija – suprotnost Aristotelovom učenju, *Edutorij.e-skole*, <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/f8d552c1-03ca-47a1-943a-61ea3e2d1bd0/demokritova-teorija-suprotnost-aristotelovom-ucenju.html>, 6.11.2020.
- [5] The Free Dictionary by Farlex, <https://idioms.thefreedictionary.com/nature+abhors+a+vacuum> ,1.1.2021.
- [6] Young, H. D.; Freedman R. Sears and Zemansky's university physics : with modern physics. 13th ed. Carnegie Mellon University, University of California, Santa Barbara: Pearson, 2012

- [7] Labor, J. Fizika 4: Udžbenik za četvrti razred gimnazije. Prvo izdanje. Zagreb: Alfa, 2014
- [8] Chamberlain, O. The early antiproton work, Nobel lecture, December 11, 1959, <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/chamberlain-lecture.pdf>, 18.12.2020.
- [9] Antiproton, *Britannica*, <https://www.britannica.com/science/antiproton> , 18.12.2020.
- [10] Heisenerg ,W. The Physicist's Conception of Nature. 1st ed. London: Hutchinson & Co. Ltd, 1958.
- [11] Riordan, M. The Discovery of Quarks // *Science*. Vol 256, No. 5061 (May 29,1992), str. 1287-1283.
- [12] Lepton, *Wikipedia*, <https://en.wikipedia.org/wiki/Lepton>, 14.12.2020.
- [13] Csörgő, J; Török, C; Csörgő, T. Quark Matter Card Game - Find Your Own Higgs Boson. Third, revised and extended English language edition. 3rd print. Formatted to e-book on 3-18-2014: Lulu Press, 2014.
- [14] Nobelova nagrada za otkriće neutrinskih oscilacija, <http://lapp.irb.hr/~dhrupec/writing/neutrini.pdf> , 13.12.2020.
- [15] Perl, M.L. The Discovery of the Tau Lepton and the Changes in Elementary-Particle Physics in Forty Years. // *Phys. perspect.* 6, (2004), str. 401–427
- [16] Lepton number, *Wikipedia*, [https://en.wikipedia.org/wiki/Lepton\\_number](https://en.wikipedia.org/wiki/Lepton_number) , 13.12.2020.
- [17] Mann, M. The quark and the jaguar : adventures in the simple and the complex. New York: Owl Books, 1994.
- [18] Standard Model of elementary particles, *Wikimedia.org*, [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/00/Standard\\_Model\\_of\\_Elementary\\_Particles.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/00/Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg) ,14.12. 2020.

- [19] Particle conservation laws, (Nov 5, 2020), *LibreTexts*,  
[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University\\_Physics/Book%3A\\_University\\_Physics\\_\(OpenStax\)/Map%3A\\_University\\_Physics\\_III\\_-\\_Optics\\_and\\_Modern\\_Physics\\_\(OpenStax\)/11%3A\\_Particle\\_Physics\\_and\\_Cosmology/11.03%3A\\_Particle\\_Conservation\\_Laws](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_(OpenStax)/Map%3A_University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_(OpenStax)/11%3A_Particle_Physics_and_Cosmology/11.03%3A_Particle_Conservation_Laws), 13.12.2020.
- [20] Barr. A.J. The quark model and deep inelastic scattering (18.1.2014.), <http://www-pnp.physics.ox.ac.uk/~barra/teaching/hadrons.pdf> , 16.12.2020.
- [21] Extra dimensions, gravitons and tiny black holes, *CERN Accelerating science*,  
<https://home.cern/science/physics/extra-dimensions-gravitons-and-tiny-black-holes>  
,19.12.2020.
- [22] Feynman diagram maker, <https://www.aidansean.com/feynman/>
- [23] Strong interaction, *Wikipedia*, [https://en.wikipedia.org/wiki/Strong\\_interaction](https://en.wikipedia.org/wiki/Strong_interaction),  
11.12.2020.
- [24] Standardni model, *Wikipedia*, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Standardni\\_model](https://hr.wikipedia.org/wiki/Standardni_model) ,  
11.12.2020.
- [25] Picek, I. Higgsova čarolija i Nobelova nagrada za Fiziku 2013. g.// Matematičko-fizički list,  
LXIV , 2 (2013. – 2014.) Str. 139-141
- [26] Quark Matter at RHIC: It's in the Cards, *Brookhaven National Laboratory*,  
<https://www.bnl.gov/rhic/news2/news.asp?a=2175&t=today> , 11.12.2020.
- [27] Picek, I. Moderna kozmologija - trijumf i izazov fizike, PMF Zagreb,  
[http://www.phy.pmf.unizg.hr/~picek/Picek\\_HAZU05.pdf](http://www.phy.pmf.unizg.hr/~picek/Picek_HAZU05.pdf) , 10.12.2020.
- [28] Veliki prasak (28.3.2000.), [http://eskola.hfd.hr/fizika\\_svemira/povijest/prasak.html](http://eskola.hfd.hr/fizika_svemira/povijest/prasak.html) ,  
10.12.2020.
- [29] Topić, A; Karma, H.; Puljak, I. Razumjevanje Svemira (Understanding the Universe).  
Seminarski rad. FESB Split

- [30] Unified forces, *CERN Accelerating science*, <https://home.cern/science/physics/unified-forces> ,9.12.2020.
- [31] Epoha elektroslabe sile (4.4.200.), [http://eskola.hfd.hr/fizika\\_svemira/povijest/ew.html](http://eskola.hfd.hr/fizika_svemira/povijest/ew.html), 9.12.2020
- [32] Pearson Education, *Addison Wesley*, <https://www.physast.uga.edu/~rls/1020/ch23/23-04.jpg>
- [33] Unified forces, *CERN Accelerating Science*, <https://home.cern/science/physics/unified-forces> , 9.12.2020.
- [34] Epoha velikog ujedinjenja (21.9.2000.), [http://eskola.hfd.hr/fizika\\_svemira/povijest/gut.html](http://eskola.hfd.hr/fizika_svemira/povijest/gut.html) , 9.12.2020.
- [35] Quark Epoch, *History of the universe*, <https://historyoftheuniverse.com/mobi.php?p=quarkEpoch.html> , 9.12.2020.
- [36] Gluons, *History of the universe*, <https://historyoftheuniverse.com/mobi.php?p=quarkEpoch.htm> 10.12.2020.
- [37] Leptonska epoha (4.4.2000.), [http://eskola.hfd.hr/fizika\\_svemira/povijest/lept.html](http://eskola.hfd.hr/fizika_svemira/povijest/lept.html) , 10.12.2020.
- [38] Fotonska epoha (4.4.2000.),[http://eskola.hfd.hr/fizika\\_svemira/povijest/foton.html](http://eskola.hfd.hr/fizika_svemira/povijest/foton.html), 10.12.2020.
- [39] Trafton, A. Explained: Quark-Gluon Plasma (9.6.2010.), *MIT News Office*, <https://news.mit.edu/2010/exp-quark-gluon-0609>, 10.12.2020.
- [40] Heavy ions and quark-gluon plasma, *CERN Accelerating Science*, <https://home.cern/science/physics/heavy-ions-and-quark-gluon-plasma> , 10.12.2020.

- [41] Trafton, A., Explained: Quark-Gluon Plasma (9.6.2010.), *MIT News Office*  
<https://news.mit.edu/2010/exp-quark-gluon-0609> , 12.10.2020.
- [42] Csörgő, J.; Török, Cs; Csörgő, T. Memory of quark matter card game. H- 1525 Budapest 114,  
POBox 4, Hungary
- [43] Atom Smasher Sets Guinness Record for Hottest Man-Made temperature, *Livescience*,  
<https://www.livescience.com/21183-rhic-guinness-highest-temperature.html> , 16.1.2021.
- [44] Kovacs J.S.; Lane W. C. Conservation laws for elementary particle reactions. Michigan State  
University, 2001, [http://www.physnet.org/modules/pdf\\_modules/m256.pdf](http://www.physnet.org/modules/pdf_modules/m256.pdf) , 11.12.2020.
- [45] Kovacs J.S.; Lane W. C. Conservation laws for elementary particle reactions. Michigan State  
University, 2001 [http://www.physnet.org/modules/pdf\\_modules/m256.pdf](http://www.physnet.org/modules/pdf_modules/m256.pdf), 15.12.2020.
- [46] Williams, W.S.C. Nuclear and Particle physics. University of Oxford Department of Physics:  
Oxford science publication, 1997.
- [47] [Kozmičke zrake – Wikipedija \(wikipedia.org\)](#) ,15.12.2020.
- [48] Eicher D.J. Where do cosmic rays come from? (1.7.2019),  
<https://astronomy.com/magazine/greatest-mysteries/2019/07/21-where-do-cosmic-rays-come-from> , 15.12.2020.
- [49] Victor. F.Hess, *The Nobel Prize*,  
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1936/hess/facts/> , 16.12. 2020.
- [50] Cosmic rays: Particles from outer space, *CERN Accelerating Science*,  
<https://home.cern/science/physics/cosmic-rays-particles-outer-space> , 16.12. 2020.
- [51]The Heliosphere, *National Aeronautics and Space Administration*,  
[https://www.nasa.gov/pdf/623511main\\_IBEX\\_lithograph.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/623511main_IBEX_lithograph.pdf) 16.12.2020.
- [52] Chandra X-Ray Observatory, <https://chandra.harvard.edu/photo/2002/0052/more.html>,  
16.12.2020.



- [53] The Pierre Auger Collaboration, *The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory*, <https://arxiv.org/pdf/1502.01323.pdf>, 17.12.2020.
- [54] Air shower (physics), *Wikipedia*, [https://en.wikipedia.org/wiki/Air\\_shower\\_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Air_shower_(physics)), 17.12.2020.
- [55] Rao, M.V.S. *Extensive Air Showers*. Singapore: *World Scientific Publishing Co Pte Ltd*, 1998.
- [56] Cosmic-ray air showers, <https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/CosmicRay/Showers.html>, 18.12.2020.
- [57] Csörgő, T. *Higgs boson – on your own*. Hungary: MTA Wigner Research Center for Physics, Institute for Particle and Nuclear Physics H- 1525 Budapest 114, POBox 49, 2013.
- [58] Lightman, A P. *The discoveries: great breakthroughs in twentieth-century science, including the original papers*. Toronto: Alfred A. Knopf Canada. p. 8., 2005.
- [59] Đurić, S. *Otkriven Higgsov bozon?* // Matematičko-fizički list. LXIII, 1 (2012. – 2013.) , str. 3-5.
- [60] The Standard Model, *CERN Accelerating Science*, <https://home.cern/science/physics/standard-model>, 17.11.2020.
- [61] The Higgs Boson, *CERN Accelerating Science*, <https://home.cern/science/physics/higgs-boson>, 17.11.2020.
- [62] The Higgs Boson: the hunt, the discovery, the study and the future perspectives (4.7.2018.), *ATLAS Experiment*, <https://atlas.cern/updates/atlas-feature/higgs-boson>, 17.11.2020.
- [63] Greene, B. How the Higgs boson was found. (07/2013), *Smithsonian magazine*, <https://www.smithsonianmag.com/science-nature/how-the-higgs-boson-was-found-4723520/> 17.11.2020.

- [64] The Higgs boson's shadow – Determination of the off-shell Higgs boson signal strength in the high mass ZZ final state with the ATLAS detector, (14.7.2014.), *ATLAS Experiment* <https://atlas.cern/updates/briefing/higgs-boson-s-shadow> , 18.11.2020.
- [65] Higgs boson gives next- generation particles its heft, (6.8.2019), *Scientific American*, <https://www.scientificamerican.com/article/higgs-boson-gives-next-generation-particle-its-heft/>, 18.11.2020.
- [66] Long sought decay of Higgs boson observed, (28.8.2018.), *CERN Accelerating Science*, <https://home.cern/news/press-release/physics/long-sought-decay-higgs-boson-observed> , 20.11.2020.
- [67] Higgs boson probes for new phenomena, (28.10.2020.), *ATLAS Collaboration*, <https://atlas.cern/updates/physics-briefing/higgs-boson-probes-new-phenomena>, 20.11.2020.
- [68] Stanev, T. Cosmic Rays and Extensive Air Showers. Newark, Delaware 19716 Australia: Bartol Research Institute, Department of Physics and Astronomy, University of Delaware, <https://cds.cern.ch/record/1247048/files/p272.pdf>, 1.12.2020.
- [69] Rosner, J.L. *The Eightfold way*, <http://hep.uchicago.edu/~rosner/eight.pdf>, 1.12.2020.
- [70] *Hyperphysics*, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/quark.html>, 2.12.2020.
- [71] Eightfold way (physics), *Wikipedia*, [https://en.wikipedia.org/wiki/Eightfold\\_way\\_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Eightfold_way_(physics)), 2.12.2020.
- [72] Sembroski C. *The eightfold way* , <https://webhome.phy.duke.edu/~kolena/modern/sembroski.html> , 3.12.2020.
- [73] Csörgő, T.; Csernai, L.P.; Vargyas M., TOTEM MAHJONGG, PARTICLE POKER and outreach quark matter card games , <https://www.slideserve.com/xanthe/totem-mahjongg-particle-poker-and-outreach-quark-matter-card-games> , 24.12.2020.

- [74] Csörgo, T; Novak, T. QUARK WARS: A particle physics outreach game in the age of Star Wars. Hungary, 2016, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1612/1612.05200.pdf> , 27.12.2020.
- [75] Perfect Fluid of Quarks – 40th o Rubiks Cube, <https://slideplayer.com/slide/10818428/> , 28.12.2020.
- [76] Csörgo, T. Qbe: Quark Matter on Rubik's Cube. Hungary, 2017, <https://arxiv.org/pdf/1702.06217.pdf> , 28.12.2020.
- [77] *Pravila online pokera*, <https://www.pokerstars.eu/hr/poker/games/rules/>, 22.12.2020.
- [78] Vargyas , M.; Csörgő, T; Csernai L.P. Particle Poker. University of Jyväskylä, P.O. Box 35 (YFL) FI-40014 University of Jyväskylä, Jyväskylä, Finland; Károly Róbert Főiskola, 36 Mátrai street, 3200 Gyöngyös, Hungary; Wigner Research Centre for Physics, 29-33. Konkoly-Thege Miklós street, Budapest, Hungary; University of Pannonia, ISES, 14 Chernel street, Kőszeg, Hungary ; University of Bergen, Allegaten 55, 5007 Bergen, Norway. 21.10.2014, [https://indico.cern.ch/event/439280/contributions/1941107/attachments/1141648/1850811/vargyas\\_wpcf14\\_proceedings\\_V2.pdf](https://indico.cern.ch/event/439280/contributions/1941107/attachments/1141648/1850811/vargyas_wpcf14_proceedings_V2.pdf) , 24.12.2020.
- [79]Erno Rubik, *Britannica*, <https://www.britannica.com/biography/Erno-Rubik> , 28.12.
- [80] How to solve a Rubik's cube: So Easy a 3 Year Old Can do It! Easy beginner step by step Tutorial, (27.1.2019.), *Kevin Gittemeier*, <https://www.kevingittemeier.com/how-to-solve-rubiks-cube-easy/>, 28.12.2020.
- [81] Kiss, S. Educational challenges of Rubik's Cube. Rubik Studio, Városmajor 74., Budapest, Hungary, H-1122, 31.3.2015. , <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1505/1505.00750.pdf> , 29.12.2020.
- [82] Records, *3x3x3 Cube*, <https://www.worldcubeassociation.org/results/records> , 30.12.
- [83] Asimov, I. Adding a Dimension: Seventeen Essays on the History of Science.: Dobson Books Ltd, 1966.

- [84] Feynman R.P. as told to Ralph Leighton. What Do You Care What Other People Think?: Further Adventures of a Curious Character. New York; London: W. W. Norton & Company, 1988.
- [85] Standard Model, *Wikipedia*,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Standard\\_Model#/media/File:Elementary\\_Particle\\_Interactions.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model#/media/File:Elementary_Particle_Interactions.png), 4.1.2021.
- [86] Werbach K; Huner, D. For the win: How game thinking can revolutionize your business. Philadelphia: Wharton Digital Press, 2012.
- [87] Hawking, S.; Mlodinow, L. A briefer history of time, Ebook: Penguin Random House, 2007.
- [88] Ludwig Boltzmann, *Wikipedia*, [https://en.wikipedia.org/wiki/Ludwig\\_Boltzmann](https://en.wikipedia.org/wiki/Ludwig_Boltzmann), 14.1.2021.
- [89] Klabučar, D. Kvantni start: Oprezni Planck i radikalni Einstein, Šibenik: EXP EDIT, 2005.
- [90] CKM Matrix, *Wikipedia*,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Cabibbo%E2%80%93Kobayashi%E2%80%93Maskawa\\_matrix](https://en.wikipedia.org/wiki/Cabibbo%E2%80%93Kobayashi%E2%80%93Maskawa_matrix), 20.2.2021.
- [91] Electroweak interaction, *Wikipedia*,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Electroweak\\_interaction](https://en.wikipedia.org/wiki/Electroweak_interaction), 21.2.2021.

