



UNIVERZITET U NOVOM ŠADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI  
FAKULTET  
DEPARTMAN ZA FIZIKU



# Savremeni sadržaji i pristup nastavi fizike elementarnih čestica

- diplomski rad -

Mentor:  
prof. Miroslav Vesković

Kandidat:  
Elvira Đurđić

Novi Sad, 2010.

## SADRŽAJ

1. Uvod	2
2. Istorijski uvod i razvoj fizike elementarnih čestica	4
3. Klasifikacija elementarnih čestica	7
3.1. Fermioni	8
3.1.1. Leptoni	8
3.1.2. Kvarkovi	9
3.2. Bozoni	11
4. Osnovne interakcije u prirodi	13
4.1. Gravitaciona interakcija	14
4.2. Elektromagnetna interakcija	15
4.3. Slaba interakcija	15
4.4. Jaka interakcija	19
5. Akceleratori	21
5.1. Akceleratori sa fiksnom metom	22
5.2. Akceleratori sa sudarajućim snopovima	23
6. Detektori	26
6.1. Mehuraste komore	28
6.2. Multižičane proporcionalne komore	28
6.3. Drift komore	29
6.4. Poluprovodnički detektori	30
6.5. Piksel detektori	30
6.6. Kalorimetri	30
6.7. Scintilacioni detektori	31
6.8. Čerenkovljevi detektori	32
7. Primer vođenja nastavnog časa	34
7.1. Nastavna jedinica „Kosmičko zračenje“	36
7.2. Nastavna jedinica „Čestice i antičestice“	43
8. Dodatne savremene aktivnosti u nastavi fizike elementarnih čestica	48
9. Zaključak	50
10. Literatura	51
11. Biografija	52
12. Ključna dokumentacijska informacija	53

## 1. UVOD

*“Ako sam video dalje od drugih, to je stoga što sam stajao na plećima divova”.*

Upravo ovim Njutnovim rečima, napisanim u jednom od pisama Robertu Huku 1676. godine, želim da započnem svoj diplomski rad, jer smatram da je izuzetno važno da profesori fizike u srednjim školama, a pogotovo gimnazijama, svojim učenicima ukažu na važnost i neophodnost poznavanja istorijskih činjenica vezanih za nastanak i razvoj grane fizike koja se bavi elementarnim česticama. Još veću važnost pridajem povezivanju tih istorijskih činjenica sa savremenim saznanjima ove oblasti koja se i dalje, iz dana u dan, razvija.

Zahvaljujući istraživanjima i razvoju tehnologija u oblasti fizike elementarnih čestica 1990. godine u CERN-u (Evropski centar za nuklearna istraživanja) je nastao i World Wide Web (www), bez koga je danas život praktično nezamisliv. Pored toga, internet je danas i nepresušan izvor velike količine informacija koja profesoru može veoma mnogo pomoći u nastavi. Materijal koji se može naći prave naučnici na osnovu svojih istraživanja, učesnici edukativnih seminara i radionica kao i profesori na osnovu svog iskustva upotpunjenog novim informacijama i saznanjima. Iz ovog velikog obilja materijala, ključno je odabrati materijal koji doprinosi pravilnom razumevanju ove oblasti, koji formira matematičku osnovu Standardnog modela, koji jasno pravi razliku između vizuelizacije i realnog događaja, materijal koji naglašava razliku između naših uobičajenih shvatanja pojmova, na primer, „ukus“ i „boja“ od onog koji se koristi u fizici elementarnih čestica.

Osim toga, za ovu oblast vlada veliko interesovanje. Postoji nekoliko aktivnih eksperimenata kojima je posvećeno mnogo pažnje u svim medijima i od posebne je važnosti učenicima na osnovu njihovog predznanja preneti najvažnije postavke, kako bi umeli da prepoznaju relevantne informacije od onih koje to nisu. Pored toga, u te eksperimente i naučna istraživanja se ulažu izuzetno velika materijalna sredstva poreskih obveznika, te tako imaju pravo da znaju na šta se njihov novac troši. Imajući uvid u materijalna ulaganja u velike ekperimente, mladima se pokazuje spremnost u ulaganje u nauku i tehnološki razvoj.

Kroz razvoj nauke, dolazi do velikog tehnološkog razvoja. Već je pomenut World Wide Web, ali pored njega postoji veoma veliki broj tehnoloških inovacija koje su prvobitno korišćene samo u naučno-istraživačke svrhe, a kasnije su se prenele i na svakodnevni život. Savremena nauka zahteva i najnovije materijale i najbrže računare, brz prenos informacija, nove ideje i mlade ljude spremne da se bave naukom.

Profesorima preporučujem da učenicima predstavite ovu oblast kao oblast za koju je potrebno predznanje iz svih do tada pređenih oblasti fizike kao što su mehanika, elektromagnetizam, atomska i nuklearna fizika, kako bi učenicima pokazali kako se znanja iz tih oblasti veoma uspešno primenjuju i danas kroz najsavremenije eksperimente i uz pomoć njih stiže do najnovijih naučnih otkrića.

Na osnovu prenesenih činjenica iz prošlosti, sadašnjosti i o mogućnostima u budućnosti, kojima se zaokružuje četvorogodišnja nastava fizike, učenicima se pruža uvid u sadašnjost i pogled u budućnost kroz najmoderniju granu fizike koja i dalje traga za fundamentalnim odgovorima na pitanja o „prirodi prirode“.

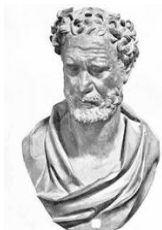
U prvih pet poglavlja su predstavljeni sadržaji iz oblasti fizike elementarnih čestica od izuzetne važnosti za učenike, i to na način koji je njima blizak i razumljiv i kojim se ispunjava predlog o povezivanju stečenih znanja iz prethodno obrađivanih oblasti fizike. Istorijske činjenice su implementirane na odgovarajući način, te tako na veoma jednostavan način dolazi do povezivanja prošlosti, sadašnjosti i na neki način, budućnosti. To je od suštinske važnosti.

U sedmoj glavi su na primeru dve nastavne jedinice prikazani načini implementacije kako modernih tehnologija u vidu korišćenja računara u nastavi i svih njegovih prednosti, tako i novih naučnih saznanja koja ne mogu da se pronađu u udžbenicima.

Uz sve navedeno, od krucijalne je važnosti da se u tačno određenoj meri koristi vizuelizacija nekih pojmova, kao što su na primer kvarkovi. U četvrtom razredu gimnazije učenici poseduju dovoljno predznanje i zrelost da kvarkove shvate kao „kvantne objekte“ (objekte čije su dimenzije premale da bi na njih mogli da se primene zakoni klasične fizike), koji se isključivo radi lakšeg razumevanja, predstavljaju kao obojene lopte. Neophodno je naglasiti, čak i više puta, da su termini „ukus“ i „boja“ samo načini razlikovanja određenih, novih karakteristika subatomske čestice, sa kojima se naučnici ranije nisu sretali i da ti termini nemaju nikakve veze sa našim svakodnevnim osećajem ukusa i boje. Termin „boja“ se može veoma razumljivo i jednostavno objasniti u kontekstu dodatnog stepena slobode, kojeg je bilo neophodno uvesti zbog Paulijevog principa isključenja (dve čestice identičnih karakteristika-spin, naelektrisanje, itd. ne mogu da se nađu u istom kvantnom stanju) koji se obrađuje u okviru nastavne oblasti „Kvantna fizika“ ranije u toku školske godine.

## 2. ISTORIJSKI UVOD I RAZVOJ FIZIKE ELEMENTARNIH ČESTICA

Ideja da je svet oko nas sačinjen iz elementarnih čestica ima veoma dugu istoriju.



Oko 400. godine p.n.e. grčki filozofi Demokrit (Slika 1.), Leukip i Epikur izneli su ideju da je materija sačinjena od nevidljivih i nedeljivih čestica koje su oni tada nazvali *atomi*, a reč je složena iz dve reči- *a-ne* i *tomos*-deljiv. Ovom temom su se bavili i drevni indijski filozofi Kanada, Dignaga i Darmakirti. Ovom temom nastavili su da se bave u srednjem veku Alhazen, Avicena i Algazel. Fizičari rane moderne Evrope, kao što su Kasendi, Bojl i Njutn koji su podržavali korpuskularnu teoriju svetlosti, u svojim apstraktima i filozofskim razmatranjima imali su elemente atomističke teorije.

Slika 1.

Demokrit (460-370. p.n.e.)



Ova ideja je bila zaboravljena skoro 22 veka, sve do 1804. godine, kada je engleski naučnik Džon Dalton (Slika 2.), koga često nazivaju ocem moderne hemije, kroz svoj rad o stehiometriji zaključio da je svaki element prirode sačinjen iz jednog, unikatnog tipa čestice. Dalton i njegovi saradnici su verovali da su to fundamentalne čestice prirode i tako ih, po ugledu na prethodnike-grčke filozofe atomiste, nazvali *atomi*.

Slika 2.

Dž. Dalton (1766-1844)

Tokom XIX veka postalo je jasno da atomi nisu nevidljivi. Postojanje karakterističnog atomskog spektra elemenata ukazivalo je na to da atomi imaju neku unutrašnju strukturu. Izučavajući karakteristike katodnih zraka, 1897. godine Dž.Dž. Tomson (Slika 3.) je primetio da oni mogu biti skrenuti sa svoje putanje uz pomoć električnog polja. Zaključio je da te zrake čine veoma lake, negativno naelektrisane čestice koje je on tada nazvao *korpuskule*. Kasnije su naučnici odlučili da te čestice nazovu *elektroni*, kako ih je 1894. godine, pre Tomsonovog otkrića, nazvao Dž.Dž. Stouni. Tomson je verovao da su se korpuskule (elektroni) pojavili iz atoma unutar njegovih katodnih cevi. Tako je zaključio da su atomi deljivi i da atome sačinjavaju korpuskule. Da bi objasnio neutralnost atoma kao celine, on je predložio da su korpuskule raspoređene u uniformnom moru pozitivnog naelektrisanja. Ovaj Tomsonov model atoma još je poznat i kao model „šljiva u pudingu“, jer su korpuskule bile utisnute u pozitivno naelektrisanje kao šljive u pudingu.



Slika 3.

Dž.Dž. Tomson (1856-1940)

1886. godine je E. Goldštajn, izučavajući anodne zrake, otkrio da su oni sačinjeni od pozitivno naelektrisanih čestica i jona. Međutim, pošto čestice u različitim gasovima nisu imale isti odnos naelektrisanja i mase ( $e/m$ ), nije ih jednoznačno mogao identifikovati kao što je to uradio Tomson sa elektronom. Nakon otkrića atomskog jezgra E. Raderforda 1911. godine, A. van den Bruk je predložio da mesto svakog elementa u periodnom sistemu odgovara naelektrisanju jezgra. Ovo je 1913. godine i eksperimentalno potvrdio H. Mosli koristeći  $x$ -zrake.

1919. godine Raderford je dokazao da se jezgro vodonika nalazi i u ostalim atomskim jezgrima i ovo se često smatra otkrićem *protona*.

Otkriće čestice koja sa protonima sačinjava atomsko jezgro bilo je veoma značajno. 1930. godine nemački fizičari V. Bote i H. Beker su otkrili da kada  $\alpha$ -čestice emitovane pri radioaktivnom raspadu polonijuma padaju na određene lake elemente kao što su berilijum, bor ili litijum, posle udara  $\alpha$ -čestica emituju zračenje koje ima mnogo veću moć prodiranja od samih  $\alpha$ -čestica. U prvi mah su pomislili da se radi o  $\gamma$ -zracima izuzetno visoke energije, kakve ranije nisu sreli, ali rezultate eksperimenta je bilo jako teško tumačiti u smislu  $\gamma$ -zraka. 1932. godine su I. Žolio-Kiri i F. Žolio pokazali da ako to visoko energetske zračenje pada na parafin ili bilo koje jedinjenje koje sadrži vodonik, izbija protone izuzetno visoke energije. Ovo samo po sebi nije bilo nekonzistentno sa teorijom  $\gamma$ -zraka, međutim detalje i rezultate eksperimenta je bilo skoro nemoguće tumačiti na toj osnovi.



1932. godine u Mančesteru Dž. Čadvik (Slika 4.) je izveo seriju eksperimenata u kojima pokazuje da to zračenje ne može da bude  $\gamma$ -zračenje. Njegova pretpostavka je bila da je to zračenje sačinjeno iz elektroneutralnih čestica mase približne masi protona i izveo je niz eksperimenata koji su potvrdili tu njegovu pretpostavku. Te čestice nazvane su *neutroni*. Otkriće neutrona je razrešilo misteriju sastava atomskog jezgra. Pre 1930. se smatralo da masa jezgra zavisi isključivo od protona i niko nije razumeo zašto odnos mase i naelektrisanja

nije bio isti za sva jezgra.

Slika 4.

Dž. Čadvik (1891-1974)

Posle otkrića neutrona, kada je dobijena jasna slika atomskog jezgra i samog atoma, mnogi su pomislili da je sve otkriveno. Međutim, naprotiv, to je bio samo početak.

K.D. Anderson je 1932. otkrio pozitrone, a 1937. mione i tako su se kroz eksperimente narednih godina otkrivale novije čestice.

Međutim, nakon otkrića protona, i teorijska fizika je doživela veliki razvoj- kvantna mehanika zajedno sa Šredingerovom jednačinom doživele su pravi procvat u narednih 15-ak godina.

1928. godine je P. Dirak (Slika 5.) razvio relativističku generalizaciju Šredingerove jednačine za elektrone. Revolucionarno u njegovom radu je to što je za slobodan elektron generalizacija predviđala ne samo kontinuum energetskih stanja većih od njegove energije mirovanja ( $m_e c^2$ ) nego i kontinuum negativnih energetskih stanja manjih od ( $-m_e c^2$ ). Dirakovo tumačenje je bilo da su sva stanja negativne energije popunjena elektronima koji ne mogu da se opaze iz nekog razloga. Paulijev princip isključenja bi u tom slučaju zabranio prelaz iz negativnog u već zauzeto stanje pozitivne energije. Dirak je pokušao to da objasni upražnjenim mestima protona, ali posle Andersonovog otkrića pozitrona,



postalo je jasno da su ta „upražnjena mesta protona“ zapravo pozitroni.

Slika 5.

P. Dirak (1902-1984)

1949. godine R. Fejnman je pokazao da pozitroni matematički mogu biti opisani kao elektroni koji se kreću unazad u vremenu.

U drugoj polovini XX veka nastavljeno je kako sa eksperimentalnim tako i sa teorijskim istraživanjima u pokušaju da se utvrdi da li čestice koje su do tad otkrivene (elektron, proton, neutron,...) imaju neku unutrašnju strukturu. 1964. godine su Gel-Man (Slika 6.) i Dž. Cvajg, nezavisno jedan od drugog, predložili kvark model. Do ove ideje došli su posle Gel-Manove formulacije klasifikacije čestica poznate pod nazivom „*Eightfold Way*“ (Osmostruki put) 1961.



godine. Ova teorija je poznata i pod nazivom *SU(3) teorija*. Do tada je već bila poznata podela na hadrone i leptone i Gel-Man i Cvajg su pretpostavili da hadroni nisu elementarne čestice, već da su i oni sačinjeni od *kvarkova i anti-kvarkova*. 1968. godine na SLAC-u (*Stanford Linear Accelerator Center*) je eksperimentalno dokazana unutrašnja struktura protona. Iste godine na SLAC-u su prvi put opaženi *up* i *down* kvarkovi. Nakon toga usledile su i eksperimentalne potvrde ostalih kvarkova- *charm* i *strange* 1974. takođe na SLAC-u, *top* 1995. i *bottom* 1977. godine u Fermilab-u (*Fermi National Accelerator Laboratory*).

Slika 6.

M. Gel-Man (1929- )

Tako su svi leptoni i kvarkovi, načini na koje oni međusobno interaguju, kao i bozoni (čestice koje su prenosioci interakcije) 70-tih godina XX veka, ujedinjeni u teoriju koja za sada najbolje opisuje svet oko nas- *Standardni model*, koji je svoju najnoviju potvrdu dobio 2000. godine eksperimentalnim otkrićem *tau neutrina*, a u narednom periodu se očekuje, ukoliko se otkrije *Higsov bozon*, i finalna potvrda.

Danas fizičari pokušavaju da odgovore na mnoga pitanja koja se tiču porekla mase, osnovnih zakona i interakcija koji vladaju među elementarnim česticama. Neka konkretna pitanja su „Da li je Higsov mehanizam generisanja mase elementarnih čestica putem elektroslabe interakcije zaista osnovni mehanizam sticanja mase?“, „Da li je supersimetrija, kao nastavak Standardnog Modela, moguća u prirodi i ako jeste, da li to znači da svaka čestica ima svog supersimetričnog partnera?“. U narednim godinama očekuju se odgovori na ova pitanja, ali isto tako i postavljanje novih.

### 3. KLASIFIKACIJA ELEMENTARNIH ČESTICA

Pre početka klasifikacije elementarnih čestica potrebno je objasniti i definisati naziv „elementarna čestica“.

Termin „elementarna čestica“ upućuje na nešto što je nedeljivo, bez unutrašnje strukture, što zadržava ponašanje i osobine pojedinačnog u svim interakcijama. Uopšte, ovaj termin, kao i mnoge druge fizičke pojmove, ne treba shvatiti suviše bukvalno. Oni su nasleđeni i koriste se samo zato što nisu definisani adekvatniji pojmovi.

Elementarne čestice se najčešće definišu na sledeći način: to su čestice kojima se na određenom nivou razvoja fizike ne može pripisati unutrašnja struktura, odnosno koje pri uzajamnom delovanju sa drugim česticama ili poljima ostaju nedeljive, jedinstvene celine (zadržavaju svoj identitet).

Pojam „elementarna čestica“ ima i dvojni karakter. S jedne strane, elementarno, samo po sebi znači da je nešto jednostavno, nedeljivo u datim uslovima. S druge strane pod tim elementarnim se podrazumeva nešto što je osnovno, fundamentalno, što ulazi u sastav drugih objekata. U tom kontekstu treba shvatiti elementarne čestice kao one koje ulaze u sastav atomskog jezgra, atoma, molekula, itd.

Postavlja se pitanje da li postoji granica u deobi materije, tj. da li se može dokazati složena struktura elementarnih čestica u klasičnom smislu, kao što je to bio slučaj sa atomom. Preciznije, da li će se ikada pronaći čestica koja nije više deljiva, koja predstavlja najmanji element građe u strukturnoj organizacije materije? Poučeni ranijim iskustvom (deljivost „nedeljivog“ atoma), ne možemo dati pouzdani odgovor. O daljoj strukturnoj podeli materije se veoma intenzivno raspravlja u savremenoj literaturi, pa se tako konstruišu i razni teorijski modeli kao što su modeli subkvarkova, preona, rimona, itd. S druge strane, može se smatrati da postavljeno pitanje nije sasvim opravdano, jer su elementarne čestice specifičan oblik postojanja materije koji ne karakteriše stoga geometrijska forma (lopta, prizma, itd.). One imaju korpuskularno-talasna svojstva. Većina čestica koje nazivamo elementarnim u užem smislu te reči, ne živi duže od milionitog dela sekunde, čak i kada su isključeni svi oblici spoljašnjih interakcija. Slobodni neutron (izvan atomskog jezgra), za koga se kaže da ima relativno dug život, može da postoji desetak minuta. Iz ovoga zaključujemo da elementarne čestice imaju dinamički, procesualni karakter- one se neprestano međusobno transformišu. U interakcijama elementarnih čestica „rađaju se“ nove čestice koje se ne mogu posmatrati kao sastavni delovi čestica „roditelja“ u klasičnom smislu. Zato je prikladnije reći da se one transformišu ili pretvaraju, umesto da se sastoje.

Iz istorijskog razvoja fizike elementarnih čestica može se videti da su do 1947. godine bile poznate samo sledeće subatomske čestice: foton, elektron, pozitron, proton, neutron, mion i pion. Nakon toga usledio je eksponencijalni rast broja novootkrivenih subatomskih čestica u eksperimentima pomoću akceleratora. Velika većina tih čestica je nestabilna i spontano se raspada na stabilnije čestice. Sve te čestice, bilo da su one stabilne ili nestabilne, mogu se stvoriti ili razoriti u interakcijama među česticama. Svaka interakcija implicira razmenu virtuelnih čestica.

U početku, klasifikacija čestica je vršena na osnovu njihove mase, pa su tako one bile podeljene u tri kategorije: *leptone* (male mase, kao elektroni), *mezone* (srednje masivne, kao pioni) i *barione* (velike mase, kao što su proton i neutron). Međutim ova podela na osnovu mase je zamenjena korisnijom-podelom na osnovu načina interakcije čestica. Tako se dele na *hadrone* (koji



uključuju mezone i barione) koji interaguju jakom interakcijom, i *leptone* koji ne interaguju jakom interakcijom.

Međutim, mnogo opštija podela je na osnovu spina čestica. Spin je sopstveni ugaoni moment impulsa posmatrane čestice i njegovo je neotuđivo svojstvo, kao što su to masa i naelektrisanje. Ove karakteristike čestica (spin, masa, naelektrisanje, itd.) su matematičke analogije. Prema ovom kriterijumu čestice se dele u dve grupe:

1. *Fermione*
2. *Bozone*

### 3.1. Fermioni

Po definiciji *fermioni* su čestice koje podležu Fermi-Dirakovoj statistici, a to znači da će, ako teorijski, matematičkim operacijama, „zarotiramo“ fermion oko njegove ose za  $360^\circ$ , talasna funkcija fermiona promeniti znak. Tako znamo da fermioni imaju polucele vrednosti spina ( $1/2, 3/2, 5/2\dots$ ) Ovo antisimetrično ponašanje talasne funkcije ukazuje na to da fermioni podležu i Paulijevom principu isključenja, što znači da dva ista fermiona ne mogu biti u istom kvantnom stanju u isto vreme. Ovo ukazuje na strogo određena stanja u kojima fermion može biti, pa se često za njih kaže da su konstituenti materije.

Sve poznate fermione mozemo podeliti u dve grupe:

1. *Leptone*
2. *Kvarkove*

#### 3.1.1. Leptoni

Naziv „lepton“ potiče od grčke reči "λεπτός" (leptos) što znači fin, mali, tanak. Naziv lepton je prvi upotrebio E. Rosenfeld 1948. godine.

Leptoni su familija elementarnih čestica koje mogu da interaguju elektromagnetnom, gravitacionom i slabom interakcijom. Postoji 6 vrsta leptona, koji su podeljeni u 3 generacije. Njihove karakteristike se nalaze u Tabeli 1.

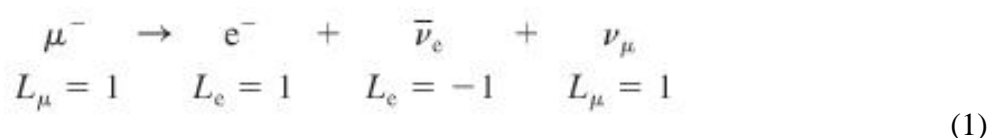
Ukus	Masa (MeV/c <sup>2</sup> )	Električni naboj	$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$	Vreme života (s)
$e^-$ (elektron)	0.511	-1	+1	0	0	stabilan
$\nu_e$ (elektronski neutrino)	$< 2.2 \times 10^{-6}$	0	+1	0	0	stabilan
$\mu^-$ (mion)	106.66	-1	0	+1	0	$2.20 \times 10^{-6}$
$\nu_\mu$ (mionski neutrino)	$< 0.17$	0	0	+1	0	stabilan
$\tau^-$ (tau)	1.777	-1	0	0	+1	$2.9 \times 10^{-13}$
$\nu_\tau$ (tau neutrino)	$< 15.5$	0	0	0	+1	stabilan

Tabela 1.

Kao što se vidi u Tabeli 1. elektron, mion i tau imaju jedinično negativno naelektrisanje. Kao što je ranije spomenuto, spin svake od čestica iz tabele je  $1/2$ . Mion i tau su nestabilni i raspadom najčešće prelaze u elektron uz emisiju odgovarajućih neutrina. Za ove raspade je odgovorna slaba interakcija, o kojoj će kasnije biti reči. Pošto je masa neutrina izuzetno mala, za sada je bilo moguće eksperimentalno odrediti samo gornju granicu njihove mase.

Svaki od leptona ima i svoju antičesticu, koja se od njega razlikuje samo po suprotnom znaku električnog naboja. Antičestice se obeležavaju sa crticom iznad simbola odgovarajućeg leptona.

Leptoni se pokoravaju principu održanja leptonskog broja. Svakom paru leptona odgovara jedan leptonski broj ( $L$ , npr. za mion  $L_\mu=1$ ). U svakoj interakciji, leptonski broj mora biti očuvan. To se može demonstrirati na sledećem primeru:



### 3.1.2. Kvarkovi

Na početku priče o kvarkovima biće opisano kako su naučnici uopšte došli na ideju da su proton i neutron deljivi, odnosno da imaju unutrašnju strukturu.

Magnetni moment je bio jedan od prvih razloga za sumnju da neutron ima unutrašnju strukturu. Poznato je da magnetni moment potiče od kružne struje, odnosno naelektrisanja koje se kreće. Ali neutron nema naelektrisanje, tačnije ukupno naelektrisanje neutrona je jednako nuli. Jedno od mogućih rešenja je bilo da je neutron sačinjen od nekoliko sitnijih čestica čiji ukupni zbir naelektrisanja jednak nuli. Kvantno kretanje ovih čestica unutar neutrona bi objasnilo njegov magnetni moment koji je bio različit od nule. Da bi se ovo dokazalo, odnosno da bi naučnici mogli da „zavire“ u neutron bila je potrebna sonda talasne dužine koja je mnogo manja od dimenzija neutrona a to je reda veličine femtometra. Na ovu sondu ne bi trebala da utiče jaka interakcija, kako ne bi interagovala sa neutronom kao celinom, već da bi mogla da prodre u njega i elektromagnetnom interakcijom interaguje sa manjim naelektrisanim česticama od kojih je sačinjen. Sonda koja ima potrebne karakteristike i koja je korišćena u eksperimentu je elektron energije 10 GeV-a. Eksperiment je realizovan 1968. godine na SLAC-u (*Stanford Linear Accelerator Center*) i pokazao je da proton sadrži manje, tačkaste objekte i da samim tim proton i neutron nisu elementarne čestice. Naučnici su nerado u to vreme te čestice zvali kvarkovima, već su radije smislili drugo ime za te čestice- *partoni*. Taj naziv im je dao R. Fejnman. Objekti koji su opaženi na SLAC-u kasnije su identifikovani kao *up* i *down* kvarkovi. Međutim, i dalje se koristi termin *partoni* za čestice koje su konstituenti hadrona (kvarkovi, antikvarkovi i gluoni).

Za naziv *kvark* Gel-Man je ideju dobio od zvuka koji ispuštaju patke. Nije bio siguran kako da napiše i izgovori tu reč, ali je krajnju odluku doneo pošto je reč „*quark*“ pronašao u knjizi Džejmisa Džojisa „*Fineganovo bdenje*“:

„...*Three quarks for Muster Mark!*  
*Sure he has not got much of a bark*  
*And sure any he has it's all beside the mark.*“

Detaljno razmatranje o tome kako je i zašto kvarkovima dao baš taj naziv, Gel-Man je izneo u svojoj knjizi „Kvark i Jaguar“.

Kao što se vidi u Tabeli 2. kvarkovi se od leptona razlikuju po naelektrisanju, a vrednost spina im je takođe 1/2. Kvarkovi imaju trećinsko naelektrisanje ( $\pm 1/3, \pm 2/3, \dots$ ).

Ukus	Aproksimirana masa ( GeV/c <sup>2</sup> )	Električni naboj
u (up)	0.002	2/3
d (down )	0.005	-1/3
c (charm)	1.3	2/3
s (strange)	0.1	-1/3
t (top)	173	2/3
b (bottom)	4.2	-1/3

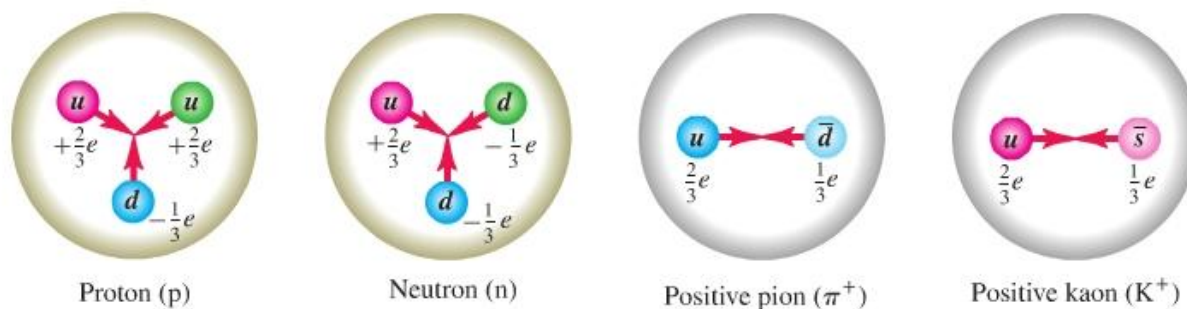
Tabela 2.

Antikvarkovi imaju suprotno naelektrisanje odgovarajućim kvarkovima.

Postoji izuzetno veliki broj kombinacija u kojima se mogu naći kvarkovi koji na taj način grade izuzetno veliki broj čestica a koje, zapravo, nisu elementarne. Od 1960. godine otkriveno je na stotine hadrona. Prema načinu sparivanja kvarkova u hadrone, hadrone možemo podeliti u dve grupe:

A- **MEZONI**- Oni predstavljaju vezano stanje *kvark-antikvark*. Spin mezona je ceo broj što znači da su mezoni bozoni. Pioni su najlakši predstavnici mezona sa masom oko 140 GeV/c<sup>2</sup>. Mezoni koji u svom sastavu imaju *s* kvarkove nazivaju se „strani“ mezoni. To su, na primer K<sup>+</sup> (*u $\bar{s}$* ) i K<sup>-</sup> (*s $\bar{u}$* ) mezoni (Slika 7). Mezonski broj *ne postoji*, jer se mezoni mogu proizvoljno kreirati i anihilirati, ako se pri tome ne narušava neki drugi zakona održanja.

B- **BARIONI**- Oni predstavljaju vezano stanje tri kvarka (Slika 7). Proton i neutron su predstavnici bariona. Proton se sastoji iz dva *u* i jednog *d* kvarka (*uud*), dok se neutron sastoji od dva *d* i jednog *u* kvarka (*ddu*). Barioni se karakterišu odgovarajućim kvantnim brojem, tzv. barionskim brojem (B). Za kvarkove su ti barionski brojevi pozitivne vrednosti njihovog spina, a za antikvarkove negativne vrednosti njihovog spina. Svi dosadašnji eksperimenti su pokazali da se u reakcijama i raspadima barionski broj održava.



Slika 7.

Sastav protona, neutrona, pozitivnog piona i pozitivnog kaona

Kao što je već pomenuto, kvarkovi imaju spin  $1/2$ , što znači da spadaju u fermione koji podležu Paulijevom principu isključenja. To bi značilo da princip isključenja zabranjuje da se u barionu pojave dva kvarka istog ukusa i spina. Da bi se izbegle poteškoće pretpostavljeno je da



svaki kvark može da se nađe u tri varijeteta, koja su samo da bi zvučalo zanimljivije, nazvani *bojama*, iako termin „boja“ nema nikakve veze sa našom svakodnevnom percepcijom boje. Tako, kvark može da postoji u tri boje, a to su: *crvena*, *plava* i *zelena*. Princip isključenja se primenjuje posebno na svaku boju. Barion uvek sadrži jedan crveni, jedan plavi i jedan zeleni kvark, kako bi u u celini bio neutralan u boji. Svaki gluon ima kombinaciju boja anti-boja (npr. plava i anticrvena) što dozvoljava da on prenosi boju u trenutku njegove razmene među kvarkovima. Boja je očuvana tokom emisije i apsorpcije gluona od strane kvarka. Razmena gluona je proces u kome su promene boje kvarkova takve da u svakom barionu postoje sve kvarkovi sve tri boje. Sličan proces se odvija i u mezonima gde dolazi do poništavanja jer postoje boja i antiboja (npr. plava i antiplava), pa su tako i mezoni neutralni u boji. Pretpostavimo da pion u početku sadrži plavi kvark i antiplavi antikvark (slika 8a). Plavi kvark može postati crveni emitujući plavo-anticrveni virtuelni gluon (slika 8b). Kada antiplavi antikvark apsorbuje taj gluon, on postaje anticrveni antikvark (slika 8c). Boja je očuvana u svakoj emisiji i apsorpciji. Ovakve promene se dešavaju kontinualno, pa zato o pionu treba da razmišljamo kao o superpoziciji tri kvantna stanja: plavo-antiplavo, crveno-anticrveno, zeleno-antizeleno. Niko nikada nije uspeo da izučava kvark izdvojen iz hadrona, zbog njihove asimptotske slobode.

Slika 8.  
Izmena boje kvarkova razmenom gluona

### 3.2. Bozoni

Bozoni se često zovu još i prenosioci interakcije. Oni imaju celobrojne vrednosti spina i podležu Boze-Ajnštajnovoj statistici. To znači da ako teorijski, matematičkim operacijama, „zarotiramo“ bozon oko njegove ose za  $360^\circ$ , njegova talasna funkcija neće promeniti svoj znak. U okviru Standardnog modela postoji 5 fundamentalnih bozona koji su prikazani u Tabeli 3.

Ukus	Masa ( $\text{GeV}/c^2$ )	Električni naboj
$\gamma$ (foton)	0	0
$W^+$ bozon	80.39	+1
$W^-$ bozon	80.39	-1
$Z^0$ bozon	91.188	0
g (gluon)-boja	0	0

Tabela 3.

Broj gluona je 8 jer postoje 3 kvarka koji se mogu naći u 3 boje, ali pošto barioni moraju biti neutralni u boji, postoji ograničenje koje kaže da makar jedan kvark mora biti različite boje od druga dva, pa tako dobijamo  $3 \times 3 - 1 = 8$ .

Ukupan broj prenosilaca je 13: 8 gluona + foton + graviton +  $W^+$  +  $W^-$  +  $Z^0$

Međutim, u Tabeli 3. nedostaje Higs bozon, čije postojanje je teorijski pretpostavljeno i tako ulazi u Standardni model, ali još uvek nije eksperimentalno dokazan i nisu ispitane njegove karakteristike. Prema istraživanjima u okviru eksperimenata u kojima su određivane energije na kojima bi Higs mogao da se pronađe, određena je donja granica energije koju bi Higs mogao da poseduje, i ona iznosi 114.4 GeV. U trenutno najvećem i najmoćnijem akceleratoru, LHC-u (*Large Hadron Collider*), svakog dana se vrše sudari čestica na izuzetno visokim energijama u cilju pronalaska Higs bozona.

## 4. OSNOVNE INTERAKCIJE U PRIRODI

Pitanje koje je godinama mučilo fizičare je kako to čestice materije interaguju jedna s drugom bez dodira, odnosno kako to magneti „osećaju“ jedan drugog, kako to Zemlja privlači Mesec, itd. Odgovori su magnetizam i gravitacija, ali šta su zapravo te sile? U osnovi sila nije nešto što se samo dešava među česticama, sila je nešto što je preneseno među česticama. Delovanje sile najbolje može da se zamisli na sledeći način: Ukoliko se zamisli da se dve osobe nalaze na mirnom jezeru u čamcima, oni će mirovati. Međutim, ukoliko oni počnu da se dobacuju loptom počće da se udaljavaju (slika 3).



Slika 9.

Analogija razmene prenosilaca interakcije

Pokazuje se da su sve interakcije koje utiču na čestice materije uzrokovane razmenom čestica koje prenose silu, što je potpuno različita vrsta čestica. Ove čestice su kao lopte koje se bacaju između čestica materije (koje su kao osobe u čamcima) (Slika 9.). Ono što normalno mislimo da su „sile“, u stvari su efekti delovanja čestica koje prenose silu na čestice materije.

Primer sa loptom je naravno vrlo gruba analogija pošto objašnjava samo odbojne sile i ne nagoveštava kako razmena čestica može rezultovati privlačnim silama. Ovo nije tačno, treba samo zamisliti da dva čoveka bacaju bumerang između sebe.

Primere privlačnih sila možemo videti u svakodnevnom životu (to su magneti i gravitacija) i generalno uzimamo zdravo za gotovo da prisustvo objekata može uticati na druge objekte. Samo kada se zapitamo „Kako dva objekta mogu uticati jedan na drugi, a da se ne dodiruju“, onda pretpostavljamo da nevidljiva sila može biti efekat razmene čestica koje prenose sile. Fizičari koji proučavaju čestice su našli da silu kojom jedna čestica deluje na drugu možemo objasniti sa velikom tačnošću pomoću čestica koje prenose sile.

Važna stvar koju moramo znati o česticama koje prenose sile je da određena čestica koja prenosi silu može biti apsorbirana ili produkovana samo od čestice materije na koje deluje dotična sila. Na primer, elektroni i protoni imaju naelektrisanje, tako da mogu da proizvedu ili apsorbiraju foton, česticu koja prenosi elektromagnetnu silu. Sa druge strane neutriini nemaju naelektrisanje, tako da ne mogu da proizvedu ili apsorbiraju foton.

Svakodnevno, skoro u svakom trenutku se srećemo sa najrazličitijim silama- sila trenja, sila otpora, sila potiska, magnetna sila, itd. Ali, postavlja se pitanje koliko je fundamentalnih sila u prirodi. Naše trenutno razumevanje fizike nam govori da su sve sile sa kojima se svakodnevno srećemo odrazi četiri fundamentalne sile, odnosno interakcije među česticama. Sa dve se srećemo u svakodnevnom životu, a druge dve su primetne tek na subatomsom nivou.

Često dolazi do zabune i mešanja termina „sila“ i „interakcija“. Postavlja se pitanje u čemu je razlika između ova dva termina. Razliku između njih je teško je napraviti. Strogo govoreći sila je efekat na česticu usled prisustva drugih čestica. Interakcije čestica uključuju sve sile koje deluju na nju, ali takođe uključuju raspade i anihilacije koje bi čestica mogla da pretrpi.

Tako, osnovne interakcije u prirodi su:

1. *Gravitaciona interakcija*
2. *Elektromagnetna interakcija*
3. *Slaba interakcija*
4. *Jaka interakcija*

U Tabeli 4. su date neke njihove osnovne karakteristike, koje će u daljem tekstu detaljnije biti razmotrene

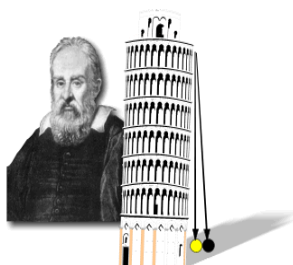
Sila	Rang	Domet (m)	Dejstvo	Prenosioci
jaka	1	$10^{-15}$	boja	gluoni
slaba	$10^{-13}$	$10^{-18}$	ukus	$W^+$ , $W^-$ , $Z^0$ bozoni
elektromagnetna	$10^{-2}$	beskonačan	naelektrisanje	$\gamma$ (fotoni)
gravitaciona	$10^{-38}$	beskonačan	masa-energija	gravitoni

Tabela 4.

Pošto su gravitaciona i elektromagnetna interakcija veoma dobro ispitane interakcije, čije delovanje može da se zapazi i u svakodnevnom životu i pošto u fizici elementarnih čestica mnogo veći uticaj imaju jaka i slaba interakcija, u daljem tekstu će biti opisane samo osnovne karakteristike gravitacione i elektromagnetne interakcije, a veća pažnja će biti posvećena jakoj i slaboj interakciji.

#### 4.1. Gravitaciona interakcija

Krajem XVI i početkom XVII veka, rad na teoriji gravitacije započeo je Galileo Galilej, čuvenim eksperimentom puštanja različitih objekata sa vrha Krivog tornja u Pizi (Slika 10.), a zatim preciznijim merenjima kretanja tela niz strmu ravan. 1687. godine Isak Njutn je u svom delu „*Principia*“ izneo hipoteze o zakonu inverznog kvadrata univerzalne gravitacije. Kako je on to napisao u knjizi: „Zaključio sam da sile koje održavaju planete na njihovim orbitama moraju biti recipročne kvadratu udaljenosti njihovih centara od tačke oko koje se vrši njihova revolucija: tako, upoređujući silu potrebnu da bi Mesec bio na orbiti oko Zemlje sa gravitacionom silom na površini Zemlje, dobijaju se približno isti rezultati“.



Slika 10.

Galilejev eksperiment sa  
Krivog tornja u Pizi

I zaista, gravitaciona sila je obrnuto proporcionalna kvadratu rastojanja dva posmatrana objekta, a direktno proporcionalna njihovim masama, što se vidi u izrazu (2). Gravitaciona sila je uvek privlačna.

$$F_g = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \quad (2)$$

Gravitaciono uzajamno delovanje ima univerzalni karakter. Ono se ispoljava kod svih tela (čestica) od kosmičkih razmera, makrotela, do mikrotela, uključujući i elementarne čestice. Ova interakcija je veoma dobro ispitana. U domenu mikrosveta gravitaciona uzajamna delovanja nemaju neku veću ulogu, pa se one u većini slučajeva mogu zanemariti. Razlog zbog kojeg se ona može zanemariti je taj što čestice u mikrosvetu imaju malu masu, pa je i delovanje gravitacione sile izuzetno malo, praktično zanemarljivo.

Kao što se može videti iz Tabele 4. gravitaciona interakcija ima beskonačan domet, ali je i 38 redova veličine slabija od jake interakcije koja deluje među kvarkovima unutar protona i neutrona.

Prenosilac gravitacione interakcije je *graviton*. Njegovo postojanje je teorijski pretpostavljeno, ali još uvek ne postoje eksperimentalni dokazi njegovog postojanja.

#### **4.2. Elektromagnetna interakcija**

Elektromagnetne interakcije su dobro proučene u Maksvelovoj elektromagnetnoj teoriji. Elektromagnetna interakcija je odgovorna za skoro sve pojave oko nas u svakodnevnom životu, sa izuzetkom gravitacije. Materija dobija svoj oblik zahvaljujući intermolekularnim silama. Elektromagnetna sila je ona koja održava elektrone na orbitama oko atomskog jezgra. Ova interakcija se dešava isključivo među naelektrisanim česticama, ako posmatramo na atomskom nivou.

Elektromagnetna sila može biti i privlačna i odbojna. Kao što se vidi iz Tabele 4. njen domet je beskonačan, kao i domet gravitacione interakcije. Međutim, ona je samo 2 reda veličine slabija od jake interakcije.

Prenosilac elektromagnetne interakcije je *foton*, koji se smatra bezmasenom česticom.

U fizici elementarnih čestica elektromagnetna interakcija igra veliku ulogu pri detekciji čestica. Interakcija naelektrisanih čestica sa materijom je najčešće elektromagnetne prirode, te razmatranjem karakteristika interakcije mogu da se odrede neke osnovne karakteristike čestice, kao što su naelektrisanje, masa, itd.

#### **4.3. Slaba interakcija**

Domet slabe interakcije je tek  $10^{-18}$  m, što je reda veličine jezgra atoma. Ova interakcija je odgovorna za beta raspad, odnosno za transformaciju neutrona u jezgru u proton uz emisiju elektrona i antineutrina, kao što je prikazano u sledećoj relaciji:



$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e \quad (3)$$

Ovakav tip raspada se naziva *semi-leptonski slabi raspad*. Evo zašto se i ova relacija može smatrati promenom ukusa. Ako se neutron posmatra kao vezano stanje 3 kvarka *udd*, a proton, u koga se neutron ovde transformiše, kao vezano stanje takode 3 kvarka (*uud*), vidi se da je jedan *d* kvark promenio svoj ukus i transformisao se u *u* kvark. Ni jaka ni elektromagnetna interakcija ne mogu uticati na promenu ukusa čestica, pa tako možemo biti sigurni da je u pitanju slaba interakcija. Pri promeni ukusa kvarkova emituje se jedan *W* bozon, koji se zatim, zbog svog izuzetno kratkog vremena života transformiše u elektron i antineutrino. Pošto se visokoenergetski elektroni nazivaju beta česticama, ovakav raspad se zove još i beta raspad.

Kao što se vidi u gornjoj relaciji, slaba interakcija je promenila ukus neutrona, odnosno, delovanjem slabe interakcije neutron se transformisao u proton. Promena ukusa je jos uočljivija u sledećoj reakciji:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (4)$$

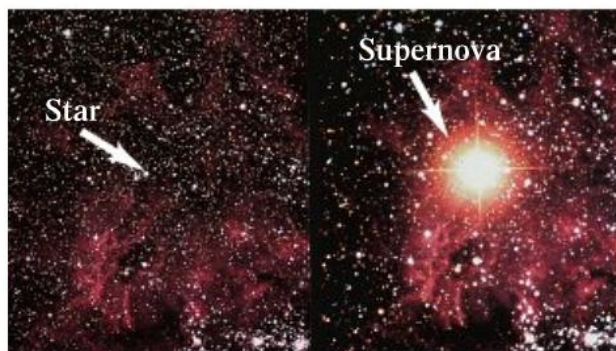
Ovde se vidi da se mion koji poseduje veću masu transformiše u elektron, koga u slabim interakcijama prati odgovarajući antineutrino, i mionski neutrino. Slaba interakcija je jedina koja daluje na neutrine, koji su čestice izuzetno male mase i bez naelektrisanja. Ovakav tip raspada se naziva *leptonski slabi raspad*.

Pored semi-leptonskog i leptonskog slabog raspada postoji još jedan tip slabih raspada a to je *hadronski slabi raspad*, i on je sledećeg oblika:

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0 \quad (5)$$

Prenosioci slabe interakcije su  $W^+$ ,  $W^-$  i  $Z^0$ . To su veoma masivne čestice, kao što se može videti u Tabeli 3., ali upravo zbog toga imaju izuzetno kratko srednje vreme života koje iznosi oko  $3 \times 10^{-25} s$ .

Kao što je ranije pomenuto, neutrini i antineutrini, koji su veoma lake i čestice bez naelektrisanja, vrlo slabo interaguju sa materijom, pa recimo antineutrini tako mogu proći olovni zid debljine nekoliko stotina kilometara, a da ne dožive ni jednu interakciju. Kada zvezda doživi kataklizmičnu eksploziju, zvanu *supernova* (Slika 11.), najveći deo njene energije se oslobađa putem slabe interakcije (više od 99% energije odnose neutrini, a oko 0.01% se pretvara u svetlosnu energiju).



Slika 11.

Levo-zvezda pre eksplozije, desno-supernova posle eksplozije (SN1987a)

Za otkriće neodržanja parnosti u slabim interakcijama zaslužni su Li i Jang (1956). U to vreme bio je aktuelan  $\tau-\theta$  problem. Na osnovu produkata raspada ustanovljeno je da postoje dve kratkoživeće čestice,  $\tau^+$  i  $\theta^+$ , koje su se raspadale na sledeće načine:

$$\tau^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- \quad (6)$$

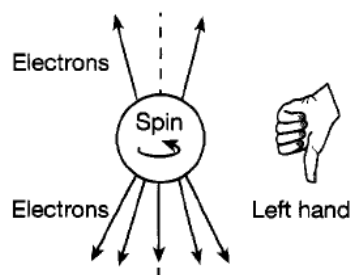
$$\theta^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0 \quad (7)$$

gde je parnost pri raspadu  $\tau^+$  negativna a pri raspadu  $\theta^+$  pozitivna. Ovo ne bi bilo ništa neobično da nije utvrđeno da su i mase i vremena života čestica  $\tau^+$  i  $\theta^+$  identični. Li i Jang su posumnjali da su to jedna te ista čestica (i bili su u pravu – danas znamo da je to  $K^+$  mezon), a da je očigledna razlika u parnosti finalnih stanja posledica neodržanja parnosti u slabim interakcijama. Dakle,  $K^+$  mezon se raspada na tri piona čija je parnost  $-1$ , odnosno neparni su. U jednom slučaju imamo raspad na dva piona pa je parnost:  $-1 \times -1 = +1$ , a u drugom imamo raspad u tri piona pa je parnost:  $-1 \times -1 \times -1 = -1$ . Znači parnost se ne održava.

Drugi eksperiment koji je potvrdio neodržanje parnosti slabe interakcije je merenje ugaone raspodele elektrona u  $\beta$  raspadu orijentisanih (polarizovanih) jezgara. Ideja ovog eksperimenta izvedenog 1957. godine je bila da se posmatraju emitovani elektroni iz rotirajućih jezgara  $Co-60$ . Reakcija se može zapisati kao:



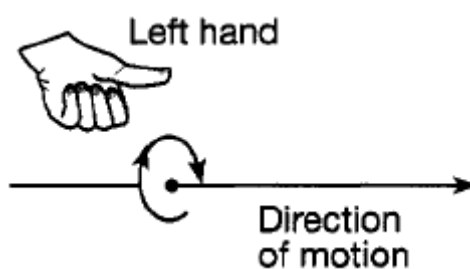
Eksperiment je izveden od strane C.S. Vu i njenih saradnika. Da toplotne vibracije ne bi uticale na jezgra, a i da bi se mogli orijentisati njihovi spinovi jakim magnetnim poljem, jezgra su ohlađena na temperaturu od oko  $0.01$  K. Utvrđeno je da su elektroni emitovani uglavnom na dole, što implicira da je ceo proces u prirodi levo orijentisan. Drugim rečima, ako savijeni prsti označavaju pravac spina, a palac pravac emitovanja elektrona, onda su to prsti leve ruke (slika 12).



Slika 12.

Određivanje pravca spina elektrona

U daljim eksperimentima je utvrđeno da se neutrini emitovani pri beta raspadu uvek rotiraju u smeru savijenih prstiju leve kao na slici 13:



Slika 13.

Određivanje smera rotacije neutrina na osnovu pravca njihovog kretanja

Ustanovljeno je još i da parametar  $\alpha$  (parametar interakcije) iznosi  $-0.7$ , što je i bio dokaz da se parnost ne održava u slabim interakcijama. Takođe, negativna vrednost parametra  $\alpha$  pokazuje da je verovatnija situacija u kojoj se elektron emituje u smeru koji je suprotan smeru orijentacije, odnosno spina jezgra. Drugim rečima, slaba interakcija zavisi od orijentacije spina čestice u odnosu na njen vektor impulsa. Projekcija spina na vektor brzine čestice se naziva helicitet (hiralnost).

Parnost bi trebala da sledi iz ogledalske simetrije praznog prostora (vakuuma), ali taj vakuum ima neobične osobine:

$$\mathbf{P} \rightarrow x \rightarrow -x \quad y \rightarrow -y \quad z \rightarrow -z \quad (9)$$

Polarni vektori (pravi):  $\vec{p}$ ,  $\vec{A}$ ,  $\vec{E}$ , itd. menjaju znak pri ovoj transformaciji (P – neparni). Pseudovektori (aksijalni vektori) su npr. proizvod dva vektora,  $\vec{L}$ ,  $\vec{S}$ ,  $\vec{H}$ , itd. ne menjaju znak (P – parni).

Skalarni proizvod dva vektora ili dva aksijalna vektora je skalar (P – paran), a skalarni proizvod polarnog i aksijalnog vektora je pseudoskalar (P – neparan)

Zbog skalarnog dela se  $K^+(\tau^+)$  uz očuvanje parnosti raspada u 3 piona. Zbog pseudoskalarnog se taj isti uz narušenje parnosti raspada u 2 piona.

60-tih godina XX veka, fizičari su razvili teoriju koja elektromagnetnu i slabu interakciju posmatra sa aspekta jedinstvene, *elektroslabe interakcije*. Ova teorija je prošla veoma uspešno sve

eksperimentalne testove, pa tako danas smatramo da postoje samo 3 osnovne interakcije u prirodi-gravitaciona, elektroslaba i jaka interakcija.

#### **4.4. Jaka interakcija**

Jake interakcije obezbeđuju vezu nukleona u atomskom jezgru i time njegovu relativnu stabilnost. Nuklearne sile ne zavise od naelektrisanja. One se približno jednako ispoljavaju između protona i protona, neutrona i neutrona, ili protona i neutrona. Neutron i proton se u jakim interakcijama poistovećuju, jer zapravo jaka interakcija deluje na njihove konstituente, kvarkove. Razlika između protona i neutrona ispoljava se pri elektromagnetnim interakcijama.

Jaka interakcija deluje na posebnu karakteristiku kvarkova, a to je *boja*. U opisivanju karakteristika kvarkova ustanovljeno je da oni mogu da se pojave u tri različite boje- crvenoj, plavoj i zelenoj. Prenosioci jake interakcije su gluoni.

Jaka interakcija može da se razmatra u dve oblasti: ako posmatramo na većoj skali, tada je jaka sila ona koja vezuje protone i neutrone, držeći na okupu atomsko jezgro. Međutim, ako posmatramo na skali kvarkova, to je sila koja drži na okupu kvarkove i gluone koji na taj način formiraju protone i neutrone, kao i mnoge druge čestice.

U kontekstu vezivanja protona i neutrona u atomsko jezgro, tu jaku silu nazivamo *nuklearnom silom* (ili *rezidualnom jakom silom*). U ovom slučaju to je ostatak jake sile među kvarkovima koji grade protone i neutrone. Kao takav, taj ostatak sile se povinuje malo drugačijim zakonitostima zbog udaljenosti među nukleonima, od prave jake sile među kvarkovima.

Inovativna, jaka interakcija je teorijski opisana *kvantnom hromodinamikom* (QCD) i deo je Standardog modela u fizici elementarnih čestica. Matematički, kvantna hromodinamika je teorija bazirana na SU(3) grupi simetrije.

Kvarkovi i gluoni su jedine elementarne čestice koje imaju naboj boje, pa su tako jedine na koje deluje jaka sila. Jaka interakcija se ostvaruje direktno i jedino razmenom gluona među kvarkovima. Za razliku od drugih sila (gravitacione, elektromagnetne, slabe) jaka sila ne slabi sa povećanjem rastojanja. Posle neke granične udaljenosti (koja je reda veličine hadrona), sila zadržava vrednost od oko 10 000 N nezavisno od toga na koliko j su udaljenosti kvarkovi jedan od drugog. U kvantnoj hromodinamici ovaj fenomen se naziva zarobljenost boje (ili asimptotska sloboda), što implicira da mogu biti opaženi samo hadroni u celini, ali nikako kvarkovi posebno. Objašnjenje leži u činjenici da je količina rada koju je potrebno izvršiti protiv sile jačine 10 000 N (što je proporcionalno masi od oko 1t na površini Zemlje), dovoljna za stvaranje para čestica-antičestica na veoma maloj udaljenosti od jake interakcije. Drugim rečima, velika količina energije koja bi se upotrebila za razdvajanje kvarkova, pretvorila bi se u novi kvark koji bi se sparilo sa već postojećim. Neuspeh eksperimenata u kojima je pokušano razdvajanje kvarkova su potvrda postojanja ovog fenomena.

Elementarni kvarkovi i gluoni nikada nisu opaženi direktno, ali se pojavljuju u obliku džetova novih hadrona svaki put kada se uloži određena energija u vezu kvark-kvark, što se događa, na primer, kada kvark unutar protona biva pogođen drugim kvarkom koji ima veoma veliku brzinu (takvi su kvarkovi unutar protona) pri eksperimentima u akceleratorima. Na izuzetno visokim temperaturama i pritiscima, opažena je kvark-gluonska plazma.

Ostatak jake interakcije koji se javlja među protonima i neutronima, naziva se *nuklearna sila*. Njen domet je reda veličine atomskog jezgra. „Rezidualna jaka sila“ delujući indirektno, prenosi gluone koji čine deo virtuelnih *pi* i *rho* mezona, koji za uzvrat, prenose nuklearnu interakciju među nukleonima.

Ovaj ostatak jake sile je mali u odnosu na jaku silu koja vlada među kvarkovima. Sila je mnogo slabija među neutronima i protonima, jer je nekim delom „neutralizovana“ u njima, na isti način kao što je i elektromagnetna sila između neutralnih atoma (van der Valsova sila) mnogo slabija među neutralnim atomima nego elektromagnetna sila koja drži konstituente atoma na okupu. Za razliku od same jake sile, ova rezidualna jaka sila slabi i to veoma jako, sa povećanjem rastojanja. Ta vrednost opada kao  $exp(-r)$ , iako ne postoji jednostavan izraz koji opisuje to opadanje. Ova činjenica, zajedno sa sporije opadajućom odbojnom elektromagnetnom silom među nukleonima, pre svega protonima, pri povećanju udaljenosti, rezultuje nestabilnošću većih atomskih jezgara, odnosno onih čiji je atomski broj veći od 82.

Jaka interakcija ima veoma važnu ulogu u termonuklearnim reakcijama koje se odigravaju na Suncu i koje generišu Sunčevu svetlost i toplotu.

## 5. AKCELERATORI

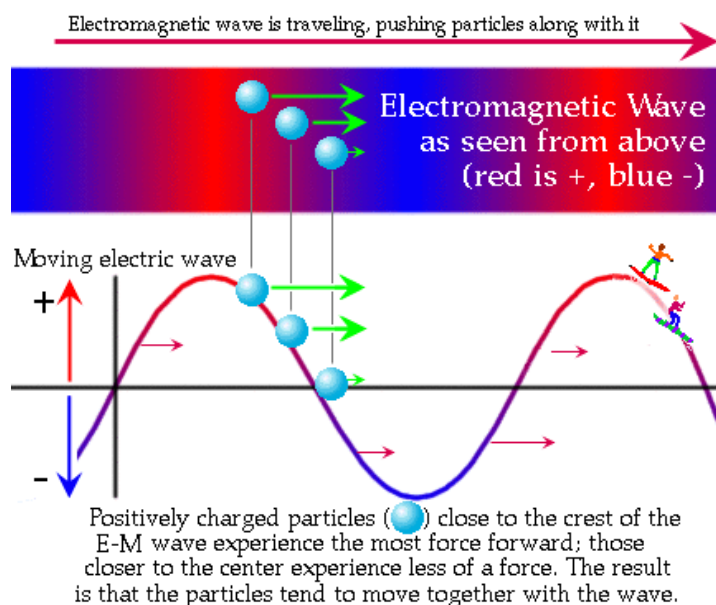
Akcelerator je uređaj koji koristi elektromagnetno polje da ubrza naelektrisane čestice do velikih brzina i da ih održi u dobro definisanim snopovima. Ovako ubrzane čestice se kasnije koriste za sudare sa metom ili drugim snopom čestica.

Fizičari koriste akceleratora da bi rešili dva problema. Prvi je to što se sve čestice ponašaju kao talasi. Da bi rešili ovaj problem, fizičari koriste akceleratora kako bi povećali impuls čestica i na taj način smanjili talasnu dužinu dovoljno da mogu da zavire u jezgro atoma. Drugi problem predstavljaju masivne čestice koje fizičari žele da izučavaju, a koje nisu dugoživeće. Fizičari tada koriste energiju brzih čestica kako bi stvorili masivne čestice koje mogu da izučavaju.

Na kom principu rade akceleratori? Najčešće akcelerator ubrzava česticu uz pomoć elektromagnetnog polja do određene energije, a zatim sudara tu česticu sa metom ili drugom česticom. Oko mesta interakcije se nalaze detektori koji „pamte“ sve događaje u jednom sudaru.

Sada se postavlja pitanje kako možemo dobiti čestice koje ćemo ubrzavati u akceleratorima. Elektrone dobijamo zagrevanjem metala. Zagrevanjem oni povećavaju svoju kinetičku energiju do momenta kada je ona dovoljna da se oslobode iz elektronskog omotača. Protone je najlakše dobiti jonizacijom atoma vodonika. Da bismo dobili antičestice, prvo moramo visokoenergetskim česticama pogoditi metu, da bi se na taj način uz virtuelne fotone ili gluone stvorili parovi čestice i antičestice. Na kraju, uz pomoć magnetnog polja možemo razdvojiti ove parove.

Akceleratori ubrzavaju čestice stvarajući veliko električno polje koje privlači ili odbija čestice. Ovo polje se kreće kroz akcelerator, „gurajući“ čestice kroz njega (Slika 14).



Slika 14.

Kretanje naelektrisanih čestica ubrzanih elektromagnetnim talasima

U linearnim akceleratorima polje se stvara elektromagnetnim talasima. Kada elektromagnetni talas udari u grupu čestica, one koje su pozadi dobiju više a one napred manje energije (ubrzanja). Na taj način čestice putuju elektromagnetnim talasom kao grupa surfera.

Postoji nekoliko tipova akceleratora i svaki od njih ima svoje prednosti i mane. Jedna od podela može da se izvrši na osnovu tipa interakcije čestica na:

1. Akceleratori sa fiksnom metom
2. Akceleratori sa sudarajućim snopovima

### **5.1. Akceleratori sa fiksnom metom**

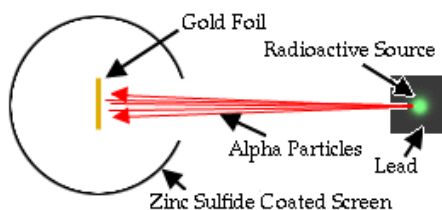
Kao što i sam njihov naziv kaže, u ovakvim akceleratorima ubrzane čestice se sudaraju sa fiksnom metom (Slika 15.) koja može biti čvrstog, tečnog ili gasovitog stanja. Detektor koji je postavljen oko mesta sudara određuje energije, mase i impulse čestica koje su nastale u sudaru.



Slika 15.

Interakcija ubrzanih čestica sa fiksnom metom

Kao primer ovakvog eksperimenta možemo navesti Raderfordov eksperiment u kom radioaktivni izvor proizvodi visokoenergetske alfa čestice koje udaraju u fiksnu metu od folije zlata (slika 16). U ovom slučaju detektor je bio ekran od cink-sulfida.



Slika 16.

Raderfordov eksperiment

Akceleratori ovog tipa su se koristili ranije a sada sve manje jer se velika količina energije gubi na uzmak mete pri sudaru, pa u takvim sudarima ne može da dođe do stvaranja masivnijih čestica.

## 5.2. Akceleratori sa sudarajućim snopovima

U ovakvim akceleratorima se ubrzavaju dva snopa čestica u suprotnom smeru i kada dostignu određenu energiju sudaraju se (slika 17).



Slika 17.

Sudar dva snopa ubrzanih čestica

Na ovaj način se sva energija koju čestice unose u sudar troši na stvaranje novih čestica.

Ovo je i najveća prednost ovakvih akceleratora u odnosu na one sa fiksnom metom. Ovakvi eksperimenti su odlični za sondiranje, jer čestice imaju velike impulse i male talasne dužine.

Po svom obliku akceleratori se dele na :




1. Linearni akceleratori - čestice se kreću kroz jednu dugu cev, gde na njenom početku imaju najmanju, a na kraju najveću energiju. (Slika 18.)



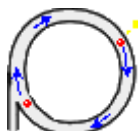
Slika 18.

Linearni akcelerator

Ovi akceleratori se koriste kao:

- ❖ sudarači sa fiksnom metom 
- ❖ linearni kolajderi 
- ❖ za uvođenje čestica u kružne akceleratora 

2. Sinhrotroni- akceleratori kružnog oblika, kod kojih se čestice vrte u krug sve dok se ne ubrzaju do tražene energije (Slika 19.). Ovakvi akceleratori se danas više koriste jer su ekonomičniji što se tiče prostora.



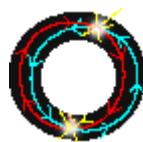
Slika 19.

Sinhrotron

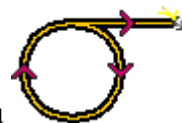


Sinhrotroni se koriste za:

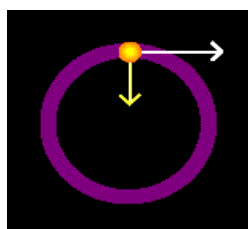
→ eksperimente sa sudarajućim snopovima



→ za ubrzavanje čestica koje kasnije udaraju u fiksnu metu



Da bi se bilo kakav objekat kretao u krug potrebno je da na objekat, iz centra kruga, deluje konstantna sila (Slika 20.). U kružnim akceleratorima električno polje čini da se čestice ubrzavaju, dok veliki magneti obezbeđuju silu koja će čestice „držati“ na kružnoj putanji.



Slika 20.

Prisustvo magnetnog polja ne menja energiju čestica, ono samo savija njihovu putanju duž pravca akceleratora. Magnetni se takođe koriste za usmeravanje snopova ka meti i za njihovo fokusiranje.

Prednost kružnog akceleratora u odnosu na linearni je to što čestice mogu da kruže više puta i na taj način u svakom krugu dobijaju određeni iznos energije. Takođe, kružni akceleratori (sinhrotroni) mogu da „proizvedu“ čestice veoma visokih energija, a da nemaju potrebu za veoma velikom dužinom cevi akceleratora. Međutim, činjenica da čestice kruže velikom frekvencijom znači i to da postoje velike šanse da se dva snopa sudare na mestima gde im se putanje ukrštaju. Ovaj problem se najčešće rešava na taj način što se akceleratori projektuju tako da dva snopa kruže jedan iznad drugog u suprotnim pravcima.

S druge strane, linearne akceleratorne je mnogo jednostavnije i jeftinije konstruisati zato što njima nisu potrebni ogromni magneti koji će usmeravati i savijati snopove čestica. Sinhrotroni su skuplji iz još jednog razloga a to je veliki prečnik koji je potreban da bi se čestice mogle ubrzavati do dovoljno visokih energija.

Sada će biti predstavljeni neki od najvećih eksperimenata na svetu na polju fizike elementarnih čestica, koji naravno ne mogu ni da se zamisle bez akceleratora.

→ SLAC (*Stanford Linear Accelerator Center*) - nalazi se u Kaliforniji (SAD). U ovom centru je otkriven „*charm*“ kvark ( koji je takođe otkriven i u Brookhaven-u) i *tau* lepton, a sada se koristi za stvaranje i ubrzavanje velikog broja *B mezona*.

- Fermilab (*Fermi National Laboratory Accelerator*) - nalazi se u Illinoisu (SAD). U ovom centru su otkriveni „*top*“ i „*bottom*“ kvark kao i *tau neutrino*.
- CERN (*European Laboratory for Particle Physics*) - nalazi se između Švajcarske i Francuske. U njemu su otkriveni *W* i *Z bozoni*. Trenutno je u funkciji LHC (*Large Hadron Collider*), najveći i najmoćniji akcelerator čestica današnjice.
- BNL (*Brookhaven National Laboratory*) - nalazi se u blizini New York-a i u njemu je praktično istovremeno sa SLAC-om otkriven „*charm*“ kvark.
- CESR (*Cornell Electron-Positron Storage Ring*) - takođe se nalazi u blizini New York-a i vrši detaljna istraživanja „*bottom*“ kvarka.
- DESY (*Deutsches Elektronen-Synchrotron*) - nalazi se u Nemačkoj i na ovom eksperimentu su otkriveni *gluoni*.
- KEK (*High Energy Research Organization*) - nalazi se u Japanu i u toku je projekat stvaranja i istraživanja velikog broja *B mezona*.
- IHEP (*Institute for High- Energy Physics*) - nalazi se u Kini i u ovom institutu se vrše detaljna istraživanja *tau* leptona i „*charm*“ kvarka.

## 6. DETEKTORI

Razvoj i napredak fizike čestica je uslovljen razvojem detektora (uglavnom preuzetih iz nuklearne fizike) i složenih detektorskih sistema. Čestice su se detektovale pomoću nuklearnih emulzija, mehurastih komora, varničnih komora. Korišćeni su magnetni spektrometri, vremensko-projekcione komore, Čerenkovljevi brojači. Generalno, najveću primenu su imali i još uvek imaju gasni, jonizacioni, scintilacioni i poluprovodnički detektori.

Da bi se pribavile željene informacije o osobinama čestica i karakteristike njihovih interakcija, detektori moraju biti osposobljeni za izvršavanje raznih zadataka:

- određivanje trajektorija naelektrisanih čestica
- merenje njihovih naelektrisanja i impulsa iz zakrivljenosti putanje u magnetnom polju
- određivanje masa čestica simultanim merenjem impulsa  $p$  i energije  $E$  ili brzine  $v$

$$m^2 = \frac{E^2}{c^4} - \frac{p^2}{c^2} \quad (10)$$

$$m = \frac{p}{\beta\gamma c} \quad (11)$$

gde je  $\beta = v/c$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (12)$$

$c$  je brzina svetlosti ( $c = 3 \times 10^8$  m/s)

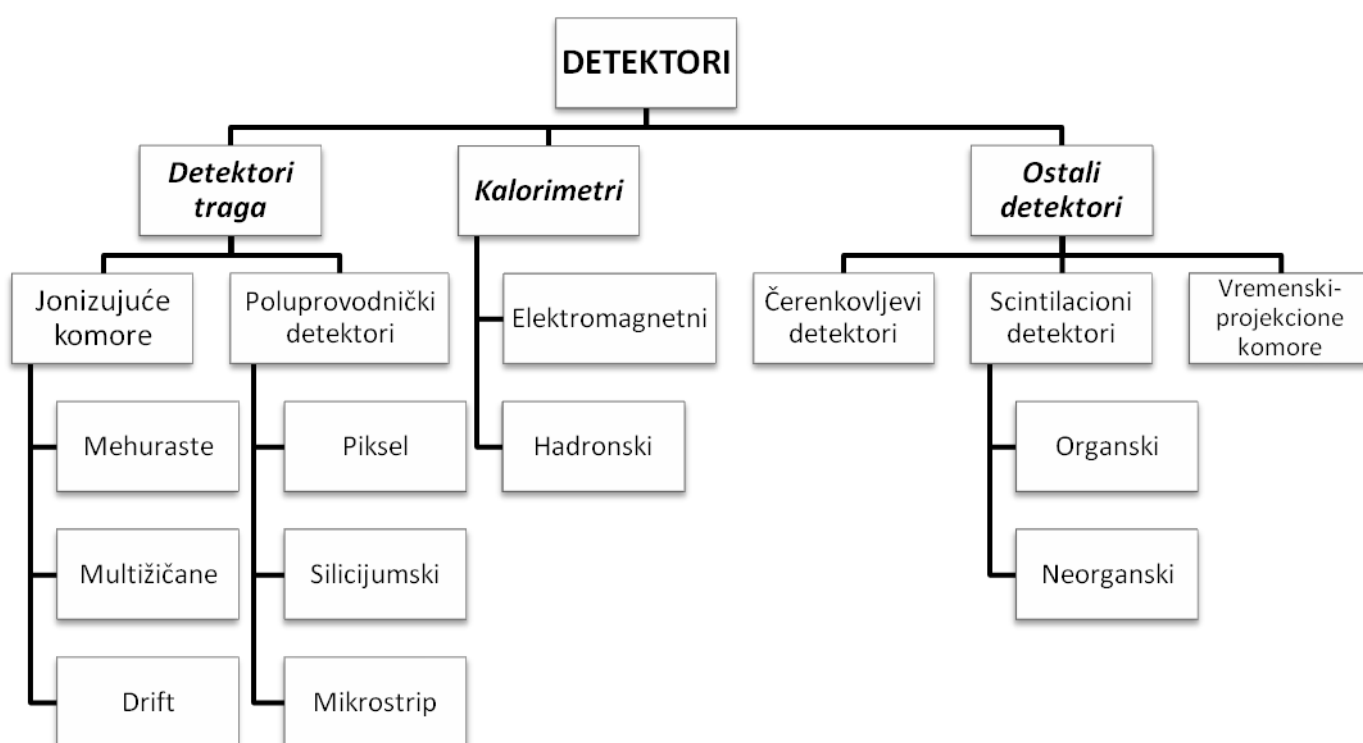
Za sticanje informacija, svi detektori koriste interakcije čestica sa detektorskim medijumom. Ranije su korišćeni detektori sa fiksnom metom, međutim, zbog velikog gubitka energije i impulsa, poslednjih godina se najčešće koriste sudarajući snopovi, pa se detektorski sistemi nalaze oko mesta sudara. Ipak, postoji velika razlika u načinu detekcije naelektrisanih i neutralnih čestica. Naelektrisane čestice se detektuju po svojoj elektromagnetnoj interakciji, ali tako da trpe samo minimalni gubitak energije i minornu promenu pravca kretanja. Svoj prolazak čestice mogu signalizirati na sledeće načine:

- jonizacijom gasova ili tečnosti*: spark, proporcionalne, drift i strimer komore, kalorimetri sa tečnim argonom
- ekscitacijom (scintilacijama)* u gasovima, tečnostima i čvrstim telima: scintilacioni brojači
- direktnom emisijom zračenja*: čestice koje se kreću kroz medijum brže od brzine svetlosti za tu sredinu emituju Čerenkovljevo zračenje; čestice koje prelaze iz jednog u drugi dielektrik emituju tranzicionu radijaciju
- lokalnim zagrevanjem tečnosti putem ekscitacije i jonizacije*: mehuraste komore, maglene komore

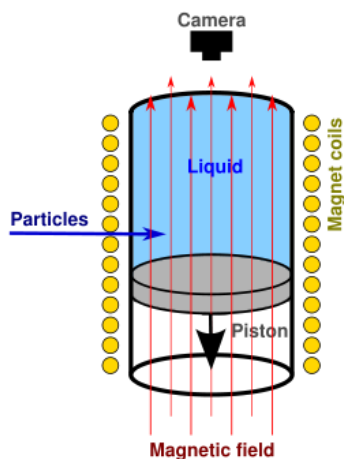
Neutralne čestice, s druge strane, mogu se detektovati tek kada izgube svoj identitet, tj, kada se pretvore u naelektrisane čestice: gama kvanti treba da se pretvore u parove  $e^+e^-$  elektromagnetnom interakcijom sa materijom, neutrini se mogu detektovati po svojoj slaboj interakciji, a neutralni hadroni se moraju raspasti ili interagovati jako, elektromagnetski ili slabo.

Ne postoje detektori koji mogu da mere sve parametre podjednako dobro. Zbog toga se upotrebljavaju kompleksni sistemi različitih detektora, i često su potrebni neki za prepoznavanje tragova, a drugi za merenje vremena ili energije. Ono što je takođe veoma bitno kod odabira detektora koji se koriste jeste materijal od koga je napravljen i njegova cena.

U najopštijem slučaju detektore u fizici visokih energija možemo podeliti na :



## 6.1. Mehurasta komora



Slika 21.

Mehurasta komora

Mehuraste komore se najčešće prave tako što se jedan veliki cilindar napuni tečnošću zagrejanom tek malo iznad njene tačke ključanja (Slika 21.). Kada čestica uđe u komoru, pokretni klip naglo smanji pritisak i tako tečnost prelazi u pregrejanu, metastabilnu fazu.

Naelektrisane čestice stvaraju jonizovani trag oko koga tečnost isparava, stvarajući mikroskopske mehuriće. Gustina mehurića oko jonizovanog traga je proporcionalna gubitku energije naelektrisane čestice. Širenjem komore mehurići rastu, sve dok ne postanu dovoljno veliki da se mogu posmatrati ili fotografisati. Oko komore se nalazi nekoliko kamera koje stvaraju i beleže trodimenzionalnu sliku događaja. Mehuraste komore se prave sa rezolucijom do nekoliko  $\mu m$ .

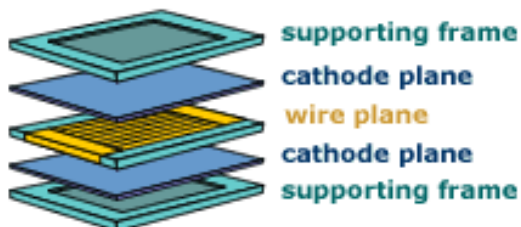
Cela komora se nalazi u homogenom magnetnom polju, usled čega naelektrisane čestice imaju spiralne (helikoidne) putanje čiji su radijusi određeni njihovim odnosima naelektrisanja i mase. Ovo važi za sve naelektrisane subatomske čestice koje imaju umnoške naelektrisanja elektrona pa je, samim tim, radijus njihove zakrivljenosti proporcionalan njihovom impulsu.

Ove komore se više ne koriste u savremenim istraživanjima, ali imaju izuzetnu istorijsku važnost.

## 6.2. Multižičane proporcionalne komore

Multižičane komore (ili samo žičane komore) čestice detektuju pomoću jonizacionog zračenja i predstavljaju unapređene verzije Gajgerovog i proporcionalnog brojača.

Ove komore su obično napravljene od ravnih anodnih žica koje se nalaze u „sendviču“ između dve katodne ravni (slika 22.).



Slika 22.

Multižičana proporcionalna komora

U električnom polju postoje tri posebna regiona:

- U većem delu zapremine, daleko od anodnih žica, polje je homogeno;
- Između žica manji region slabijeg polja;
- Blizu žica, region koncentričnih ekvipotencijalnih linija polja oko žica.

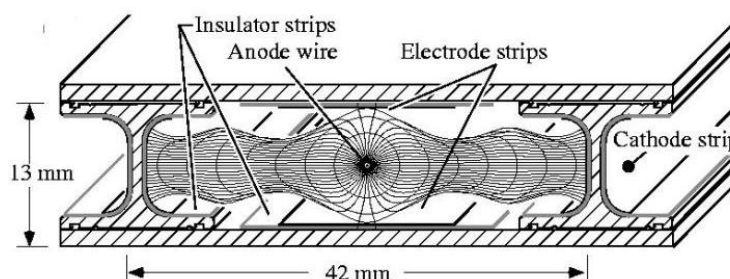
Čestica za sobom ostavlja trag od jona i elektrona, koji dalje driftuju ka spoljnim zidovima ili najbližoj žici. Beleženjem žica koje su dobile strujni signal dobija se putanja čestice.

1968. godine Dž. Šarpak (tada član CERN-a) objedinio je ideju proporcionalnih brojača i multižičanih komora i tako je dobio proporcionalne multižičane komore. Za ovo otkriće je 1992. godine dobio Nobelovu nagradu za fiziku.

Često se ove komore stavljaju u homogeno magnetno polje, kako bi se česticama zakrivila putanja usled dejstva Lorencove sile. Određivanjem pravca zakrivljenja putanje može se zaključiti koliko i kako je čestica naelektrisana. Ovi detektori imaju veoma dobru vremensku rezoluciju. Vremenska rezolucija govori koliko brzo detektor može da „primeti“ i zabeleži događaj, dok je mrtvo vreme detektora je vreme između dva događaja u kojem detektor ne može da beleži događaje.

### 6.3. Drift komore

Drift komora je jedan od osnovnih tipova gasnih detektora tragova kod kojeg se vreme drifta elektrona (kreiranih prolaskom čestice) u gasu koristi za određivanje pozicije (trajektorije) upadne čestice. Između katode i anodne žice postoji električno polje, pa kreirani elektroni driftuju ka anodi. (Slika 23.) „Brzi“ scintilacioni detektor u koincidenciji služi za definisanje referentnog vremena.



Slika 23.  
Drift komora

U savremenim akceleratorским eksperimentima se za definisanje ovog vremena koristi podatak o vremenu ukrštanja tzv. bančeva (grupa) inicijalnih čestica. Poznavanjem vremena drifta elektrona u radnom gasu i merenjem vremena između signala sa scintilatora i komore, moguće je odrediti poziciju prolaska naelektrisane čestice. Gas u drift komori treba da bude velikog stepena čistoće jer elektroni mogu biti zahvaćeni na nečistoćama (što je duže vreme drifta gas mora biti čistiji), a brzina drifta ne sme da zavisi od varijacija radnog napona.

## 6.4. Poluprovodnički detektori

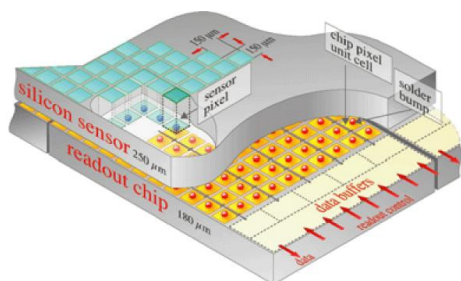
Kao i svi ostali tipovi detektora, i poluprovodnički detektori su najpre stekli široku primenu u nuklearnoj fizici, a zatim u fizici čestica. Prednost poluprovodničkih detektora je pre svega što se proizvodi veći broj nosilaca naelektrisanja nego kod gasnih detektora, što imaju brz odgovor (oba naelektrisanja utiču na formiranje detektovanog signala) i što mogu biti izuzetno malih dimenzija.

Princip rada poluprovodničkih detektora zasniva se na postojanju tzv. zonske strukture (valentna i provodna zona) elektronskih energetskih nivoa. Energetski procep između valentne i provodne zone kod silicijuma je svega  $1.12 \text{ eV}$ , što omogućava da i pri niskim temperaturama broj elektrona koji imaju dovoljno energije da ‘preskoče’ iz valentine u provodnu zonu, bude značajan.

Konačno, pravljenjem pn-spoja, elektroni iz  $n$ - tipa poluprovodnika zalaze u oblast poluprovodnika  $p$ -tipa, i obrnuto, šupljine iz poluprovodnika  $n$ - tipa se kreću ka poluprovodniku  $p$ -tipa. U oblasti kontakta dolazi do rekombinacije elektrona i šupljina odnosno do uspostavljanja ravnoteže. Ta oblast se naziva oblast prostornog naelektrisanja i ona se može dodatno proširiti, tako da signal koji nastaje prolaskom čestice postane merljiv.

## 6.5. Piskel detektori

Piskel detektori su poluprovodnički detektori veoma slični silicijumskim mikrostrip detektorima, ali su mnogo manjih dimenzija, obično nekoliko milimetara. Za osnovu imaju poluprovodnik na koji se nanose mali dvodimenzioni detektorski elementi koji se nazivaju piskeli (Slika 24). Veliki broj detektorskih elemenata obezbeđuje visoku rezoluciju merenja položaja čestica u ravni u kojoj je detektor postavljen. Elektrode su im u obliku “pločica” izuzetno malih dimenzija  $\sim 100 \mu\text{m}$ . Ovaj tip detektora je jedan od najmodernijih i koristi se u najmodernijim eksperimentima zbog izuzetne efikasnosti i malih dimenzija.



Slika 24.  
Piskel detektor

## 6.6. Kalorimetri

Kalorimetri se koriste da bi se odredila energija ( $E$ ) čestica (naelektrisane ili neutralne) uz pomoć totalne apsorpcije. Mere se različite veličine, koje su proporcionalne apsorbovanoj energiji:

1. Scintilaciona svetlost ( $\text{NaI(Tl)}$ ,  $\text{BGO}$ , ...)
2. Čerenkovljeva svetlost (olovno staklo)
3. Jonizacija (tečni argon, multičičane proporcionalne komore)

Što se kalorimetra tiče, najvažniji parametri su:

- Radijaciona dužina  $X_0$ - udaljenost na kojoj će se energija  $E_0$  elektrona (pozitrona) visoke energije smanjiti na  $\frac{E_0}{e}$ , „zakočnim zračenjem“  $\gamma$ -kvanta.
- Nuklearna apsorpciona putanja  $\lambda_0$ - srednje rastojanje između neelastičnih sudara hadrona ( $p, n, \dots$ ) sa jezgrom.

Kao što smo naveli, kalorimetri se koriste za određivanje energije čestica, pa ih prema tipu čestica čije se energije detektuju možemo podeliti na:

- ELEKTROMAGNETNE, koji apsorbuju energiju lakih naelektrisanih čestica kao što su elektroni i pozitroni. Pri prolasku čestica stvara se pljusak (iniciran elektronima ili fotonima; kako se pljusak razvija-broj čestica sa debljinom raste) drugih čestica nastalih jonizacijom. Ovaj tip detektora najčešće je osetljiv na prolazak čestica koje izazivaju scintilacionu i Čerenkovljevu svetlost. Postoje dva tipa elektromagnetnih kalorimetara: homogeni i heterogeni (sampling). Ako je ceo kalorimetar aktivan pri transformisanju deponovane energije u električni signal, radi se o homogenom kalorimetru i oni su najčešće izgrađeni od neorganskih scintilacionih kristala ( $\text{PWO}_4$ - olovo-volframat je korišćen u detektorima na *Large Hadron Collider*-u), kao i od olovnog stakla. U slučaju da je kalorimetar sačinjen od apsorbera i aktivnog dela naizmenično, u pitanju je heterogeni (sampling) kalorimetar. Aktivni deo može biti scintilator, plemenita jonizujuća tečnost ili poluprovodnik, a apsorber je najčešće materijal velike gustine kao što su olovo i gvožđe. Bitan zahtev je da obezbede proporcionalnost između amplitude električnog signala i deponovane energije upadne čestice.
- HADRONSKE, koji apsorbuju energiju teških čestica (hadrona). Gubitak energije na putu teških čestica uslovljava njihov kraći domet, pa zato detektor mora biti sačinjen od materijala koji imaju veliki redni broj u PSE (zbog veće gustine i veće mogućnosti apsorpcije). Kod teških čestica, pljusak je kompleksniji i haotičniji. Upravo iz ovog razloga su ovi kalorimetri debeli nekoliko nuklearnih apsorpcionih putanja, kako bi mogli da mere energije. Posebna pažnja pridaje se hermetičnosti detektora, da bi se precizno mogla izmeriti nedostajuća energija, na osnovu čega se određuje prisustvo neutrina u reakcijama. Hadronski kalorimetri su isključivo heterogeni.

Kalorimetri pružaju veoma dragocene informacije o česticama i koriste se i u najsavremenijim eksperimentima za određivanje energija neutrina i miona.

## **6.7. Scintilacioni detektori**

Pitanje koje sada može da se postavi jeste šta je zapravo scintilacija? Kada naelektrisana čestica prolazi kroz materiju, ona eksituje jedan deo atoma i molekula sredine. Kod nekih materijala mali deo deponovane energije čestica se oslobađa emisijom fotona u vidljivoj oblasti. Ova pojava se naziva scintilacija materijala. Kod scintilacije su bitna dva efekta: fluorescencija i fosforescencija. U slučaju fluorescencije svetlost se emituje u izuzetno kratkom vremenskom intervalu posle prolaska čestice ( $\sim 10$  ns), dok kod fosforescencije pobuđeni molekuli ostaju u metastabilnom stanju pa je vreme emisije duže. Sve scintilatore možemo podeliti u dve grupe: *organske i neorganske*.



Organski scintilatori se najčešće dele u tri grupe i to na kristalne, tečne i plastične organske scintilatore. Pri prolasku naelektrisane čestice kroz materiju dolazi do jonizacije materije, a zatim ovi pobuđeni joni emituju najčešće plavu ili zelenu svetlost. Kod fluorescencije inicijalna ekscitacija se dobija apsorpcijom fotona i njegovom deekscitacijom, emitovanjem fotona veće talasne dužine. Samoapsorpcija je nepoželjna pri upotrebi detektora jer dovodi do skraćenog trajanja slabljenja svetlosti. Kristalni organski scintilatori su praktično neupotrebljivi u fizici visokih energija. U većoj meri se koriste plastični organski scintilatori zbog svoje niske cene, ali i mogućnosti oblikovanja po potrebi konstrukcije detektora. Plastični scintilacioni detektori obično pored scintilacionog materijala imaju i dodatni detektor svetlosti (npr. fotomultiplikator) koji transformiše svetlosni u električni signal. Važna karakteristika organskih scintilacionih detektora je efikasnost sakupljanja signala i njegov transport do fotomultiplikatora.

Rekombinacija i efekti gašenja između ekscitovanih molekula redukuju proizvodnju svetlosti. Ovi efekti su izraženiji što je veća gustina ekscitovanih molekula.

Jedna od najvažnijih karakteristika organskih scintilatora jeste veoma dobra vremenska rezolucija. Zbog velike količine proizvedenih fotona dobijamo veoma dobar signal i podatke, a vremenska rezolucija je ispod reda veličine  $ns$ . Oblik dobijenog signala zavisi od vrste čestica, a to omogućuje njihovu veoma preciznu identifikaciju.

Neorganski kristali čine grupu scintilacionih materijala mnogo veće gustine nego što su organski plastični scintilatori, pa se koriste kada je neophodna visoka gustina materijala i dobra energetska rezolucija.

Uopšteno govoreći, karakteristike 'idealnih' scintilacionih detektora su:

- visoka efikasnost konverzije deponovane energije u scintilaciono zračenje;
- količina scintilacionog zračenja je proporcionalna deponovanoj energiji;
- visoka emisivnost svetlosti (fotona);
- materijalna sredina je transparentna za zračenje koje se u njoj emituje;
- kratko vreme raspada, itd.

## **6.8. Čerenkovljevi detektori**

Čerenkovljevi detektori imaju višestruku primenu u praksi- koriste se kao brojači brzih čestica, za identifikaciju hadrona i u potpunoj rekonstrukciji događaja sa detektorima tragova. Čerenkovljevi brojači se sastoje iz dva glavna dela:

1. Deo kroz koji naelektrisana čestica prolazi i za sobom „ostavlja“ Čerenkovljevo zračenje (radijator)
2. Fotodetektor

Kada naelektrisana čestica prolazi kroz materiju brzinom  $v$  koja premašuje brzinu svetlosti u medijumu, tj. kada je  $v > v_t = c/n$ , emituje se Čerenkovljevo zračenje ( $n$  je indeks prelamanja (funkcija talasne dužine);  $c$  je brzina svetlosti u vakuumu,  $v$  je granična brzina). Naelektrisane čestice polarizuju molekule koji se brzo vraćaju u svoje osnovno stanje emitujući zračenje

(tokom  $10^{-11}$  s). Emitovana svetlost može da formira koherentan talasni front jedino ako je  $v > c/n$  i jedino pod jednim emisionim uglom  $\theta$  gde je  $\cos\theta = (c/n)/v$ .

Kako je Čerenkovljevo zračenje slab izvor fotona, ovaj detektor mora imati što je moguće bolje karakteristike koje se odnose na prikupljanje svetlosti i detekciju.

Postoje različiti tipovi Čerenkovljevih detektora:

- *Detektori praga* beleže svo proizvedeno svetlo dajući signal kad je  $v/c$  iznad praga  $v_t = 1/n$ .
- *Detektori totalne apsorpcije* se sastoje obično od olovnog stakla. Oni mere energije, pretežno  $\gamma$ -zraka i elektrona.
- *Diferencijalni detektori* primaju svetlost samo u uskom opsegu uglova, tj. u uskom intervalu brzina. Glavni nedostatak ovog brojača je što može da prihvati samo vrlo male divergencije snopova.
- *Ring Imaging Cherenkov Counters (RICH)* je Čerenkovljev detektor koji stvara sliku kružnog oblika. Čestice se emituju sa male mete, prolaze kroz detektor, radiator i sferno ogledalo radijusa  $r$ , a Čerenkovljeva svetlost se tada fokusira na prsten na detektorskoj površini.

## **7. PRIMERI SAVREMENIH NAČINA VOĐENJA NASTAVNOG ČASA U OBLASTI FIZIKE ELEMENTARNIH ČESTICA**

Fizika elementarnih čestica se izdvojila iz oblasti nuklearne fizike i danas se i dalje razvija. Bazirana je kako na teorijskim, tako i na eksperimentalnim istraživanjima, a bavi se izučavanjem najsitnijih čestica koje su osnovni gradivni elementi prirode. U prvih šest glava ovog rada predstavljene su osnove postavke fizike elementarnih čestica.

Upravo iz razloga što se bavi najsitnijim česticama i njihovim karakteristikama, kod učenika može doći do zbunjivanja, pogrešnog shvatanja i nerazumevanja. Prvi problem koji može da se javi je osećaj reda veličine čestica o kojima se govori. Veoma je teško zamisliti koliko je zaista malo  $10^{-15}$  m. Korišćenjem odgovarajućih analogija, moguće je sprečiti pojavljivanje ovog problema. Najčešće korišćena analogija veličine atoma jeste da ukoliko se zamisli da je proton veličine fudbalske lopte koja se nalazi na centru nekog olimpijskog stadiona, tada neki elektroni orbitiraju na poslednjem redu sedišta na tom stadionu. Problematično može biti i trećinsko naelektrisanje kvarkova, jer se u celokupnom školovanju uči o tome kako je naelektrisanje uvek celobrojno. Ukoliko se činjenica trećinskog naelektrisanja kvarkova ne predstavi i ne dokaže na pravi način koji će pomoći razumevanju, odnosno ako se samo spomene u okviru nastavne oblasti fizike elementarnih čestica, ne mogu se očekivati pozitivni rezultati nastave. Objašnjenje kako se došlo na ideju o trećinskom naelektrisanju kvarkova i koji su eksperimentalni rezultati potkrepili te ideje može se pronaći u poglavlju 3.1.2. Pored ovih, javljaju se i drugi apstraktni pojmovi kao što je spin, brzina svetlosti, itd. koji najčešće predstavljaju glavne probleme u razumevanju nastavnih jedinica vezanih za fiziku elementarnih čestica.

Na žalost, često se dešava da profesori u okviru skraćanja programa nastave, u okviru jednog časa predstave osnovne činjenice potpuno površno ili čak potpuno preskoče ovu oblast koja je poslednja u okviru četvorogodišnje nastave fizike u gimnazijama. Za ovo postoji nekoliko razloga. Prvi je to što se časovi predviđeni za nastavu ove oblasti koriste za ispravljanje ocena na kraju školske godine. Drugi razlog je neupućenost profesora u to kako mogu prevazići teškoće u nastavi ove kompleksne oblasti koja sadrži veliki broj novih, teško objašnjivih pojmova na nivou znanja učenika četvrtog razreda gimnazije.

U ovom poglavlju su predstavljena dva primera kako se može koncipirati nastavni čas iz oblasti fizike elementarnih čestica, kako se nastava može oplemeniti i usavršiti. Prvi primer se odnosi na nastavnu temu „Kosmičko zračenje“, gde je pokazano kako se može veoma jednostavno realizovati najjednostavniji detektor kosmičkog zračenja- maglena komora. Iako se ona danas ne koristi u savremenim istraživanjima, ima veliki značaj u fizici elementarnih čestica jer su u maglenim komorama otkrivene prve elementarne čestice i izučavane njihove karakteristike. Korišćenjem ovog demonstracionog eksperimenta, učenicima se pruža prilika da na osnovu tragova koje čestice ostavljaju u maglenoj komori vide kako se i kolikom brzinom one kreću. Vizuelni

efekat koji pruža maglena komora veoma mnogo doprinosi razumevanju i shvatanju šta je zapravo kosmičko zračenje i kakve su njegove karakteristike. Takođe, uz korišćenje maglene komore, može se na neki način učenicima pružiti osećaj o tome kolika je brzina kojom se čestice kosmičkog zračenja (uglavnom protoni) kreću.

Drugi primer se odnosi na veoma kompleksnu nastavnu jedinicu „Čestice i antičestice“. Ovde je veoma važno da učenici shvate da su čestice i antičestice jednake po svim osobinama, osim po naelektrisanju, koje im je suprotno. Analogije i primeri su od krucijalne važnosti. Korišćenje računara i animacija aihilacije u trenutku susreta materije i antimaterije je neizmerno važno jer izuzetno doprinosi razumevanju ove tematike. Takođe, važno je predstaviti im i negativne primere koji se sreću na primer u filmovima, gde je antimaterija predstavljena isključivo kao plod mašte scenariste i u kojima se karakteristike antimaterije ne poklapaju sa njenim stvarnim karakteristikama. U netačnost negativnih primera učenike treba uveriti konkretnim računskim primerima i činjenicama strogo zasnovanim na naučnim osnovama.

Ukoliko se u nastavi koristi moderna tehnologija, profesor je u mogućnosti da na razne načine prenese znanje, da učenicima predstavi više primera mnogo slikovitije i mnogo efektnije. Cilj je da se nastava svakog časa unapređuje i poboljšava i da pokazuje efekte u smislu razumevanja i interesovanja učenika za određenu oblast, u ovom slučaju fiziku elementarnih čestica. U tom smislu, u tekstu koji sledi, predstavljeni su načini implementacije modernih tehnologija i novih saznanja u nastavu fizike elementarnih čestica.

## **7.1. Obrada nastavne jedinice „Kosmičko zračenje“**

NAZIV ŠKOLE: Gimnazija

NAZIV PREDMETA: Fizika

RAZRED: Četvrti

NASTAVNA TEMA: Fizika elementarnih čestica

NASTAVNA JEDINICA: Kosmičko zračenje

OBRAZOVNO- VASPITNI CILJEVI NASTAVNE JEDINICE:

- sticanje osnovnih znanja iz oblasti fizike elementarnih čestica
- upoznavanje učenika sa kosmičkim zračenjem
- upoznavanje sa korišćenjem različitih informacija (udžbenik, priručnik, internet....)
- planiranje i realizovanje jednostavnih eksperimenata, formulisanje pitanja, traženje odgovora i izvođenje logičkih zaključaka
- aktivno učešće u nastavnom procesu
- razvijanje logičkog mišljenja i radoznalosti

OBLIK RADA: Frontalni

METODA RADA: Verbalna, demonstrativna

NASTAVNA SREDSTVA: Maglena komora, računar, projektor

VREMENSKA ARTIKULACIJA ČASA:

Uvodni deo časa: 5-10 minuta

Operativni deo časa: 25-30 minuta

Završni deo časa: 5-10 minuta

## UVODNI DEO ČASA

### PITANJA I OČEKIVANI ODGOVORI

PITANJE 1: Šta je to „elementarna čestica“?

OČEKIVANI ODGOVOR: Elementarna čestica je čestica kojoj se na određenom nivou razvoja fizike ne može pripisati unutrašnja struktura, odnosno koja pri uzajamnom delovanju sa drugim česticama ili poljima ostaja nedeljiva, jedinstvene celine.

PITANJE 2. : Koja je osnovna podela elementarnih čestica?

OČEKIVANI ODGOVOR: Osnovna podela je na fermione i bozone, na osnovu spina čestica. Fermioni se dele na leptone i kvarkove.

PITANJE 3.: Koja je razlika između leptona i kvarkova?

OČEKIVANI ODGOVOR: Osnovna razlika je naelektrisanje- leptoni imaju celobrojno, a kvarkovi trećinsko naelektrisanje.

PITANJE 4. : Koje su osnovne interakcije u prirodi?

OČEKIVANI ODGOVOR: Osnovne interakcije u prirodi su gravitaciona, elektromagnetna, jaka i slaba nuklearna.

PITANJE 5.: Koje su čestice prenosioci ovih interakcija?

OČEKIVANI ODGOVOR: Prenosilac gravitacione interakcije je graviton, elektromagnetne foton, prenosioci jake interakcije su gluoni, a slabe  $W^+$ ,  $W^-$  i  $Z^0$  bozoni.

PITANJE 6.: Na prethodnom času smo govorili o detektorima. Koji je najprostiji detektor elementarnih čestica?

OČEKIVANI ODGOVOR: To je Vilsonova (maglena) komora.

## OPERATIVNA FAZA ČASA

### KOSMIČKO ZRAČENJE

Kako je pomenuto, najjednostavniji detektor elementarnih čestica je maglena komora.

#### OGLED

Ogled se postavlja pre početka časa, kako bi do kraja časa efekat prolaska kosmičkog zračenja bio vidljiv.

Uputstva za pravljenje maglene komore, mogu se naći u Prilogu 1 ove Pripreme za vođenje nastavnog časa.

Otkriće kosmičkih zraka je nastalo kao posledica istraživanja uzoraka jonizacije vazduha. Na jonizaciju vazduha ne utiče samo radioaktivnost Zemlje, već i zraci i čestice koji dolaze iz svemira – kosmički zraci. To zračenje je nazvano ***kosmičko zračenje***.

Postavlja se pitanje kako se došlo do zaključka da zračenje dolazi iz Svemira, a da ne potiče od radioaktivnosti Zemlje? Intenzitet jonizacije je izmeren na površini Zemlje i na 1000 m nadmorske visine. Rezultati su pokazali neznatno smanjenje.

PITANJE: Šta bi pokazali rezultati da je uzrok jonizacije samo na Zemlji?

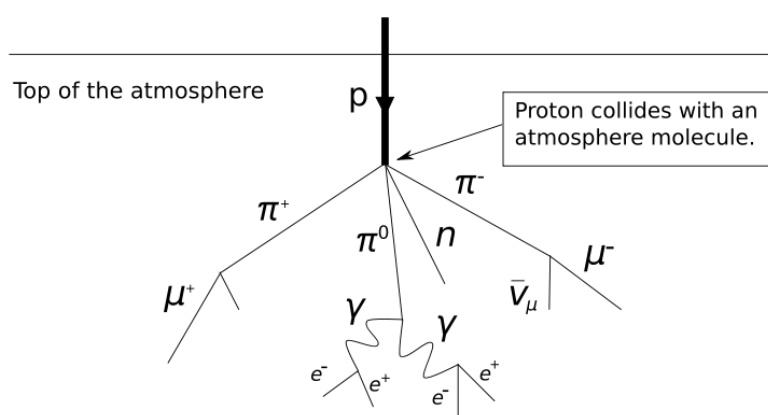
OČEKIVANI ODGOVOR: Pokazali bi da se intenzitet jonizacije mnogo više smanjuje sa povećanjem visine.

Kada je utvrđeno da na visinama većim od 1000 m intenzitet jonizacije vazduha naglo raste, nije bilo više nikakve sumnje da kosmičko zračenje ima vanzemaljsko poreklo.

Kosmičko zračenje dospeva na Zemlju iz svih pravaca kosmičkog prostora, njegov intenzitet ne zavisi od toga da li je dan ili je noć i ne zavisi od godišnjeg doba.

Kosmičko zračenje je zračenje sačinjeno od visokonenergetskih čestica i gama zraka koji ulaze u Zemljinu atmosferu iz kosmosa. Njihova energija dostiže vrednosti od  $10^8$  do  $10^{21}$  eV. Ovo je ogromna energija, mnogo veća od energije koja se oslobađa pri cepanju atoma u nuklearnom reaktoru.

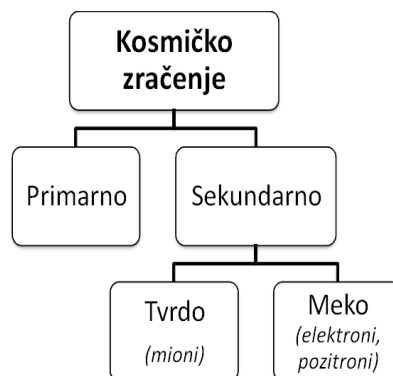
Ako zraci dolaze iz kosmosa, nazivaju se **primarni kosmički zraci**. Pri interakciji kosmičkih primarnih zraka (ne mora biti samo sa Zemljinom atmosferom), obrazuju se **sekundarni kosmički zraci**.



Slika 20.

Interakcija kosmičkog zračenja uglavnom sačinjenog od protona sa Zemljinom atmosferom

U sastavu sekundarnog kosmičkog zračenja postoje 2 komponente- tvrda i meka komponenta. Meku komponentu čini lavina elektronsko-pozitronskih parova zajedno sa fotonima, a tvrdu komponentu čine uglavnom mioni. Ova podela se može videti i na slici 21.



Slika 21.

Klasifikacija tipova kosmičkog zračenja

PITANJE: Zašto se sekundarno zračenje koje čine mioni naziva “tvrda” komponenta, a ona koju čine parovi elektrona i pozitrona “meka”?

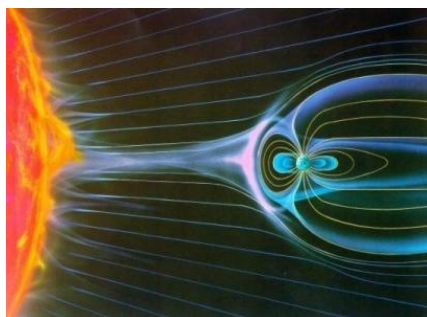
OČEKIVANI ODGOVOR: Zato što mioni imaju veću energiju od elektrona i pozitrona.

Većina čestica koje čine kosmičko zračenje su naelektrisane čestice.

PITANJE: Kako se naelektrisane čestice ponašaju u magnetnom polju?

OČEKIVANI ODGOVOR: Naelektrisane čestice skreću u magnetnom polju u zavisnosti od znaka naelektrisanja.

Na primeru Sunčevog vetra, koji takođe čine lake naelektrisane čestice a deo kosmičkog zračenja potiče i od njega, pokazaćemo kako se te naelektrisane čestice kreću u magnetnom polju Zemlje.



Slika 22.

Sunčev vetar u interakciji sa magnetnim poljem Zemlje

Ako bismo otputovali na severni ili južni pol imali bismo priliku i golim okom da se uverimo u postojanje kosmičkog zračenja. Poznat je fenomen *Aurora Borealis* (preko računara pustiti kratak snimak realnog događaja), koji je i prikazan na slici 23.



Slika 23.

Aurora Borealis



Emitovanje svetlosti nastaje zbog ekscitovanja atoma i molekula iz atmosfere pri njihovoj interakciji sa kosmičkim zračenjem, pa tako imamo karakterističnu zelenu boju koja potiče od atoma azota i karakterističnu crvenu boju koja potiče od atoma kiseonika.

Istraživanja kosmičkih zraka su i dalje veoma interesantna i značajna. Ona mogu biti sprovedena pomoću detektora koji se nalaze na Zemlji, detektorima koji se nalaze na satelitima, kao i balonima koji se puštaju sa površine Zemlje. Kada govorimo o detektorima koji se nalaze na Zemlji, oni mogu biti na površini, ukopani pod zemljom, kao i pod morskim dnom. Ovakvi eksperimenti su veoma aktivni i danas i neki od najpoznatijih su Super-Kamiokande u Japanu, Gran Sasso u Italiji, pa je čak i LHC u CERN-u ispitivao kosmičko zračenje. Na taj način su i proveravani i kalibrisani detektori.

## **ZAVRŠNA FAZA ČASA**

Posmatranje tragova kosmičkog zračenja u maglenoj komori. Obnavljanje nastavne jedinice u toku posmatranja.

U komori, u samoj magli, nekoliko *mm* od crne ploče, mogu se videti beli tragovi, kao niz kapljica kada kroz maglu prođe čestica. Trag se javlja zbog jonizacije koju naelektrisana čestica svojim prolaskom vrši. Čestice gasa (izopropil alkohola) se kondenzuju oko jona stvorenih prolaskom naelektrisane čestice i na taj način je moguće videti trag čestica. Vrlo brzo ove sitne kapljice, koje su se stvorile oko jona posle prolaska naelektrisane čestice, padaju na dno komore.

PITANJE 1.: Da li je izvor kosmičkog zračenja skoncentrisan na jednom mestu?

OČEKIVANI ODGOVOR: Izvor kosmičkog zračenja nije skoncentrisan na jednom mestu, već to zračenje dolazi iz celokupnog kosmičkog prostora.

PITANJE 2.: Koje dve vrste kosmičkog zračenja razlikujemo?

OČEKIVANI ODGOVOR: Razlikujemo primarno i sekundarno kosmičko zračenje, a sekundarno kosmičko zračenje može biti tvrdo i meko.

PITANJE 3.: Koja je razlika između mekog i tvrdog sekundarnog kosmičkog zračenja?

OČEKIVANI ODGOVOR: Razlika je u tome što tvrdo kosmičko zračenje čine mioni, a meko elektroni i pozitroni.

U slučaju da iz objektivnih razloga nije moguće konstruisati maglenu komoru, ili ako je njena realizacija neuspešna, učenicima se može emitovati kratak film koji ilustruje prolazak kosmičkog zračenja kroz maglenu komoru.

Na internet stranici [www.youtube.com](http://www.youtube.com) može se naći veliki broj veoma ilustrativnih i poučnih video snimaka, pretragom pod nazivom „cloud chamber cosmic rays“ (kosmički zraci u maglenoj komori).

Postoji i veliki broj stranica koje sadrže animacije izgleda interakcije kosmičkog zračenja sa Zemljinom atmosferom uz mogućnost podešavanja raznih parametara, kao što su visina na kojoj se posmatra, vremenski interval posmatranja, itd.

**PRILOG 1.**

Kako napraviti maglenu komoru?

Potreban pribor: plastični akvarijum na čije dno je pričvršćen filc, izopropil alkohol (96-100%), crna metalna ploča (1-1.5 cm debljine) sa žljebom u koji se stavlja akvarijum, suvi led, drvena kutija obložena stiroporom, baterijske lampice, zaštitne naočare, rukavice i mantil.



Slika 24.

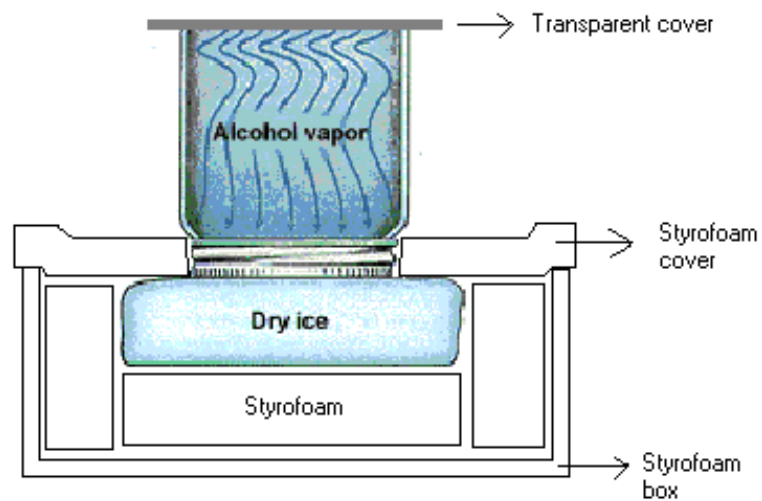
Aparatura potrebna za pravljenje maglene komore

Način izrade: U kutiju obloženu stiroporom staviti komade suvog leda. Filc na dnu akvarijuma dobro natopiti izopropil alkoholom, u žljeb metalne ploče sipati izopropil alkohol kako bi se osiguralo da u komoru neće ući vazduh, lepljivom trakom pričvrstiti plastični providni akvarijum naopačke za ploču.



Slika 25.

Žljeb metalne ploče u koji se naopako stavlja plastični akvarijum



Slika 26.  
Shematski prikaz realizacije maglene komore

Ovako spojenu ploču i plastični providni akvarijum pažljivo spustiti direktno na suvi led. Ostaviti 15-20 minuta da se stvori sloj magle u blizini metalne ploče. Zamračiti prostoriju i uz pomoć baterijske lampe osvetliti tragove čestica koje prolaze kroz komoru.



Slika 27.  
Osvetljavanje maglene komore i posmatranje tragova čestica kosmičkog zračenja

Pri realizaciji ovakvog eksperimenta, profesor mora voditi računa o bezbednosti učenika, te se moraju koristiti odgovarajuće rukavice, zaštitne naočare i mantili.

## **7.2. Obrada nastavne jedinice „Čestice i antičestice“**

NAZIV ŠKOLE: Gimnazija

NAZIV PREDMETA: Fizika

RAZRED: Četvrti

NASTAVNA TEMA: Fizika elementarnih čestica

NASTAVNA JEDINICA: Čestice i antičestice

OBRAZOVNO- VASPITNI CILJEVI NASTAVNE JEDINICE:

- sticanje osnovnih znanja iz oblasti fizike elementarnih čestica
- upoznavanje učenika sa antičesticama
- upoznavanje sa korišćenjem različitih informacija (udžbenik, priručnik, internet....)
- formulisanje pitanja, traženje odgovora i izvođenje logičkih zaključaka
- aktivno učešće u nastavnom procesu
- razvijanje logičkog mišljenja i radoznalosti

OBLIK RADA: Frontalni

METODA RADA: Verbalna

NASTAVNA SREDSTVA: Računar, projektor

VREMENSKA ARTIKULACIJA ČASA:

Uvodni deo časa: 5-10 minuta

Operativni deo časa: 25-30 minuta

Završni deo časa: 5-10 minuta

### **UVODNI DEO ČASA**

#### **PITANJA I OČEKIVANI ODGOVORI**

PITANJE 1: Kako definišemo elementarne čestice?

OČEKIVANI ODGOVOR: Elementarna čestica je čestica kojoj se na određenom nivou razvoja fizike ne može pripisati unutrašnja struktura, odnosno koja pri uzajamnom delovanju sa drugim česticama ili poljima ostaje nedeljiva, jedinstvene celine.

PITANJE 2. : Koja je osnovna podela elementarnih čestica?

OČEKIVANI ODGOVOR: Osnovna podela je na fermione i bozone, na osnovu spina čestica. Fermioni se dele na leptone i kvarkove.

PITANJE 3.: Koja je razlika između leptona i kvarkova?

OČEKIVANI ODGOVOR: Osnovna razlika je naelektrisanje- leptoni imaju celobrojno, a kvarkovi trećinsko naelektrisanje.

PITANJE 4.: Koje dve vrste kosmičkog zračenja razlikujemo?

OČEKIVANI ODGOVOR: Razlikujemo primarno i sekundarno kosmičko zračenje, a sekundarno kosmičko zračenje može biti tvrdo i meko.

PITANJE 5.: Koja je razlika između mekog i tvrdog sekundarnog kosmičkog zračenja?

OČEKIVANI ODGOVOR: Razlika je u tome što tvrdo kosmičko zračenje čine mioni, a meko elektroni i pozitroni.

## **OPERATIVNA FAZA ČASA ČESTICE I ANTIČESTICE**

U dosadašnjoj priči o elementarnim česticama govorili smo i opisivali isključivo čestice. Kod klasifikacije čestica spomenuto je da svaka čestica ima svoju antičesticu.

Istorija antičestica počinje kada je engleski fizičar P. Dirak 1930. godine teorijski predvideo postojanje antičestice elektrona- pozitron. Tačnost ovog Dirakovog teorijskog predviđanja eksperimentalno je potvrdio američki fizičar Anderson, 1932. godine, izučavajući kosmičke zrake u maglenoj komori.

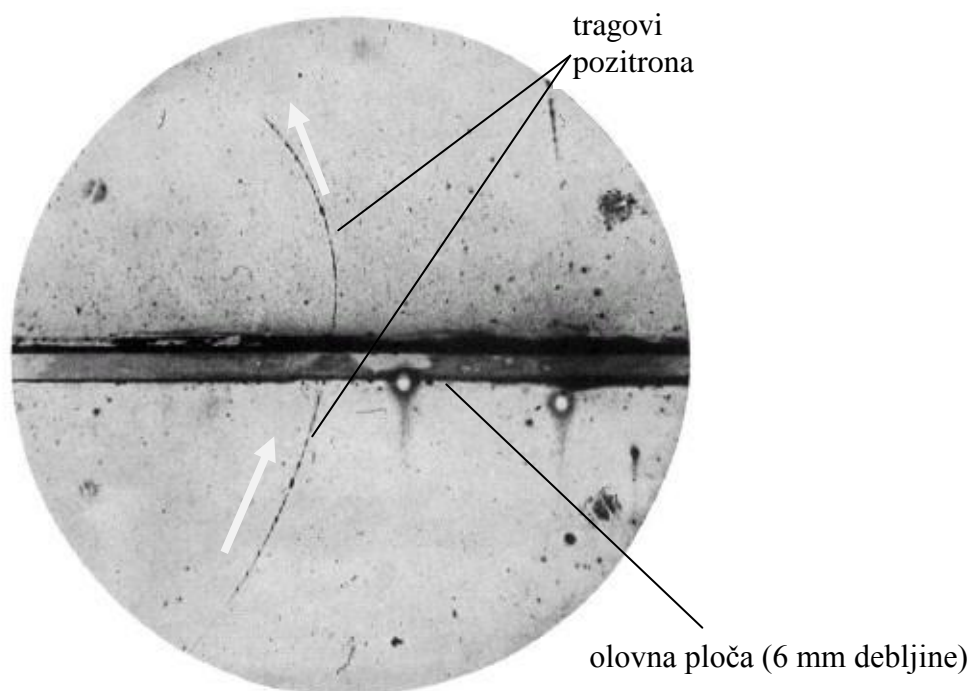


FIG. 1. A 65 million volt positron ( $H_p = 2.1 \times 10^8$  gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ( $H_p = 7.5 \times 10^8$  gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

Slika 28.

Fotografija maglene komore i otkrića pozitrona

Trag pozitrona bio je isti kao i trag elektrona koji se pojavio zajedno sa njim, samo što je taj trag bio zakrivljen na suprotnu stranu.

Pri rasejanju fotona, u polju jezgra, energije veće od  $2m_e c^2$ , dolazi do stvaranja parova elektron-pozitron:



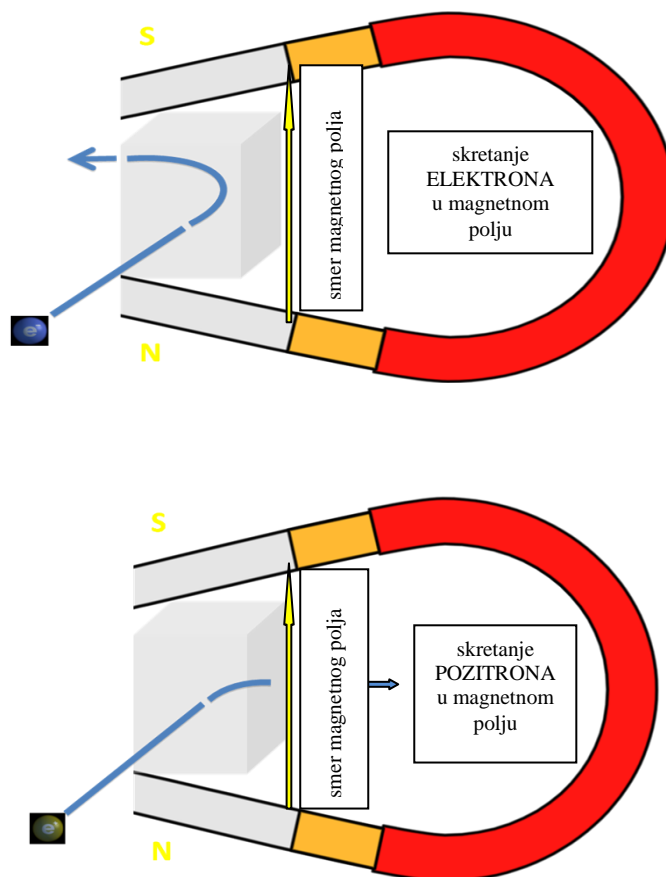
Sličnosti čestice i antičestice:

- imaju istu masu
- imaju isto vreme života
- imaju isti spin

Po čemu se čestice i antičestice razlikuju:

- naelektrisanje im je suprotno
- magnetni moment im je suprotan

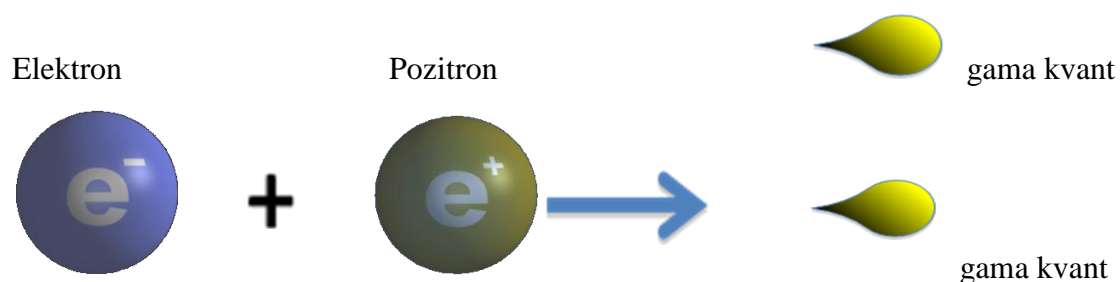
Kako je naelektrisanje čestice i antičestice suprotno, one skreću u suprotnim smerovima u magnetnom polju, kao što je to prikazano na sledećim slikama:



Slika 23.

Skretanje elektrona i pozitrona u električnom polju

U vakuumu, pozitron je stabilan kao i elektron. Ali susret ove dve čestice završava se anihilacijom i one se pri tome transformišu u fotone (gama-kvante):



Slika 24.

Anihilacija elektrona i pozitrona, stvaranje dva gama kvanta

Mase pozitrona i elektrona su iste:  $m_{e^-} = m_{e^+} = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$  pa je ukupna masa obe čestice:

$$m_{e^-} + m_{e^+} = m = 1.82 \times 10^{-30} \text{ kg} \quad (14)$$

$$i, c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (15)$$

Pa,

$$E = mc^2 = 1.82 \times 10^{-30} \times (3.00 \times 10^8)^2 \quad (16)$$

$$E = 1.64 \times 10^{-13} \text{ J} \quad (17)$$

a to znači da svaki od fotona, nastalih pri anihilaciji pozitrona i elektrona, ima energiju od  $0.82 \times 10^{-13} \text{ J}$ .

Istraživanja su pokazala da svaka čestica ima odgovarajuću antičesticu. Kao izuzeci postoje i čestice koje su same sebi antičestice, kao na primer neutralni kaon ( $K^0$ ).

Danas postoje razvijeni mehanizmi proizvodnje ne samo pozitrona kao antičestica, već i mnogih drugih. Međutim, u Evropskoj laboratoriji za nuklearna istraživanja (CERN) danas se stvaraju anti-atomi, tačnije anti-vodonik. Za sada se tako stvorene čestice koriste u istraživanjima karakteristika antičestica. Ovakve atome je izuzetno teško stvoriti i čuvati jer veoma lako dolazi do anihilacije antimaterije sa materijom. Kada je 1995. godine objavljeno da su naučnici uspeali da stvore antivodonik, kreirano je samo 9 atoma.

Antičestice, odnosno, antiprotoni obrazuju se tako što se protoni ubrzavaju do određene energije a zatim sudaraju sa metom. Iz energije sudara koja je izuzetno velika, stvaraju se antiprotoni koji se posredstvom električnog i magnetnog polja izdvajaju iz mnoštva nastalih čestica i usmeravaju ka pozitronima, kako bi hemijskom reakcijom stvorili antivodonik.

U nekim filmovima spominje se korišćenje antimaterije kao goriva za svemirski brod („Star Trek“), a u nekima kao način da se u anihilaciji 0.5g antimaterije sa materijom uništi planeta Zemlja („Anđeli i demoni“). Ni jedna od ovih ideja nije moguća jer je proizvodnja antimaterija izuzetno neisplativa, odnosno mora se uložiti mnogo više energije u njeno stvaranje nego što se dobije anihilacijom, a i za stvaranje 1.1 kg antimaterije je potrebno 2,200,000,000,000 godina u uslovima kakvi postoje danas.

**ZAVRŠNA FAZA ČASA  
PITANJA I OČEKIVANI ODGOVORI**

PITANJE 1: Ako na mojoj desnoj ruci stoji šešir, šta će se desiti ukoliko okrenem ruku?

OČEKIVANI ODGOVOR: Šešir će pasti na pod.

PITANJE 2.: Ako zanemarimo činjenicu da materija i antimaterija anihiliraju pri susretu i zamislimo na mojoj levoj ruci stoji šešir načinjen od antičestica (anti-šešir) i ako okrenem ruku, šta će se desiti?

OČEKIVANI ODGOVOR: Šešir će pasti na pod.

PITANJE 3.: Hoće li i šešir i anti-šešir sa istim ubrzanjem padati na pod?

OČEKIVANI ODGOVOR: Hoće, zato što i čestice i antičestice imaju istu masu.

PITANJE 4.: Kako znamo da Mesec nije načinjen od antimaterije?

OČEKIVANI ODGOVOR: Da je Mesec od antimaterije došlo bi do anihilacije sa Zemljom i mi ne bismo postojali.



## **8. DODATNE SAVREMENE AKTIVNOSTI U NASTAVI FIZIKE ELEMENTARNIH ČESTICA**

Prethodna dva primera vođenja nastavnog časa daju neke ideje kako se nastava iz ove oblasti fizike koja se i dalje razvija može osavremeniti i unaprediti. Iako ovakav vid nastave fizike sa predstavljanim idejama nije realizovan na nekom nastavnom času, na osnovu iskustava sa uvođenjem sličnih inovacija u naučno-popularna predavanja upravo iz oblasti fizike elementarnih čestica može se pretpostaviti njena uspešnost. Postoji niz inovacija koje profesor može da uvede u nastavu kako na samom času, tako i nekim dodatnim aktivnostima. Neke od njih biće razmotrene u tekstu koji sledi.

Ono što je pre svega neophodno jeste da profesori fizike kao pojedinci pokažu inicijativu za unapređivanje svoje nastave. Pomenuta oblast fizike nije bila na ovom nivou znanja pre 5 godina te da bi se kvalitetno izvodila nastava, neophodno je da profesor prati dešavanja u njoj. Danas je to zaista veoma dostupno svima- postoje internet stranice kojima je veoma lako pristupiti i na taj način pratiti novine. Takođe, postoje internet stranice koje pomažu upravo profesorima u tome kako ovu najsavremeniju oblast fizike približiti učenicima. Na njima postoje primeri poređenja sa nekim svakodnevnim situacijama, veliki broj pitanja koje učenici često postavljaju i ispravnih odgovora na njih. Učenici uglavnom na početku svakog časa imaju prilike da čuju kratak istorijski uvod, a veoma retko šta se u sadašnjem trenutku dešava u nauci. Kada čuju da se govori o nekim otkrićima koja su se dogodila u prethodnih nekoliko godina, njihova pažnja naglo raste.

Osim toga, teži se ka što boljoj opremljenosti škola u tehničkom smislu, pa bi tako u svakoj gimnaziji trebalo da postoje računari i projektori, dostupni profesorima. Korišćenje računara u nastavi daje mnogo slobode za kreativnost. Konačno, fizika elementarnih čestica je poslednja nastavna tema u četvrtim razredima gimnazije u okviru nastave fizike, pa je to prava prilika da se učenici upoznaju sa načinom rada na fakultetima. Sve više profesora na fakultetima je kredu i tablu zamenilo „Power Point“ prezentacijom. To može da učini i profesor na svojim poslednjim časovima. Računar daje mogućnosti za prikazivanje fotografija, video snimaka i animacija koje mogu biti veoma korisne u nastavi pri vizuelizaciji nekih veoma apstraktnih fenomena, kao što je na primer anihilacija čestica i antičestica, demonstracije reda veličine protona ili čak kvarkova, animaciju razmene gluona među kvarkovima, itd. Na internetu postoji izuzetno velika količina materijala koji može da se koristi u nastavi. Autori tog materijala su razni- od naučnika koji na inovativan način predstavljaju svoja otkrića, preko raznih profesora i studenata učesnika edukativnih i raznih drugih seminara, preko profesora koji ih prave na osnovu svog iskustva, pa sve do ozbiljnih naučnih institucija kojima je cilj da se u školama ova oblast fizike što inovativnije obrađuje, sa implementiranjem naučnih principa. Jedan takav program je program CERN-a (Evropski centar za nuklearna istraživanja) nazvan „*Antimatter Teaching Module*“. U okviru ovog programa dostupne su „Power Point“ prezentacije, fotografije, sheme, animacije, računski primeri, kao i inserti iz Science-Fiction filmova u kojima se pojavljuju segmenti vezani za tematiku antičestica. Na taj način se postiže dodatna pažnja učenika, aktivnost i radoznalost, ali isto tako pokazuje da antimaterija nije samo plod mašte filmskih scenarista i režisera, već da ona zaista postoji i da naučnici izučavaju njene osnovne karakteristike.

Neophodna je obazrivost i oprez profesora pri pretraživanju interneta u želji da unapredi svoju nastavu. Veoma je važno da sadržaji koji su uključeni u nju doprinose razumevanju gradiva ove oblasti, kako pomoću jednostavnih primera i analogija, tako i pomoću matematičkog aparata prilagođenog predznanju gimnazijalaca u četvrtom razredu. Takođe, posebna pažnja mora da se posveti predznanju iz fizike, kako bi se novi pojmovi, koji se uvode u fizici elementarnih čestica objasnili pomoću već poznatih pojmova iz nuklearne, atomske ili kvantne fizike, te se sadržaji moraju prilagoditi učenicima i po tom kriterijumu.

Kao prilog obradi nastavne jedinice „Kosmičko zračenje“ dat je opis realizacije maglene komore, detektora kosmičkog zračenja što može biti odlična ilustracija za istorijat istraživanja u oblasti fizike elementarnih čestica, a pored toga i kao dobar način da se dokaže egzistencija čestica kosmičkog zračenja iako one nisu vidljive, da dolaze iz svih pravaca iz svemira i da ne postoji jedan izvor.

Na Prirodno-matematičkom Fakultetu u Novom Sadu postoji niz aktivnosti koje mogu biti veoma zanimljive kako učenicima, tako i profesorima. Neke od njih su naučno-popularna predavanja na kojima učenici mogu čuti i naučiti mnogo zanimljivih i interesantnih stvari za koje nema prostora u nastavnom planu i programu. Takođe, od skoro postoje i video-konferencije sa CERN-om, trenutno najjemenitnijom institucijom u oblasti fizike u svetu, gde učenici mogu direktno postavljati svoja pitanja naučnicima koji se bave najsavremenijom naukom i dobijati informacije o najnovijim događajima u fizici elementarnih čestica.

## 9. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predstavljen program fizike elementarnih čestica u gimnazijama prirodno-matematičkog smera, problemi koji se mogu javiti u nastavi, kao i primeri kako se tehnološke i naučne inovacije mogu implementirati u nastavi u cilju što boljeg razumevanja ove oblasti.

Izuzetno je važno pokazati da način vođenja jednog nastavnog časa može da ide u korak sa modernom naukom i tehnologijom. Korišćenjem modernih tehnologija i znanja, profesor svojim primerom pokazuje kako znanje treba da se proširuje i unapređuje iz dana u dan, a istovremeno svojim učenicima pruža mogućnost za pogled u budućnost.

Puštanjem u rad najvećeg i najmoćnijeg akceleratora u fizici elementarnih čestica LHC-a (*Large Hadron Collider*) 2009. godine nastupila je nova era u kojoj se realno mogu očekivati otkrića nekih novih, egzotičnih čestica i fizičkih fenomena.

Odgovor na pitanje „Zašto priroda oko nas izgleda baš ovako, a ne nekako drugačije?“ krije se u fizici elementarnih čestica, jer u prirodi ničeg drugog i nema. Utvrđivanjem svih njihovih osobina, bolje ćemo razumeti prirodu i njene zakonitosti.

Upravo iz tog razloga neophodno je gimnazijalce upoznati sa fizikom elementarnih čestica, kao granom fizike koja se i dalje razvija i to na pravi način, uz odgovarajuće analogije, računске primere, animacije i kratke filmove, jer je brojnost mladih i talentovanih ljudi koji se odluče baviti najmodernijom naukom, nužan uslov tog razvoja.

## LITERATURA

- [1] Fizika za četvrti razred gimnazije prirodno-matematičkog smera, M. Raspopović, D. Kapor, M. Škrinjar, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva Beograd, 2004.
- [2] University Physics 12<sup>th</sup> edition, H. Young, R. Freedman, Pearson Education, 2008.
- [3] Na plećima divova, S. Hoking, Alnari, Beograd, 2006.
- [4] Particle Physics Booklet, Review of Particle Physics, C. Amsler, et.al., Physics Letters B 677, 1 (2008)
- [5] Pedagogija, S. Popov, S. Jukić, CNTI, WILLY, Novi Sad, 2006.
- [6] Didaktika fizike-teorija nastave fizike, T. Petrović, Fizički fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1993.
- [7] [http://www.wikipedia.org/wiki/Particle\\_physics](http://www.wikipedia.org/wiki/Particle_physics), 2. jun 2010.
- [8] [http://www.wikipedia.org/wiki/Large\\_Hadron\\_Collider](http://www.wikipedia.org/wiki/Large_Hadron_Collider), 26. jun 2010.
- [9] <http://en.wikipedia.org/wiki/Electron>, 7. jul 2010.
- [10] <http://en.wikipedia.org/wiki/Proton>, 27. jun 2010.
- [11] <http://en.wikipedia.org/wiki/Neutron>, 27. jun 2010.
- [12] <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/486323/quark>, 7. jul 2010.
- [13] <http://www.df.uns.ac.rs/infophysics/>, septembar 2008.
- [14] [http://www.fnal.gov/pub/presspass/press\\_releases/donut.html](http://www.fnal.gov/pub/presspass/press_releases/donut.html), 13. februar 2001.
- [15] <http://education.web.cern.ch/education/Chapter2/Teaching/atm.html>, jun 2010.
- [16] <http://hepwww.rl.ac.uk/public/bigbang>, jun 2010
- [17] <http://www.particleadventure.org>, maj 2010.
- [18] [http://tap.iop.org/atomic/particles\\_antiparticles/index.html](http://tap.iop.org/atomic/particles_antiparticles/index.html), jul 2010.
- [19] <http://www.hep.man.ac.uk/babarph/babarteach/teach/top.htm>, mart 2010.
- [20] <http://www.quarked.org> jul, 2010.
- [21] [http://www.youtube.com/watch?v=W\\_BCLKEGLt0&feature=related](http://www.youtube.com/watch?v=W_BCLKEGLt0&feature=related), 14. decembar 2008.

## **KRATKA BIOGRAFIJA**



Elvira Đurđić, rođena 19.06.1986. godine u Novom Sadu. Posle završene osnovne škole „Petar Kočić“ u Temerinu, upisala Gimnaziju u Bečeju 2001. godine. Nakon završetka srednje škole, 2005. godine upisala osnovne studije na smeru „profesor fizike“, Departmana za fiziku, Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu.

UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

*Redni broj:*

**RBR**

*Identifikacioni broj:*

**IBR**

*Tip dokumentacije:*

Monografska dokumentacija

**TD**

*Tip zapisa:*

Tekstualni štampani materijal

**TZ**

*Vrsta rada:*

Diplomski rad

**VR**

*Autor:*

Elvira Đurđić

**AU**

*Mentor:*

dr Miroslav Vesković, red. prof.

**MN**

*Naslov rada:*

Savremeni sadržaji i pristup nastavi fizike elementarnih čestica

**NR**

*Jezik publikacije:*

srpski (latinica)

**JP**

*Jezik izvoda:*

srpski/engleski

**JI**

*Zemlja publikovanja:*

Srbija

**ZP**

*Uže geografsko područje:*

Vojvodina

**UGP**

*Godina:*

2010

**GO**

*Izdavač:*

Autorski reprint

**IZ**

*Mesto i adresa:*

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

**MA**

*Fizički opis rada:*

**FO**

*Naučna oblast:*

Fizika

**NO**

*Naučna disciplina:*

Fizika elementarnih čestica

**ND**

*Predmetna odrednica/ ključne reči:*

Elementarne čestice, fundamentalne interakcije, savremene tehnologije, savremena znanja

**PO**

**UDK**

*Čuva se:*

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

**ČU**

*Važna napomena:*

nema

**VN**

*Izvod:*

Cilj ovog rada je unapređenje nastave fizike elementarnih čestica u gimnazijama, uvođenjem savremenih tehnologija i znanja i rešavanjem potencijalnih problema u shvatanju apstraktnih pojmova.

**IZ**

*Datum prihvatanja teme od NN veća:*

05.07.2010.

**DP**

*Datum odbrane:*

12. 07.2010.

**DO**

*Članovi komisije:*

**KO**

*Predsednik:*

dr Darko Kapor, red. prof.

*član:*

dr Miroslav Vesković, red. prof.

*član:*

dr Tijana Prodanović, docent

UNIVERSITY OF NOVI SAD  
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

*Accession number:*

**ANO**

*Identification number:*

**INO**

*Document type:*

Monograph publication

**DT**

*Type of record:*

Textual printed material

**TR**

*Content code:*

Final paper

**CC**

*Author:*

Elvira Đurđić

**AU**

*Mentor/comentor:*

dr Miroslav Vesković, full prof.

**MN**

*Title:*

Contemporary contents and approach to particle physics teaching

**TI**

*Language of text:*

Serbian (Latin)

**LT**

*Language of abstract:*

English

**LA**

*Country of publication:*

Serbia

**CP**

*Locality of publication:*

Vojvodina

**LP**

*Publication year:*

2010

**PY**

*Publisher:*

Author's reprint

**PU**

*Publication place:*

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

**PP**

*Physical description:*

5/182/32/0/71/0/3

**PD**

*Scientific field:*

Physics

**SF**

*Scientific discipline:*

Particle physics

**SD**

*Subject/ Key words:*

Fundamental particles, fundamental interactions, modern technologies, contemporary knowledge

**SKW**

**UC**

*Holding data:*

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

**HD**

*Note:*

none

**N**

*Abstract:*

The goal is to facilitate the particle physics teaching by using modern technologies and contemporary knowledge in solving some possible problems in understanding caused by some abstract concepts.

**AB**

*Accepted by the Scientific Board:*

05.07.2010.

**ASB**

*Defended on:*

12.07.2010.

**DE**

*Thesis defend board:*

**DB**

*President:*

dr Darko Kapor, full prof.

*Member:*

dr Miroslav Vesković, full prof.

*Member:*

dr Tijana Prodanović, assistant prof.