



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ПРИМЉЕНО:	19 ОКТ 2007
ОРГАНИЗ.ЈЕД.	БРОЈ
0603	9/1424

Akceleratori u nuklearnoj i fizici

elementarnih čestica

- diplomski rad -

Mentor:

Dr Miroslav Vesković, red.profesor

Kandidat:

Krunija Papić

Novi Sad, 2007

*Posebnu zahvalnost dugujem mom mentoru
profesoru dr. Miroslavu Veskoviću na predloženoj
temi, izuzetnoj stručnoj podršci i inventivnosti pri
izradi diplomskog rada.*



Sadržaj

1. Uvod	4
2. Opšte karakteristike akceleratora.....	6
3. Podela akceleratora.....,	11
4. Linearni akceleratori.....	12
4.1. Akceleratori sa pogurnim cevima.....	13
4.2. Akceleratori sa talasovodima.....	16
5. Orbitalni akceleratori.....	18
5.1. Standardni ciklotron.....	18
5.2. Sinhrociklotron.....	25
5.3. Izohroni ciklotron.....	27
5.4. Elektron sinhrotron.....	28
5.5. Proton sinhrotron.....	30
6. Veliki hadronski sudarač-LHC.....	33
7. DESY-HERA.....	36
8. Zaključak.....	38
9. Literatura.....	39
10.Biografija.....	40

1. UVOD

Od kada se prvi put pojavila ideja o atomu, kao nečemu nedeljivom, kao osnovnoj ćeliji koja gradi svet oko nas, atom je dobijao sve manje i manje dimenzije, a broj tih gradivnih jedinica bivao je sve manji. Hemičari su godinama "cepali" atom i stalno nalazili osnovne elementarne strukture materije. Godine istraživanja dovele su do ideje o atomu, kao hemijskom elementu – najjednostavnijoj gradivnoj jedinici svih materijala koje poznajemo. Hemičari nisu mogli dalje da dele atom, za njih je on do današnjih dana ostao nedeljiv, ali tada su u pomoć došli fizičari.

Prva istraživanja radioaktivnosti hemijskog atoma pokazala su da atom nije najjednostavnija gradivna jedinica. Brzo je ljudska civilizacija shvatila potencijal energije atomskog jezgra, izgrađeni su brojni nuklearni reaktori i nuklearne centrale. Atomi, hemijski elementi, prestali su da budu najjednostavnije "cigle" koje izgrađuju svet oko nas, njihovu ulogu preuzeli su protoni, elektroni i neutroni. Sve je postalo tako jednostavno, ispostavilo se da su stotinak hemijskih atoma, koliko je poznato, u stvari složene strukture koje se mogu dobiti kombinovanjem novih "atoma" tj. tri elementarne čestice.

Međutim, tu nije bio kraj priče, ovo je bio tek početak, početak u razvoju jedne savremene i vrlo zanimljive oblasti fizike, fizike elementarnih čestica, čiji je jedini cilj bio da opiše od čega je sagrađen svet u kome živimo. Krenula su nova istraživanja, traženi su novi načini da se razbiju ove elementarne čestice, a tražile su se i nove. Da bi nastavili sa sečenjem "atoma" fizičari su morali da prave sve oštije i oštije noževe, a taj "nož" bili su sve moćniji i moćniji akceleratori.

Akceleratori su uređaji koji, pomoću električnog i magnetnog polja, ubrzavaju nanelektrisane čestice do velikih brzina, nekada čak i do brzina koje su nešto manje od brzine svetlosti. Ovi uređaji omogućuju ispitivanje tajni atomskog jezgra, strukture protona i neutrona, sila koje svu tu gomilu čestica drže na okupu i još mnogo, mnogo toga.

U akceleratorima se najčešće ubrzavaju elektroni, protoni i jezgra lakih elemenata (deuteroni i alfa čestice), ali postoje i akceleratori u kojima se ubrzavaju i teži joni (ugljenik, kiseonik, berilijum, neon, pa čak i olovo).

Dobro je poznato da svako telo koje se kreće ima energiju, tzv. kinetičku energiju koja je proporcionalna kvadratu brzine. Prema tome kad akcelerator ubrzava neku česticu on joj povećava energiju, i upravo ta energija je ono što je potrebno za dalja istraživanja. Suština eksperimenta u akceleratorima je da se čestice velikom brzinom sudare sa drugim česticama ili atomskim jezgrima. Prilikom tih sudara složene strukture se raspadaju na sve sitnije delove. Osim toga što sudari omogućavaju da vidimo "sastavne delove" neke složene čestice, od energije koja se oslobodi mogu nastati i neke druge čestice koje nisu ulazile u sastav onih koje su se sudarile.

Najmanji delovi materije su elementarne čestice, to su delovi materije koji se ne mogu dalje deliti na prostije delove. Kako su naučnici tokom proteklih par vekova gledali dublje u atom, pronašli su najsitnije čestice koje do tada nisu videli.

Sudari čestica visokih energija omogućili su fizičarima ne samo da vide šta je unutar četice, nego i da koristeći energiju njihovih sudara kreiraju drugačije masivnije i egzotičnije čestice. Da bi se izazvao sudar tako velike energije, naučnici su morali da koriste jako moćne akceleratore čestica.

Kad ljudi razmišljaju o visoko-energetskim sudarima čestica, oni uglavnom zamišljaju velike eksplozije. Ipak, u svetskim najmoćnijim akceleratorima ispuštena energija pri sudaru dve čestice može se porediti sa energijom koju koristi komarac da bi leteo. Velika koncentracija elementarnih čestica na malom prostoru poseduje dovoljno veliku energiju da razdvoji protone i s vremena na vreme proizvede par "TOP" kvarkova, koji imaju masu približnu masi jednog atoma zlata.

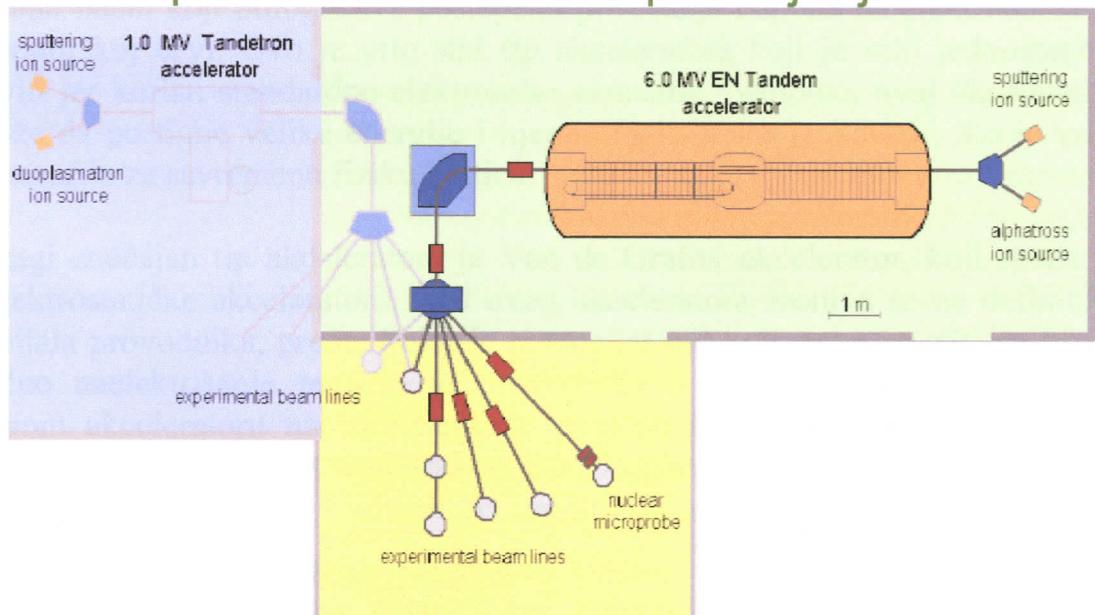
2. OPŠTE KARAKTERISTIKE AKCELERATORA

U periodu od poslednjih nekoliko decenija desio se buran razvitak akceleratorske tehnike. Prvi akceleratori su bili sa energijom oko 1 MeV-a, dok današnji dostižu energiju i do vrednosti reda veličine TeV-a. Energija koju dobijamo iz današnjih mašina se povećala u odnosu na prvobitnu oko milion puta.

Projektovanje i konstrukcija akceleratora je danas ogromno polje naučnog rada u koje odlaze velika sredstva. Ogroman porast te grane fizike u poslednjih 30 godina je nastao delimično zbog poznavanja problema koje treba rešavati, a delimično i zbog tehničkog napretka koji pruža odgovarajuće mogućnosti za rešavanje.

Oblast korišćenja akceleratora su proučavanje strukture jezgra preko nuklearnih reakcija i proučavanje osobina elementarnih čestica. Prvi problem se može ispitivati sa relativno manjim mašinama čije izlazne energije odgovaraju potencijalnim barijerama u jezgrima, dok drugi traži sve novija i novija tehnička rešenja, zahtevajući što je moguće veću energiju ili intenzitet, ili i jedno i drugo. Razvoj ovog drugog polja najviše zavisi od novih prilaza i principa rešavanja.

Tipično akceleratorsko postrojenje



Sl.1.

Princip rada prvih akceleratora je vrlo jednostavan – potrebna je jedino razlika potencijala (npr. baterija) i čestica koju treba ubrzati. U svakom električnom polju nanelektrisane čestice kreću se ka suprotnom nanelektrisanju (npr. elektroni, koji su negativni, kreću se od negativnog ka pozitivnom potencijalu) i tokom tog kretanja oni se ubrzavaju i povećavaju svoju energiju. Ako bi pozitivan pol u ovom jednostavnom akceleratoru bio u obliku rešetke većina elektrona bi, ubrzana, prošla kroz rešetku i izletela iz ovog jednostavnog akceleratora. Na ovom principu radi TV ekran u kome se elektroni ubrzavaju u polju od oko 10.000 V, izleću i udaraju u ekran gde dovode do formiranja slike koju vidimo. Iako princip rada akceleratora deluje vrlo jednostavno, konstrukcija ovih uređaja je vrlo složen i skup proces. Takođe, i održavanje i upotreba akceleratora zahteva velika ulaganja a za rad je potrebna ogromna količina električne energije.

Hronološki gledano, prvi tip akceleratora je Kokroft-Valtonov akcelerator. Ovaj akcelerator je, u principu, sličan opisanom slučaju sa baterijom.

Akcelerator se sastoji od izvora jona, akceleratorske cevi (u kojoj se vrši ubrzavanje), specijalnog izvora visokog napona, koji je na specijalan način priključen na sistem akceleratorskih elektroda, i sistem detektora. Suštinu ovog akceleratora čini upravo izvor napona i sistem elektroda koje ubrzavaju jone. Generator visokog napona se sastoji od dioda i kondenzatora povezanih na specijalan način koji omogućava postepeno povećanje napona na elektrodama u akceleratorskoj cevi. Ovo je vrlo star tip akceleratora koji je vrlo jednostavno napraviti jer koristi standardne elektronske elemente. Naravno, ovaj akcelerator ne može da postigne velike energije i njegov maksimum je 3 MeV, što je vrlo mala energija za savremenu fiziku čestica.

Drugi značajan tip akceleratora je Van de Grafov akcelerator, koji spada u tzv. elektrostatičke akceleratore. Rad ovog akceleratora zasniva se na definiciji potencijala provodnika, prema kojoj je potencijal rad koji treba izvršiti da bi se jedinično nanelektrisanje prenalo sa provodnika u beskonačnost. Na Van de Grafovom akceleratoru nanelektrisanje se pomoću šiljka od izvora prenosi na pokretnu izolacionu traku. Ovom trakom nanelektrisanje se transportuje do sabirne elektrode koja ga sakuplja i odvodi do šuplje elektrode. Na ovaj način može se postići izuzetno velika razlika potencijala (reda $7 * 10^6$ V) koja se kasnije koristi za ubrzavanje čestica. Postoji i tzv. tandem Van de Grafov akcelerator koji je kombinacija dva Van de Grafova akceleratora.

Za razliku od običnog akceleratora u kome se ubrzavaju pozitivni joni, tandem akcelerator počinje da ubrzava negativne jone. U centralnom delu joni gube elektrone (u sudaru sa nekim gasom ili pri prolasku kroz tanak ugljeni sloj) i postaju pozitivni. Sada drugi deo tandem akceleratora ubrzava dobijene pozitivne jone. Energija koja se može dostići na ovaj način iznosi oko 14 MeV-a što je omogućilo veliku primenu Van de Grafovog akceleratora u nuklearnoj fizici.

Ova dva pomenuta tipa akceleratora spadaju u prve linearne akceleratore. Današnji linearni akceleratori se konstruišu na nešto drugačiji način. U pravoj vakuumskoj cevi, koja može da bude dugačka i nekoliko kilometara, nalaze se cilindrične elektrode koje su povezane na polove naizmeničnog izvora visoko frekventnog napona. Na početku cevi nalazi se izvor čestica koje treba ubrzati, dok je meta postavljena na drugi kraj cevi. Naelektrisane čestice se kreću od izvora ka meti. Dok se kreću između elektroda, na njih deluje električno polje i ubrzava ih. Pretpostavimo da se u ovakovom akceleratoru ubrzava pozitivan jon. Na početku prva elektroda je negativna i privlači jon koji počinje da ubrzava. Kad jon uleti u šupljinu electrode, ubrzanje prestaje i on nastavlja da se kreće ravnomerno, po inerciji.

U trenutku kad čestica izade iz prve elektrode, menja se polarizacija elektroda i prva elektroda je pozitivna a druga negativna. Sada se proces ponavlja, jon ubrzava do druge elektrode, uleće u nju, kreće se po inerciji, i opet, kad jon napusti drugu elektrodu, polarizacija se ponovo menja. Sada je prva elektroda opet nanelektrisana negativno, druga pozitivno, treća negativno itd. Čestica nastavlja da ubrzava ka četvrtoj elektrodi i proces se ponavlja. Frekvencija napona se podešava tako da se ova promena polarizacije tačno poklopi sa izlaskom čestice iz elektroda, a dužina elektroda i razmak između susednih elektroda ravnomerno se povećava od prve elektrode pa nadalje. Brzina (tj. energija) koju će čestica imati na izlasku iz akceleratora najviše zavisi od dužine samog akceleratora – što je akcelerator duži, energija je veća. U ovom akceleratoru čestice se mogu ubrzati i do relativističkih brzina pa se, prilikom njihove konstrukcije, u obzir moraju uzeti i relativistički efekti porasta mase, kontrakcije dužine i dilatacije vremena. Najpoznatiji linearni akcelerator je SLAC, na univerzitetu Stenford. Ovaj akcelerator je dugačak 3,2 km a u njemu se postiže energija 20Gev.

Linearni akceleratori su dugo igrali glavnu ulogu u fizici čestica a onda su počeli da ih zamjenjuju kružni akceleratori.

Danas se radi na razvoju kružnih akceleratora koji pružaju fizičarima najveće mogućnosti istraživanja zbog postizanja iznimno velikih brzina i energija čestica.

Ipak, linearni akceleratori nisu zaboravljeni i poslednjih nekoliko godina ponovo postaju aktuelni. Trenutno je u planu izgradnja najsnažnijeg linearног akceleratora, TESLA, koji će verovatno biti dugačak oko 30 km. Najveći nedostatak linearног akceleratora je potreba za velikim dimenzijama, ali njihova ogromna prednost je to što je gubitak energije vrlo mali. Fizičari su stalno primorani da nalaze neki kompromis između ova dva problema.

Prvi tip kružnog akceleratora je ciklotron. Ovaj akcelerator ubrzava elektrone, protone i lake jone do energija pri kojima se relativistički efekti mogu zanemariti. Prvi ciklotron je konstruisao Lawrence 1932. godine. U početku, ciklotron je bio mali laboratorijski uređaj a tek kasnije je dostigao ogromne dimanzije. Ovaj tip akceleratora satoji se od kružne metalne kutije presećene na polovini. Kutije (duanti) se postavljaju u magnetno polje i priključuju na visoko frekventni napon. Princip rada ciklotrona je vrlo jednostavan. Čestica koja se ubrzava kreće iz centra ciklotrona i počinje da kruži. Kad se nađe između duanata, koji su različito nanelektrisani, na nju deluje električno polje i ubrzava je.

Ubrzana čestica uleće u šuplji duant u kome magnetno polje savija njenu putanju. Čestica se po polukružnoj putanji kreće i izlazi na drugi kraj polukruga. Dok je putovala po ovom polukrugu polaritet duanata je promenjen i električno polje između njih opet ubrzava česticu i ceo proces se ponavlja. Ubrzavajući, čestica se kreće po spiralnoj putanji. U jednom trenutku poluprečnik putanje postaje veći od poluprečnika duanata i ona napušta akcelerator. Na mestu gde čestice napuštaju akcelerator postavlja se željena meta. Ciklotron može da ubrza čestice do oko 10 Mev-a.

Malim modifikacijama ciklotrona dobijen je akcelerator koji je poznat kao sinhrociklotron (fazotron). Sinhrociklotron omogućava ubrzanje čestica do relativističkih energija. Za razliku od sinhrotrona, gde je frekvencija kojom se menja polaritet duanata uvek ista, kod fazotrona ova frekvencija se sporo menja tokom ubrzanja, tako da frekvencija polja odgovara frekvenci obrtanja čestice, koja se smanjuje zbog relativističkih efekata.

Sledeći tip kružnih akceleratora je betatron. Za ubrzanje elektrona ovaj akcelerator koristi vrtložno električno polje koje se indukuje promenljivim magnetnim poljem. Za razliku od ciklotrona gde su se čestice kretale po spiralnoj putanji, kod betatrona elektroni opisuju kružne putanje stavnog poluprečnika. Konstrukcija betatrona je kombinacija elektromagneta i vakuumskih cevi u obliku torusa. Ovaj torus nalazi se između polova jakog elektromagneta.

Promena jačine struje u namotajima elektromagneta dovodi do promene magnetnog polja, a promenljivo magnetno polje indukuje električno polje. Linije sile ovog polja imaju oblik kružnice a pravac jačine polja je tangenta na putanju elektrona. Stalna orbita po kojoj se kreću elektroni omogućava veliki broj rotacija elektrona, a pri svakoj rotaciji elektron dobija sve veću i veću energiju. Betatron može da ubrza elektrone do energija između 1 MeV i 50 MeV.

Najveći nedostatak betatrona su problemi koji nastaju prilikom izvođenja ubrzanih elektrona iz akceleratora.

Sinhrotron je možda jedan od najznačajnijih tipova akceleratora. Ovo je kružni akcelerator sa česticama čije orbite imaju približno konstantan radijus, pri čemu se frekvenca električnog polja kojim se elektroni ubrzavaju ne menja, ali se menja intenzitet magnetnog polja koje održava stabilnost orbite.

Ovaj tip akceleratora ima vrlo složenu konstrukciju i predstavlja verovatno jedan od najsloženijih uređaja na našoj planeti. Jedan od najvećih problema koji otežava konstrukciju sinhrotona je tzv. sinhrotronsko zračenje.

Sve nanelektrisane čestice koje se kreću ubrzano, po krivoj putanji, emituju elektromagnetno zračenje i gube energiju. Energija koja se emituje na ovaj način raste sa porastom brzine čestice i otežava ubrzavanje čestice. Za fiziku čestica ovo predstavlja nepremostiv problem koji je poslednjih godina naučnike naterao da opet razmišljaju o konstrukciji linearnih akceleratora ogromnih dimenzija. Sinhrotrono zračenje je veliki problem za fiziku čestica ali istovremeno je i vrlo moćan alat u nekim drugim oblastima nauke kao što su medicina, biologija, fizika materijala itd. U ovim oblastima nauke teži se ka dobijanju što intenzivnijeg sinhrotronskog zračenja, a pomoću takvog "mikroskopa" moguće je posmatrati i analizirati čak i pojedinačne molekule. Iz ovog razloga mnogi stari sinhrotroni, koji su postali slabi za istraživanja elementarnih čestica, modifikovani su da emituju još više sinhrotronskog zračenja i sada se koriste za istraživanja u drugim oblastima.

Posebna vrsta sinhrotrona su takozvani sudarači čestica ili kolajderi. Kolajderi su akceleratori u kojima se dve vrste čestica istovremeno ubrzavaju i međusobno sudaraju. Na ovaj način ostvaruju se mnogo intenzivniji sudari nego oni kada je meta nepokretna. Verovatno najpoznatiji i najjači kolajder nalazi se u Ženevi u CERN-u, a drugi poznati su Fermilab u USA, DESY u Nemačkoj, itd.

U poslednjih nekoliko godina akceleratori su postali vrlo moćne mašine. Uspeli su da preseku atom na sitnije delove nego što je iko mogao i da zamisli pre nekoliko decenija. A istraživanja se nastavljaju dalje. Sledeće godine treba da počne sa radom najbolji akcelerator koji je ikada sagrađen. To je LHC u Ženevi. Eksperimenti koji su izvršeni na akceleratorima omogućili su nastanak i potvrdu tzv. standardnog modela elementarnih čestica. Standardni model opisuje upravo ono za čime su ljudi godinama tragali, opisuje najjednostavnije gradivne jedinice od kojih je izgrađen svet oko nas. Ali logično je zapitati se da li je to stvarno kraj. To još uvek niko ne zna, fizika čestica nastavlja da se razvija, postoji još mnogo pitanja za koja su odgovori još uvek sakriveni, a dalja istraživanja doveće sigurno i do novih pitanja i novih problema. Ali, sve to je neka druga priča, o standardnom modelu i onome što dolazi posle toga, nekom drugom prilikom.

3. PODELA AKCELERATORA

Akceleratori služe za ubrzavanje nanelektrisanih čestica. Kada čestice dostignu potrebnu energiju, one se izbacuju iz akceleratora u vidu snopa i usmeravaju na metu u kojoj u sudarima sa jezgrima mete stvaraju nove čestice. Pomoću specijalnih magneta čestice koje izleću iz mete, fokusiraju se u sekundarne snopove i usmeravaju u eksperimentalne hale gde se nalaze detektori koji detektuju čestice, njhove interakcije i raspade.

Akceleratori se dele na :

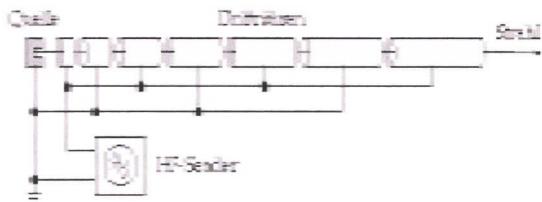
- akceleratore sa kontinualnom strujom**
- pulsirajuće (radiofrekventne) akceleratore**

Radiofrekventni se dele na :

- linearne akceleratore** – u njima se, pomoću naizmeničnog napona, čestice ubrzavaju po linearnim putanjama.
- orbitalne akceleratore** – u njima se čestice ubrzavaju po kružnim putanjama ili putanjama bliskim kružnici. Ovde spadaju: ciklotron, sinhrociklotron, izohroni ciklotron, proton sinhrotron, betatron, kolajderi i dr.

4. LINEARNI AKCELERATORI

Kod lineranog akceleratora nanelektrisane čestice se kreću duž vakuumskih cevi pod dejstvom električnog polja koje, ili prati čestice u vidu progresivnog talasa, ili se javlja u pravilnim razmacima sa tačno određenim faznim odnosima, u nizu međuelektrodnih otvora. Na taj način se postižu velike brzine bez primene odgovarajućih visokih napona, te se ne javljaju ni ozbiljniji problemi izolacije. Od dva tipa konstrukcije takvih akceleratora, naročito je pogodan za elektrone akcelerator sa progresivnim talasom, koji radi u frekventnom opsegu od 3000 MHz, dok se za nerelativističke čestice, kao što su protoni i teški joni, koristi niz pogurnih cevi izdvojenih međuprostorima, pri čemu ceo sistem radi na nižoj frekvenciji. Svi linearni akceleratori imaju prednost u odnosu na orbitalne akceleratore što daju lako pristupačne spoljne snopove. Njihova nezgodna strana je što njihova ubrzavajuća polja takođe defokusiraju snop, tako da su potrebne dopunske specijalne mere da bi se snop jona koncentrisao u nerelativističkoj granici brzine.

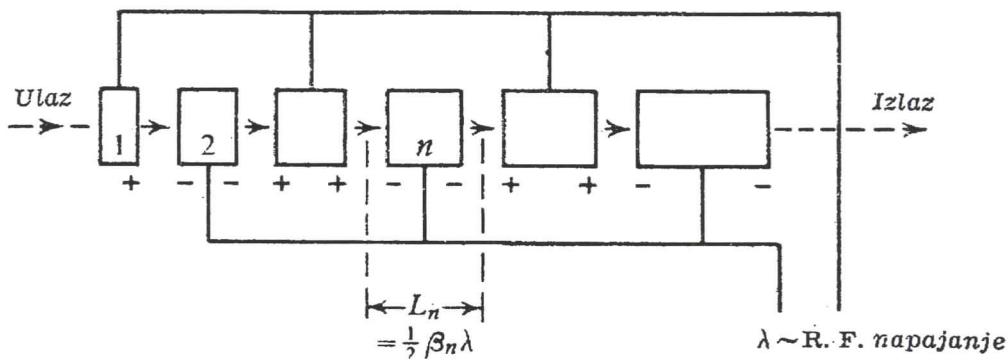


Sl.2. Linearni akceleratori

Prvi akceleratori ovog tipa bili su akceleratori sa pogurnim cevima.

4.1. Akceleratori sa pogurnim cevima

Prvi akceleratori (Wideroe 1928., Sloan i Lawrence 1931., Beams i Snoddy 1934.) bili su ovog tipa. Princip rada je prikazan na slici:



Sl.3. Princip rada Sloan – Lawrenceovog linearnog akceleratora

Kod Sloan–Lawrenceovog akceleratora, koji je radio približno na frekvenciji od 30 MHz, veći broj pogurnih cevi (bez unutrašnjeg polja), dužina L₁, L₂,L_n , izdvojenih malim ubrzavajućim međuprostorima, spojeni su naizmenično na izlazne krajeve oscilatora talasne dužine λ .

Dužina pogurnih cevi je tako izabrana da polje u međuprostoru upravo menja fazu u trenutku kada čestica prolazi od jednog međuprostora do drugog. Ako je napon duž svakog međuprostora u trenutku prolaza čestica V, tada je energija čestice na ulazu u n-tu pogurnu cev n eV (uz početnu energiju eV), a brzina čestice iznosi :

$$v_n = \sqrt{\frac{2 neV}{M}}$$

(1)

gde je M masa čestice koja se ubrzava. Frekvencija oscilatora je c/ λ , tako da za vreme leta u trajanju pola ciklusa, dužina n-te pogurne cevi mora da iznosi:

$$L_n = \frac{1}{2} v_n \frac{\lambda}{c} = \frac{1}{2} \beta_n \lambda$$

(2)

Za nerelativističke energije iz jednačina 1. i 2. sledi da je :

$$L_n \propto \sqrt{n}$$

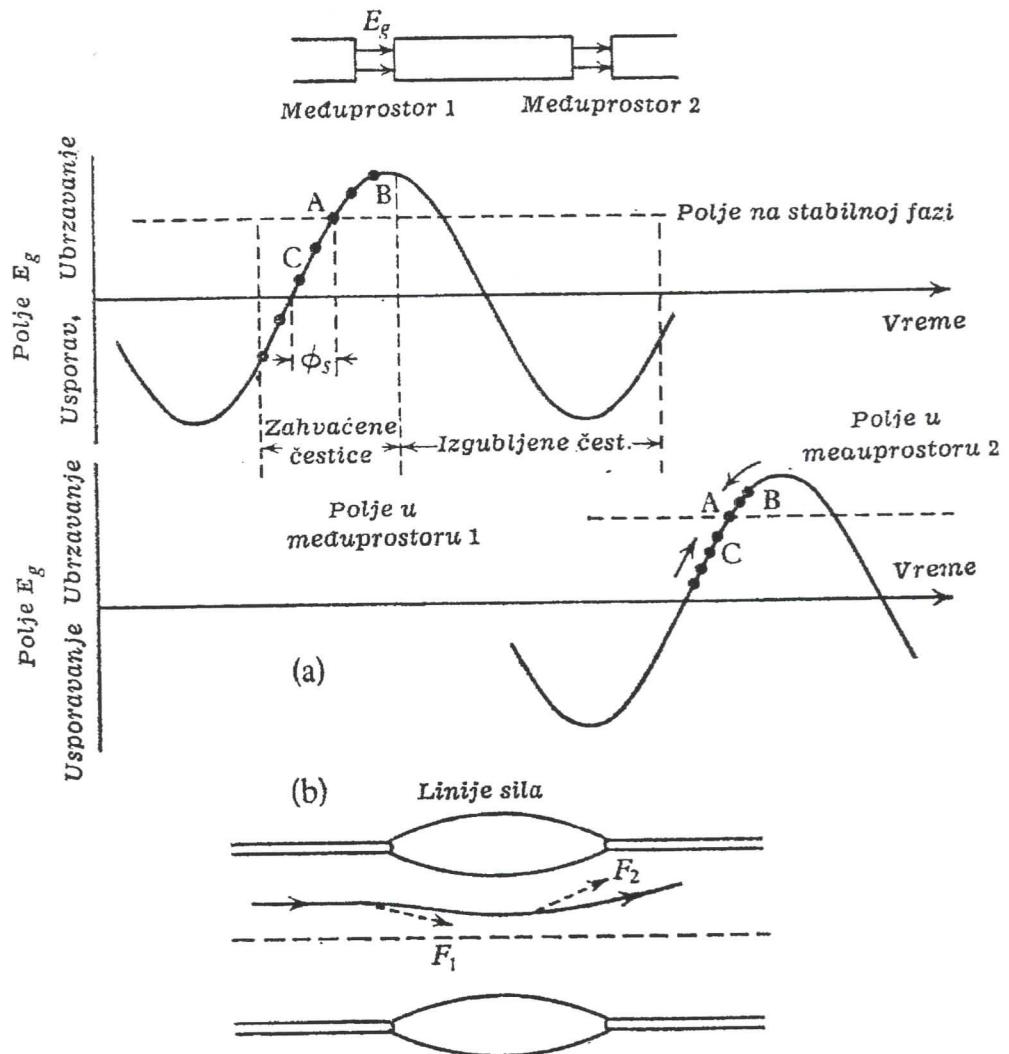
(3)

Iz jednačine 2. proizilazi da je dužina linearног akceleratora, za određenu izlaznu energiju, određena talasnom dužinom λ i naponom u međuprostoru V . Ako je povećanje energije u svakom međuprostoru konstantno, dužina akceleratora je direktno proporcionalna sa talasnom dužinom. Čestice izlaze u grupama koje odgovaraju maksimalnom polju u međuprostorima. Rezonancu je moguće postići samo kada polja imaju vrlo približno tu vrednost.

Kod metode ekscitacije koju su koristili Beams i Sonddy, pogurne cevi su spojene na odgovarajuće tačke opterećene transmisione linije od dvostrukе žice. Naponski impuls putuje istom brzinom kao i čestice, tako da su impulsi i čestice sinhrono stizale u sukcesivne akceleratorske međuprostore. Veličina akceleratorske strukture je određena jednačinom 2.

Važno je bilo otkriće da akcelerator ne treba da se konstruiše za tačno određenu rezonancu između maksimalno ubrzavajućeg polja i čestica, jer se kretanje može podešiti da bude fazno stabilno.

Taj pronalazak je doveo do konstrukcije elektronsinhrotrona, sinhrociklotrona i linearног akceleratora u Berkeleyu u SAD. Primena principa fazne stabilnosti na linearni akcelerator je prikazana na slici na kojoj su date amplitudе električnog polja duž dva sukcesivna međuprostora u funkciji vremena.



Sl.4. a) Fazna stabilnost u akceleratoru sa pogurnim cevima. Tačkice prikazuju uglove u odnosu na polje u međuprostoru za grupe čestica uniformne brzine koje stižu u međuprostor 1. U međuprostoru 2 javlja se povećano grupisanje oko stabilne faze Φ_s .

b) Radijalno defokusiranje čestica koje prolaze kroz cilindrični međuprostor u polju koje raste sa vremenom.



Struktura pogurnih cevi je tako podešena da čestica koja prolazi kroz međuprostor sa fazom Φ_s (tačka A) u odnosu na naizmenično polje , zadržava taj fazni ugao nepromjenjen, tako da se tom istom fazom dolazi u sledeći međuprostor. Čestice sa faznim uglovima većim od Φ_s (tačka B) dobijaju veće ubrzanje u međuprostoru, prolaze kroz pogurne cevi brže, tako da se kreću u sledećem međuprostoru prema tački A u fazi. Čestice čiji su fazni uglovi manji od Φ_s (tačke C) će biti manje ubrzavane tako da se kreću prema tački A takođe u fazi. Znači da čestice koje se nađu u tački A imaju stabilnu fazu. Ako se joni sa proizvijlnom fazom u odnosu na ubrzavajuće polje ubace u sistem pogurnih cevi, sve će čestice sa određenim opsegom faze biti zahvaćene i oscilovaće oko tačke sa stabilnom fazom. Ako se tačka sa stabilnom fazom pomakne prema maksimumu ubrzavajućeg polja, mogućnost oscilovanja oko tačke sa stabilnom fazom više ne postoji, tako da je zahvatanje čestice vrlo malo.

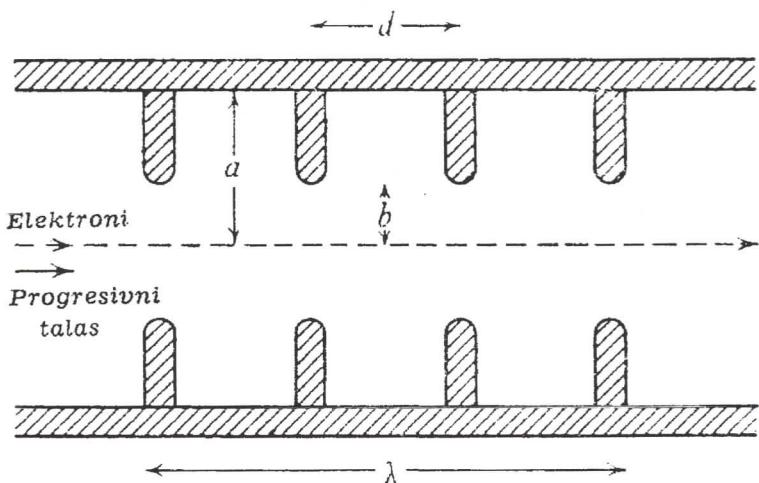
Takva poželjna karakteristika fazne stabilnosti dovodi do radijalne nestabilnosti, jer je tačka sa stabilnom fazom na izlaznom delu naponskog talasa. Ti odnosi su prikazani na slici, oblik linija sile je takav da na neaksijalnu česticu deluje fokusirajuća sila F_1 na ulazu u međuprostor, a defokusirajuća sila F_2 na izlazu. Pošto se ukupno polje povećava sa vremenom, u tački sa stabilnom fazom preovlađuje defokusirajuća sila. Kod akceleratora sa pogurnim cevima uspostavljena je ponovo radijalna stabilnost, bilo ubacivanjem rešetaka na ulazima pogurnih cevi zbog eliminisanja nepoželjnih krivina u linijama sila, ili kompenziranjem defokusiranja kvadrupolnim magnetima ubačenim u same cevi.

Linearni akceleratori se grade i za protone i za teže jone. Princip rada je sličan u oba slučaja.

4.2. Akceleratori sa talasovodima

Akceleratori sa talasovodima su vrlo pogodni za elektrone, jer te čestice imaju brzinu $0,98c$ već kod energije od 2MeV , što se lako dobija injektovanjem iz elektrostatičkog akceleratora.

Kod poznatih tipova talasovoda fazna brzina je uvek veća od brzine svetlosti, međutim ta brzina se može smanjiti opterećujući talasovod nizom dijafragmi, postavljajući 3-5 dijafragmi po 1 talasnoj dužini, slika 5.



S1.5. Kružni talasovod sa prstenastim dijafragmama. Dimenzije a i b se mogu tako izabrati da fazna brzina progresivnog talasa dobija vrednost brzine svetlosti ili nižu.

Elektroni se obično ubacuju tako da putuju u grupama u blizini, ali nešto ranije od maksimalnog polja progresivnog talasa, kao što je prikazano na slici 4.

Energija elektrona kontinualno raste (tj. povećava im se efektivna masa) zahvaljujući talasu, a ne diskretno samo u međuprostorima kao kod akceleratora sa pogurnim cevima. Ako je brzina elektrona manja od brzine svetlosti javlja se fazna stabilnost, tako da se sekcija talasovoda sa promenljivim dijafragmama može koristiti za ubrzavanje elektrona duž određenog opsega nerelativističkih brzina, pre nego što se isti uvedu u standardne sekcije talasovoda. Radijalno defokusiranje snopa elektrona koje prati aksijalnu stabilnost se može kompenzirati primenom malog aksijalnog magnetskog polja iz spoljnjeg solenoida. Kada se brzina čestice približava brzini c, nastaje defokusirajuća sila, tako da više nisu potrebna fokusirajuća polja. Takođe ne postoji određena aksijalna stabilnost, te je potrebna vrlo precizna mehanička konstrukcija talasovoda da bi se osiguralo da fazna brzina talasa ne odstupa mnogo od brzine c.

Akceleratori elektrona sa progresivnim talasom obično koriste impulsne magnetronske ili klistronske pojačavače talasnih dužina od oko 10 cm.

5. ORBITALNI AKCELERATORI

Čestice se u orbitalnim akceleratorima ubrzavaju po kružnim putanjama ili putanjama bliskim kružnici. Ovde se ubrajaju: standardni ciklotron, sinhrociklotron, izohroni ciklotron, proton sinhrotron, betatron i kolajderi.

E. O. Lorens sa Kalifornijskog univerziteta, došao je na ideju da se pozitivno nanelektrisane čestice kreću u magnetnom polju po kružnoj putanji u vidu spirale sa sve većim poluprečnikom, tako da bi dužina putanje automatski rasla sa povećanjem brzine čestica koje se ubrzavaju.

5.1. Standardni ciklotron

E. O. Lorens i M. S. Livingston konstruisali su prvi eksperimentalni ciklotron 1931. godine u Berkliju, Kalifornija. U ovom ciklotronu ubrzavali su se protoni (ioni vodonika) čija je energija dostizala do svega 80 KeV.

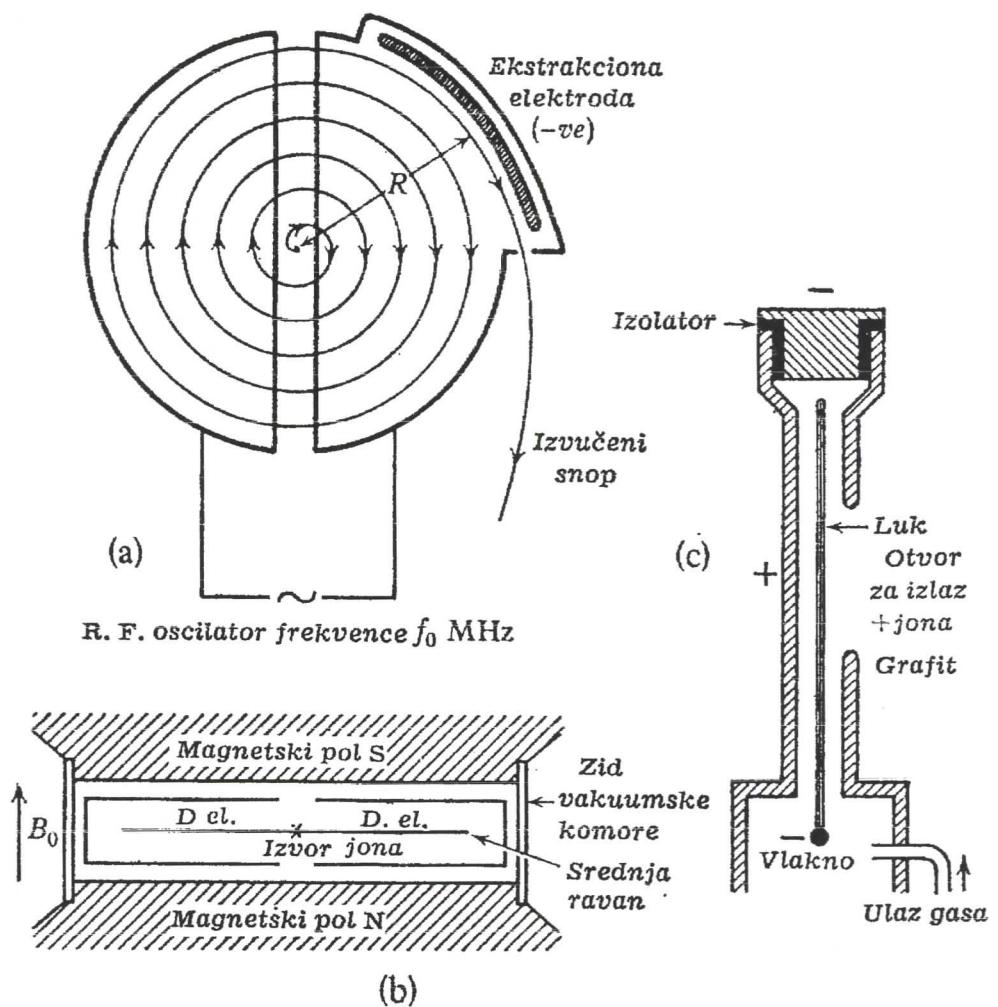
Ciklotron je vrsta akceleratora čestica. Ciklotroni ubrzavaju nanelektrisane čestice pomoću visokofrekventnog naizmeničnog napona. Magnetno polje pod pravim uglom uzrokuje da se čestice kreću gotovo kružnom putanjom, tako da više puta prolaze kroz ubrzavajući napon.

Rad ciklotrona polazi od principa magnetne rezonance, koji je osnovni princip kod većine današnjih orbitalnih akceleratora. Dve elektrode u obliku slova D smeštene su u vakuumsku komoru uz vrlo uzan međuprostor između njihovih suprotnih ivica. Elektrode se nalaze između dva pola velikog magneta koji se nalaze na malom rastojanju od njih, čime se postiže veća jačina homogenog magnetnog polja između elektroda.

Elektrode su oblika šupljeg, tankog, valjka, koji je "prerezan" na pola duž prečnika osnove i zatim su ove dve polovine razdvojene tako da se između njih nalazi uzak prorez.

Elektrode se pobuđuju iz oscilatornog kola na ciklotronskoj frekvenciji, tako da se u međuprostoru između elektroda javlja naizmenično električno polje sa tom frekvencijom.

Magnetno polje se stavlja normalno na ravan D-elektroda, dok je u centralnom delu međuprostora smešten izvor jona. Pozitivni jon male brzine, koji izlazi iz izvora, ubrzavan je prema negativnoj elektrodi i ulazi u deo bez polja unutar elektrode u kojem opisuje kružni luk.



- Sl. 6. a) Putanja jona u ciklotronu sa određenom frekvencijom od centralnog jonskog izvora do izvučenog snopa.
 b) Vertikalni presek na kojem se vide D-elektrode i zidovi vakuumske komore u kojoj su smeštene elektrode.
 c) Konstrukcija jonskog izvora. Luk je ograničen na vertikalni pravac glavnim magnetskim poljem.

Putanja vodi ion nazad u D međuprostor, gde dobija novo ubrzanje usled sinhronizma između primjenjenog napona i orbitalne frekvencije.

Na elektrode se dovodi električni napon koji proizvodi električno polje samo u prorezu između elektroda, dok je električno polje unutar elektroda, kao i unutar svih "šupljih" provodnika jednako nuli. Reč je o poznatoj osobini električnog polja koja se u drugim slučajevima koristi, na primer, i za zaštitu od visokog napona efektom tzv. "Faradejevog kaveza". U ovom slučaju, međutim, opisanom konstrukcijom elektroda postiže se da se nanelektrisane čestice ubrzavaju samo za vreme prolaska kroz prorez između elektroda, a pri kretanju unutar šupljina dve elektrode njihova brzina i kinetička energija su konstantne, jer je tu, kao što je rečeno, električno polje jednako nuli.

Takođe i homogeno magnetno polje u šupljini, čiji su izvor polovi magneta primaknutog uz osnove elektroda, ne može da promeni brzinu nanelektrisanih čestica. Magnetno polje ima ovde ulogu da konstantno menja samo pravac i smer kretanja čestica, odnosno savija njihovu putanju, tako da čestice, nakon što naprave polukružnu putanju unutar svake od elektroda mogu da prođu kroz prorez između njih i ubrzaju se u električnom polju koje je tu prisutno. Pošto nanelektrisane čestice, zbog kružnog oblika putanja, menjaju smer prolaska kroz prorez, potrebno je naizmenično menjati i smer električnog polja u prorezu, jer bi se inače za dva uzastopna prolaska čestica jednom ubrzala, a zatim usporila za isti iznos. Ovo se postiže naizmeničnom promenom polariteta napona na elektrodama, sa frekvencijom koja je prilagođena ugaonoj učestanosti prolaska čestica kroz prorez, odnosno ugaonoj brzini njihovog kružnog kretanja.

Centripetalnu silu proizvodi magnetno polje B , a jačina magnetne sile koja deluje na česticu pri kretanju u magnetnom polju je jednaka Bqv .

Prema tome:

(4)

$$\frac{mv^2}{r} = Bqv$$

gde je m masa čestice, q je nanelektrisanje, v je brzina, a r je poluprečnik putanje.

(5)

$$\frac{v}{r} = \frac{Bq}{m}$$

v/r je jednako ugaonoj brzini ω , pa je:

(6)

$$\omega = \frac{Bq}{m}$$

i frekvencija

(7)

$$v = \frac{\omega}{2\pi}$$

Prema tome:

(8)

$$v = \frac{Bq}{2m\pi}$$

Ovo pokazuje kako za česticu konstantne mase, pri kretanju u pravcu poprečnom na pravac homogenog magnetnog polja, frekvencija kružnog kretanja ne zavisi od poluprečnika orbite čestice, nego samo od njene mase i količine nanelektrisanja, kao i od jačine magnetnog polja. Ovo je značajno, jer je putanja spiralna i poluprečnik putanje se povećava za svaki sledeći obilazak. Međutim, frekvencija se ipak ne smanjuje pošto se čestica pri prolasku kroz prorez između elektroda ubrzava, tako da veću razdaljinu prelazi i većom brzinom, odnosno za isto vreme. Kada čestice po svojim brzinama prilaze brzini svetlosti, zbog relativističke zavisnosti mase od brzine, dobijaju i veću masu, pa je potrebna modifikacija frekvencije ili magnetnog polja tokom akceleracije. Ovo se postiže u sinhronciklotronu.

Relativistička frekvencija ciklotrona je:
(9)

$$v = v_c \frac{m_0}{m_0 + \frac{T}{c^2}}$$

gde je v_c klasična frekvencija nanelektrisane čestice date u izrazu sa kinetičkom energijom T i masom mirovanja m_0 , a c je brzina svetlosti.

Masa mirovanja elektrona je 511 keV, pa je korekcija frekvencije 1 % za magnetnu vakuumsku cev sa 5,11kV jednosmernim naponom. Masa protona je skoro dve hiljade puta veća od mase elektrona, pa 1% korekcije energije iznosi 9 meV, što je dovoljno da izazove nuklearne reakcije.

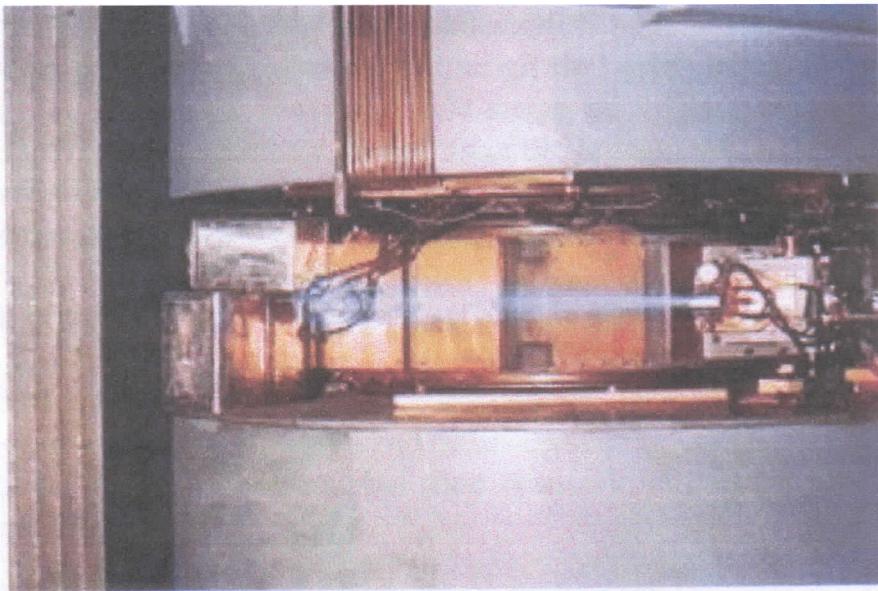
Princip rada ciklotrona je veoma jednostavan. Magnetno polje, koje je poprečno na pravac kretanja nanelektrisanih čestica, "teraih" ih da se kreću po kružnim putanjama sve većeg prečnika i tako se veliki broj puta ubrzavaju u prorezu između elektroda pod uticajem uzdužnog električnog polja. Ovaj princip predstavlja je značajan napredak u odnosu na dotadašnje linearne akceleratore, koji su za isto ubrzanje zahtevali veći broj elektroda, veće napone i zauzimali više prostora.

Još je bitno napomenuti da se unutar ciklotrona nalazi vakuum kako se nanelektrisane čestice pri svom ubrzavanju ne bi nepotrebno sudarale sa molekulima vazduha i tako gubile brzinu.

Nekoliko decenija, ciklotroni su bili najbolji izvor visokoenergetskih zraka za eksperimente u nuklearnoj fizici. Nekoliko ciklotrona se i danas koristi za ovu vrstu istraživanja.

Ciklotroni se mogu koristiti i u medicini. Poznato je u radiobiologiji da ionizacioni zraci deluju na biološke sisteme preko fenomena jonizacije materijalnog medijuma kroz koji prolaze ovi zraci. Ako jedan zrak poseduje veću specifičnu jonizaciju, to jest, stvara veći broj jonskih parova na jedinici putja, onda će njegovo dejstvo na biološki sistem (npr. DNK) biti efikasnije.

Ciklotronski zraci se mogu koristiti za bombardovanje atoma kako bi se stvorili kratkotrajni izotopi koji emituju pozitrone, pogodni za PET slikanje.



60-inčni ciklotron, oko 1939. godine. Vidi se zrak ubrzanih jona (verovatno protona ili deuterona) koji izlaze iz akceleratora i ionizuju okolni vazduh uzrokujući plavi sjaj.

Sl.7.

Ako se na put helionima dobijenim u ciklotronu, postavi berilijum kao meta, dolazi do produkcije neutrona čiji snopovi se mogu koristiti i u radioterapiji. Dakle, ciklotron može poslužiti za dobijanje visokoenergetskih elektroneutralnih čestica – neutrona.

Ciklotron je doneo napredak u odnosu na linearni akcelerator. Linearni akcelerator ubrzava čestice na pravoj liniji. Niz cilindričnih elektroda u cevima skače iz pozitivnog u negativni napon. 1920-tih nije bilo moguće dobiti visokofrekventne radio talase visoke snage, pa su stepeni akceleracije morali da budu na većoj udaljenosti, kako bi se prilagodili nižim frekvencijama, ili je moralno da se koristi više faza akceleracije kako bi se nadomestila manja snaga u svakom stupnju.

Za brže čestice su potrebni duži akceleratori nego što su naučnici mogli da priušte. Kasniji linearni akceleratori su mogli da koriste klistrone visoke snage i druge naprave koje predaju mnogo više snage na višim frekvencijama, ali pre nego što su ove naprave nastale, ciklotron je bio jeftiniji.

Ciklotroni ubrzavaju čestice u cikličnoj putanji. Stoga manji akcelerator može da ima mnogo veću dužinu putanje sa više stupnjeva ubrzanja čestica.

Prednosti ciklotrona:

Ciklotron ima samo jedan par elektroda za ubrzavanje, što štedi ujedno i novac i potrebnu električnu snagu za istu efikasnost.

Ciklotron proizvodi kontinualan snop čestica koje udaraju u "metu", tako da je prosečna snaga relativno velika.

Kompaktnost uređaja smanjuje i druge troškove, kao što su zaštita od elektromagnetskog zračenja ili postavljanje temelja i izgradnje zgrade u kojoj bi akcelerator trebalo da bude smešten.

Ograničenja ciklotrona:

Spiralna putanja zraka ciklotronskih čestica može da sinhronizuje sa konstantnom frekvencijom promene izvora napona na elektrodama, jedino kada se čestice potčinjavaju Njutnovim zakonima kretanja. Jer, kada se čestice ubrzaju do toliko velike brzine da postanu značajni efekti Ajnštajbove specijalne relativnosti, zrak čestica počinje da gubi fazu sa konstantnom frekvencijom promene električnog polja, tako da ne može da dobija dodatno ubrzanje prilikom prolaska kroz procep između elektroda. Ciklotron je zbog toga sposoban da ubrzava čestice samo do brzine koja iznosi nekoliko procenata od brzine svetlosti.

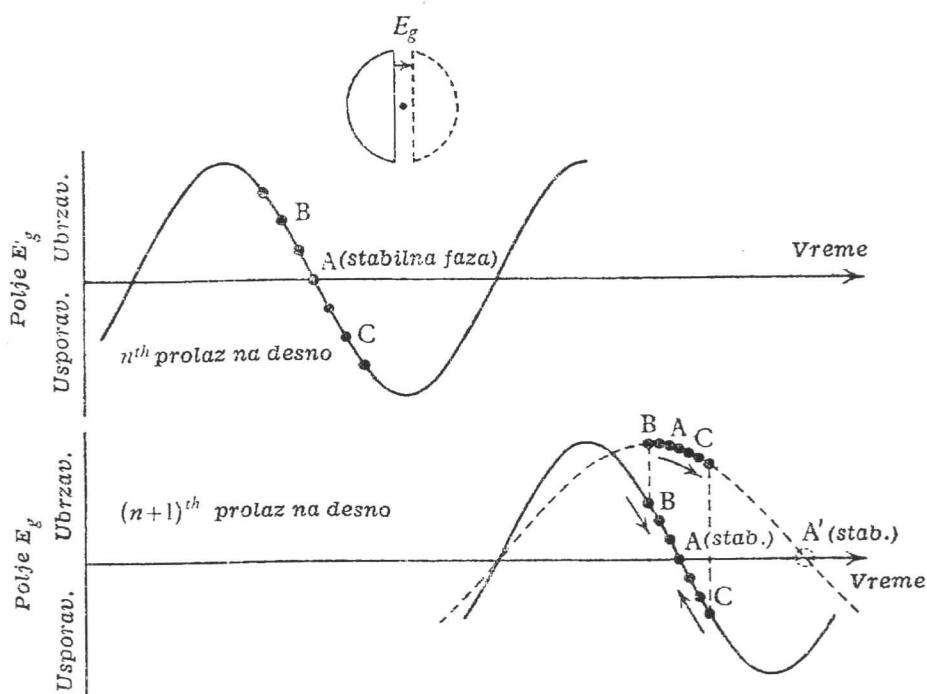
Za dobijanje snopova čestica još većih brzina upotrebljavaju se akceleratori pod nazivom sinhrociklotron, ili još kompleksniji sinhrotron, kao i neki od savremenih linearnih akceleratora.

Pošto rotacija nanelektrisanih čestica u komori ciklotrona dostiže velike brzine, dolazi do priraštaja mase tih čestica zbog čega stižu u procep između duanata, gde primaju impulse za ubrzavanje sa manjim ili većim zakašnjnjem. Rešenje problema je nađeno na taj način što je rotacija nanelektrisanih čestica automatski sinhronizovana sa promenom frekvencije potencijala koji vrši ubrzavanje istih. Generator je nazvan sinhrotron ili sinhrociklotron.

5.2. Sinhrociklotron

Granica u energiji koja se može postići sa ciklotronom sa određenom frekvencijom, a koja je uslovljena relativističkim povećanjem mase, je uklonjena kod sinhrociklotrona uvođenjem frekventne modulacije. U praksi je to moguće samo zbog postojanja fazno stabilnih putanja.

Posmatrajmo grupu jona koja prolazi kroz međuprostor između D – elektroda u ciklotronu, slika 8., sa tačno rezonantnom brzinom, ali sa opsegom faznih uglova u odnosu na radiofrekventni napon.



Slika 8. Fazna stabilnost kod sinhrociklotrona. Tačke prikazuju fazne uglove grupe čestica uniformne (rezonantne) brzine u odnosu na polje u međuprostoru za određeni trenutak prolaza kroz taj međuprostor. Kod drugog prolaza javlja se dopunsko grupisanje prema fazi nultog polja, ako je radiofrekvenca konstantna. Ako radiofrekvenca opada (isprekidana kriva), grupa se nalazi u ubrzavajućem polju.

Rezonantni joni (A) koji prolaze kroz međuprostor u trenutku nultog polja, kruže neograničeno dugo sa tom fazom. Ako je indeks polja n manji od 1, radikalne i vertikalne oscilacije su stabilne tako da je putanja u ravnoteži. Joni označeni na slici sa B, koji prolaze međuprostor ranije od jona A, će biti ubrzani tako da po jednačini:

$$B = \frac{2 \pi M}{e} f_0 = \frac{B_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = B_0 \frac{E}{M_0 c^2} \quad (10)$$

njihova frekvencija opada i kod sledećeg prolaza kroz međuprostor, oni kasne i kreću se prema A u fazi. Na sličan način joni koji prolaze kroz međuprostor kasnije od jona A, usporavaju se i po jednačini (10) zahtevaju povećanu frekvenciju obrtanja, tako da se i oni kreću prema stabilnoj fazi A kod sledećeg prolaza. Može se pokazati da se tako uspostavljaju oscilacije sa stabilnom fazom koje pokrivaju veliki opseg faznih uglova oko tačke nultog polja A. Tačke stabilne faze na naponskom talasu nalaze se na strani na kojoj amplituda opada sa vremenom.

Kad je konstatovano da postoje fazno stabilne putanje u ravnoteži, postalo je jasno da se energija čestica može beskonačno povećavati smanjivanjem frekvencije D-napona. Isprekidana kriva u donjem delu na slici 6. pokazuje taj efekat. Na grupu čestica deluje sada ubrzavajuće polje i isprekidana kriva linija se pomera prema novom položaju stabilne faze A, u kojem ima veću energiju, što odgovara smanjenoj frekvenciji kruženja.

U praksi ciklus promene frekvencije se podešava tako da se čestice zadrže u sinhronoj ubrzavajućoj fazi i da se javlja konstantno povećanje energije. Takav postupak bi u principu bio moguć i bez fazne stabilnosti, ali bi sinhronizaciju bilo neobično teško postići.

Pojava fazne stabilnosti dovodi do važne posledice da čestice opisuju mnogo veći broj obrtaja u sinhrociklotronu nego u običnoj mašini. Zato je moguće koristiti niže D-napone i čak samo jednu D-elektrodu, te je potrošnja radiofrekventne snage osetno manja. Isto tako, mehanički prilaz mašini je znatno bolji.

Uspešan rad protonskog sinhrociklotrona je od ogromne važnosti za razvoj fizike visokih energija.

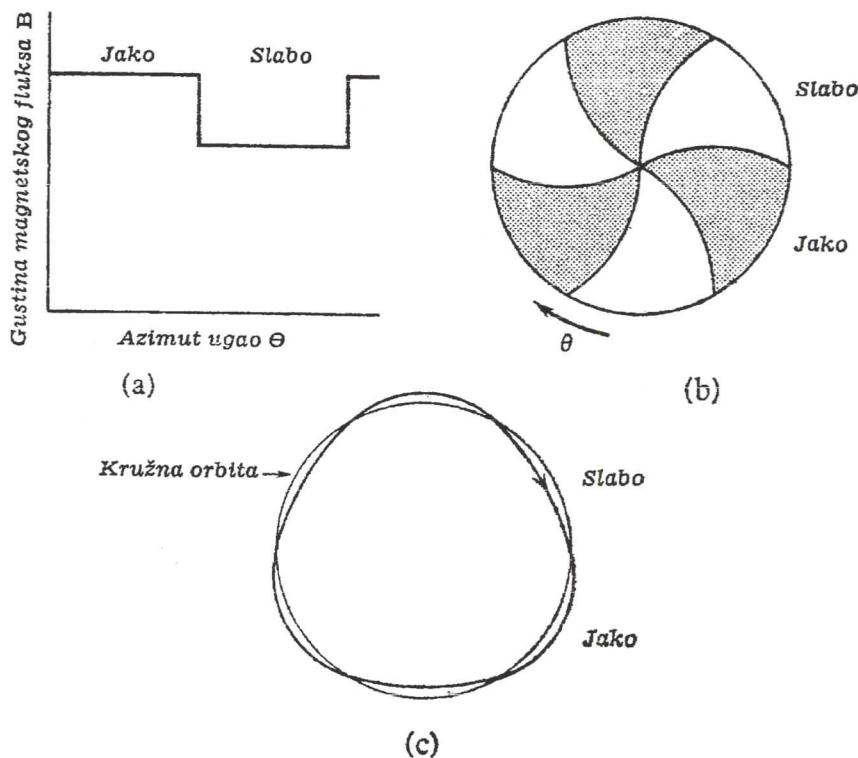
5.3. Izohroni ciklotron

Loše osobine sinhronciklotrona su mali intenzitet snopa u poređenju sa mašinom sa određenom frekvencijom, kao i složenost radiofrekventnog sistema. Da bi visoko energentski ciklotron radio na određenoj frekvenciji, kao izohrona mašina, potrebno je da srednje magnetsko polje raste sa poluprečnikom.

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 \left(1 + \frac{r^2 \omega^2}{2 c^2} \right)$$

Da bi se postiglo fokusiranje u ovim uslovima rada koristi se azimutalno promenljivo magnetsko polje kao što je predložio L. H. Thomans.

Kod takvog polja, poznatog i kao sektorsko fokusiranje, postoje naizmenične oblasti jakog i slabog polja. Na slici br. 9. je pokazan primer takvog polja.



Sl.9.Izohroni ciklotron:

- Idealizirana promena polja sa azimutom na određenom poluprečniku.
- Šema sektora magnetskog polja sa spiralnim vencem. Može se tako koristiti prosti radikalni venac.
- Zatvorena orbita kod azimutalne promene polja.

Promena polja u graničnim delovima izaziva azimutalne komponente, pri čemu nova $v \times B$ sila deluje aksijalno fokusirajuće kod oba tipa prelaznih oblasti. Ta nova fokusirajuća sila se može dovoljno pojačati, tako da kompenzuje defokusiranje izazvano radijalnim pojačanjem polja, koje je potrebno zbog održavanja izohronizma. Sektorsko fokusiranje se može poboljšati koristeći spiralnu granicu sektora umesto radijalne granice. Nekoliko takvih ciklotrona, energije reda 100MeV protona se nalaze u radu u raznim laboratorijama.

5.4. Elektron sinhrotron

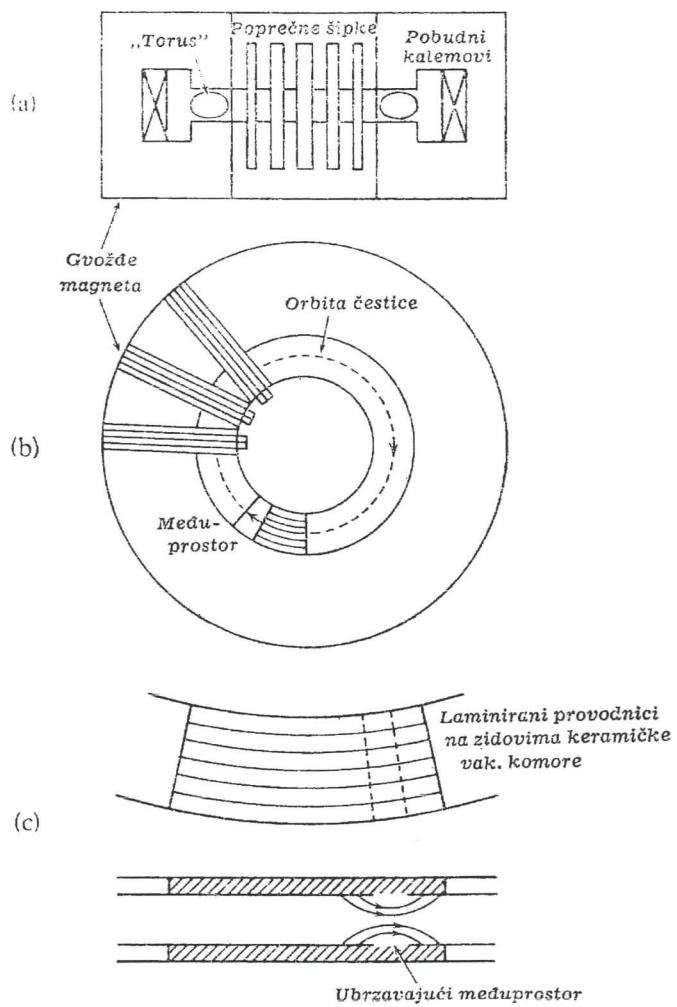
Na slici br. 10. je prikazan izgled elektron sinhrotrona. Magnetno polje je prstenasto i kod malih sinhrontrona to dovodi do konstrukcije oblika prikazanog na slici 10. u kojoj se magnetsko kolo nalazi, zbog problema prostora, izvan vakuumskе komore. Kod većih mašina takvo rešenje, koje je nezgodno zbog nepristupačnosti vakuumskе komore, je izbegnuto. Mašina radi sa naizmeničnim poljem na frekvenciji reda 100 Hz, što uslovljava izradu magneta od laminiranog gvožđa. Vakuumskа komora kod manjih sinhrotrona je torus od stakla ili keramike smešten u procepu magneta.

Elektroni su injektovani u sinhrotron iz elektronske puške koja je smeštena neposredno uz unutrašnji zid komore, a pod dejstvom napona od 50-100 kV. Neobično veliki deo tih elektrona je zahvaćen u orbiti u kojima se javlja ubrzavanje.

Magnetska induktanca čini deo oscilatornog kola zajedno sa kondenzatorskim blokom podešenim da daje potrebnu frekvenciju ponavljanja. Energija osciluje između induktivnog i kapacitativnog oblika i kolo za napajanje treba da nadoknadi samo omske gubitke. Frekvencija ubrzavajućeg napona je konstantna i akceleratorski rezonator je efektivno koaksijalna linija dužine četvrt talasa, kratko spojena na jednom kraju. Stvara se maksimalna naponska razlika na otvorenom kraju koji čini rezonatorski međuprostor. Rezonator je savijen u luk, čiji poluprečnik odgovara poluprečniku ravnotežne putanje. U slobodnom prostoru ugao bi zahvatio 90° , jer se elektroni kreću istom brzinom kao elektromagnetni talasi. Potreban opseg ugla rezonatora se može smanjiti ispunjavajući liniju sa dielektrikom, npr. zidove vakuumskе komore.

Glavna primena elektron sinhrotrona je kod eksperimenata fotodezintegracije. Za ovu namenu nije potrebno izvući elektronski snop izvan komore, te se omogućava da se poluprečnik snopa maksimalno poveća za vreme maksimalne vrednosti polja u magnetskom ciklusu i da udari u tešku metu, na kojoj nastaje zakočno zračenje.

Glavno ograničenje elektron sinhrotrona je ono koje je zajedničko i osnovno kod svih orbitalnih elektronskih akceleratora. Elektroni koji se kreću u kružnim putanjama poluprečnika R trpe radijalno ubrzavanje te moraju da zrače energiju.



Sl.10. a), b) Izgled elektronskog sinhrotrona. Sinhrotronska komora za ubrzavanje snopa.

U svetu postoji 42 sinhrotronska akceleratora, a zbog povećane potražnje, u planu je izgradnja još tridesetak. Snažne x-zrake koje emituje elektronski snop dok kruži u sinhrotronu, omogućavaju puno bolju osetljivost i razdvajanje od rendgenskih zraka, a danas su nezamenjivi pri ispitivanju malih objekata kao što su npr. virusi.

Osim u fizici i u hemiji, sve više se koriste u biologiji, medicini i industriji. U saradnji sa fizičarima akceleratori čestica grade se i upotrebljavaju u industriji za poboljšanje kvaliteta proizvoda, sterilizaciju medicinske opreme i hrane, te u kompjuterskoj industriji, automobilskoj i u avio industriji.

Jonskom implantacijom se jonima iz akceleratora usađuju joni jednog materijala u površinu drugog, čime površina postaje čvršća, otporna na koroziju ili ako se radi medicinskom umetku, prihvatljivija za organizam.

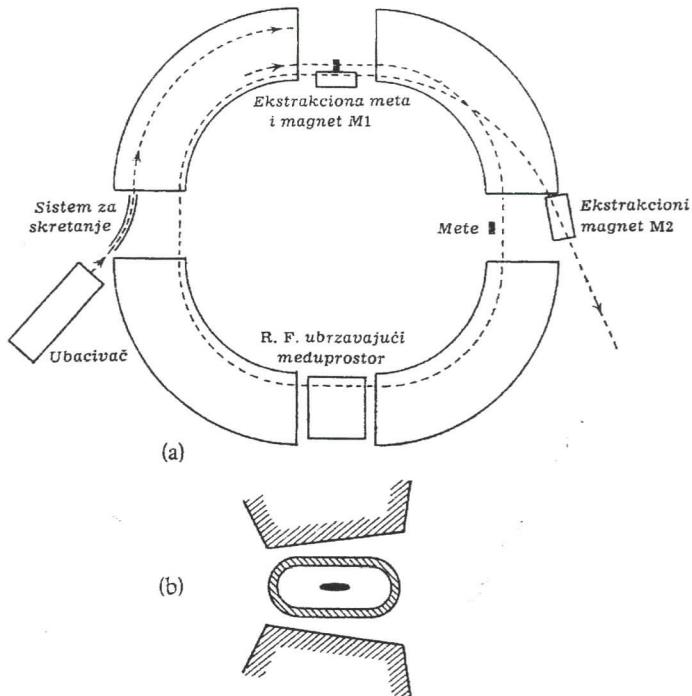
Alati i metode koje su timovi fizičara razvili da bi mogli razbijati atomsko jezgro i detektovati novonastale čestice, uvek su bili na samoj granici tehnoloških mogućnosti vremena. Tako je fizičarska radoznalost i entuzijazam, postavljujući stalno nove i nove zahteve, iznadrila mnoge alate koji se danas koriste kako u industriji tako i u medicinskoj dijagnostici i lečenju tumora.

5.5. Proton sinhrotron

Kod elektron sinhrotrona javlja se ubrzavanje usled rezonance između orbitalne frekvencije nanelektrisane čestice u rastućem magnetskom polju i radiofrekvencije ubrzavajućeg napona u orbitama određenog poluprečnika.

Taj princip se može primeniti za protone, pri čemu je sasvim dovoljan jedan prstenasti magnet, što dovodi do toga da je znatno ekonomičnija mašina od sinhrociklotrona iste konačne energije. Sve dok protoni ne dostignu relativističke brzine, orbitalna frekvencija je kod proton sinhrotrona zavisna od energije tako da treba menjati frekvenciju ubrzavanja.

Na slici br. 11. su prikazani glavni delovi proton sinhrotrona.



- Sl.11. a) Glavni delovi proton sinhrotrona. Ekstrakcionala meta ima specijalni dodatak na spoljašnjoj ivici.
 b) Poprečni presek magnetskog procepa kod sinhrotrona. U početnim stepenima ubrzanja snop ispunjava ceo poprečni presek vakuumske komore. Magnetsko polje opada sa povećanjem poluprečnika.

Prstenasti magnet je ili kontinualni prsten, ili, što je pogodnije, niz kvadrantata sa ubaćenim ravnim sekcijama. Poprečni presek magnetskog procepa je prikazan na slici 11. Polni nastavci su tako uobličeni da je indeks polja n reda 0-7, u kom slučaju su radijalne i vertikalne oscilacije stabilne. Magnet je napravljen od tankog laminiranog gvožđa da bi se smanjili induktivni gubici. Vakuumska prstenasta komora, napravljena od nerđajućeg čelika, porculana ili plastike, je smeštena u magnetskom procepu.

Magnet se napaja iz generatora jednosmerne struje, napona V . Kada se magnetsko kolo uključi, početni porast struje i gustine fluksa B u magnetskom procepu je dat jednačinom:

$$V = L \frac{di}{dt}$$

gde je L induktanca magneta. Struja prvo raste do pune vrednosti za oko 1 sec, a zatim opada, pri čemu se induktivna energija vraća iz magneta u generator, tako da potrošnja energije ide samo na omske gubitke. Ceo ciklus se ponavlja svakih 2-5 sec.

Za određeni poluprečnik, svaka vrednost polja odgovara određenoj energiji. Sinhrotron je tako konstruisan da, za usvojeni zakon promene magnetskog polja, energija čestice se povećava promenljivim radiofrekventnim električnim poljem duž putanje snopa koje prati promenu magnetskog polja. Čestice u tom slučaju ostaju u blizini iste orbite u toku celog perioda ubrzavanja.

Ubrzavanje je u principu fazno stabilno, mada stabilnost zavisi od tačnosti promene frekvencije. Grupa čestica se kreće u blizini ravnotežne putanje. Granice fazne stabilnosti određuju azimutalno rasipanje snopa, tako da se čestice kreću u toku kruženja sa jednog kraja grupe na drugi, u saglasnosti sa faznim oscilovanjem. Opseg faze se smanjuje od oko 180° na oko 90° , u toku ubrzavanja, pri čemu dolazi do prigušivanja i superponiranja slobodnih oscilacija, te se poprečni presek snopa smanjuje.

Snop se injektuje iz impulsnog elektrostatičkog generatora ili linearног akceleratora, pre nego što se uključi radiofrekventni napon, u trenutku porasta magnetnog polja. Ubacivanje snopa do ravnotežne putanje se izvodi kroz odgovarajući elektrodni sistem. Intenzitet zahvaćenog snopa u orbiti zavisi od smanjenja poluprečnika putanje u toku prvog obrtanja, jer to određuje deo snopa koji uspeva da izbegne sudar sa navedenom elektrodom za vođenje.

Ubacivanje se nastavlja sve dok prve putanje, koje se sakupljaju pri porastu magnetnog polja, ne stignu do centra vakuumskе komore, tako da dalje ubacivanje dovodi do gubitaka čestica usled udara o zidove. Tada se uključuje radiofrekventno polje i započinje proces ubrzavanja praćen faznim, radikalnim i vertikalnim oscilacijama. Slobodne oscilacije se uspostavljaju na bliskim energijama injektovanja, usled sudara sa prcostalim molekulima gase. Kao posledica toga, javlja se osetan gubitak čestica snopa koje udaraju o zid komore. Poželjno je zbog toga koristiti što je moguće veću vakuumsku komoru i što bolji vakuum. Povoljnije je predvideti izvlačenje meta izvan komore za vreme injektovanja, jer meta osetno smanjuje raspoloživi prostor u komori. Rasejanje na gasu je manje kritično pri većim energijama injektovanja, međutim tada je i smanjenje poluprečnika snopa manje, te se ne može pouzdano tvrditi da će se intenzitet snopa povećati sa povećanjem energije injektovanja.

6. VELIKI HADRONSKI SUDARAČ-LHC

Veliki hadronski supersudarač u CERN-u u kojem bi se svakih 25 ns trebali sudarati protonski snopovi kinetičke energije od fantastičnih 14 TeV trebao bi proraditi do 2007. godine.

Osim zahtevne konstrukcije supersudarača, istraživački timovi morali su konstruisati mnoštvo ekstremno brzih i osetljivih detektora različitih čestica smeštenih oko mesta sudaranja.

CERN (Evropska organizacija za nuklearna istraživanja, od 1953.godine) poseduje neke od najjačih i najvećih akceleratora današnjice pomoću kojih fizičari otkrivaju čoveku najsitnije poznate čestice i sile među njima, od kojih se sastoji materijalni svet.

CERN je evropska institucija koja je od svog utemeljenja omogućila izgradnju nekoliko važnih akceleratora. Među važnijim projektima ističu se : ISR proton-proton sudarač iz 1971. godine, SPS(super proton synchrotron) – 1981. i do danas najjači LEP (large elektron-positron collider) – LHC (large hadron collider).

LHC je instrument koji će biti pušten u rad krajem drugog milenijuma na samoj francusko-švajcarskoj granici, 5km severozapadno od Ženeve. Rad na dosadašnjim LEP uređajima otkrili su iznimno tačne podatke o subatomskim česticama (katonima i njihovim nakupinama hadronima), ali fizičari su pomoću tih istraživanja i preciznih kompjuterskih simulacija na temelju dobijenih informacija zapravo tek "otvorili vrata" daljim spoznajama. Do danas najjači LEP uređaj raspolaže energijom sudara čestica pozitrona i elektrona od 0,3 TeV, dok će LHC biti do 5 puta snažniji, a samim tim i najjači uređaj te vrste na svetu.

LHC je kružni akcelerator hadronskih čestica (koje se raspadaju na manje čestice tek prilikom super jakih sudara, a u prirodi nikad ne egzistiraju samostalno, uvek kao nakupina) prečnika 9 km čiji osnovni element-tunel sa vakuumskom cevi se nalazi kompletno ispod zemlje. Na podzemne instalacije veže se desetak nadzemnih instalacionih kompleksa.

Zbog manjih troškova, LHC dobrom delom koristi već postojeću infrastrukturu SPS-akceleratora. LHC je poseban i tehnički superioran instrument čiji su osnovni delovi ubrzavajući aparat, usmeravajući element, fokusirajući element, vakuum, i konstrukcija koja to sve objedinjuje i opslužuje. Za ubrzavanje čestica koristi se supravodljivost koja se ostvaruje u šupljem linearnom elementu napravljenom od niobiuma čiji zidovi su ispunjeni tečnim helijumom (-269 °C) uz delovanje ubrzavajućih elektromagnetskih talasa.

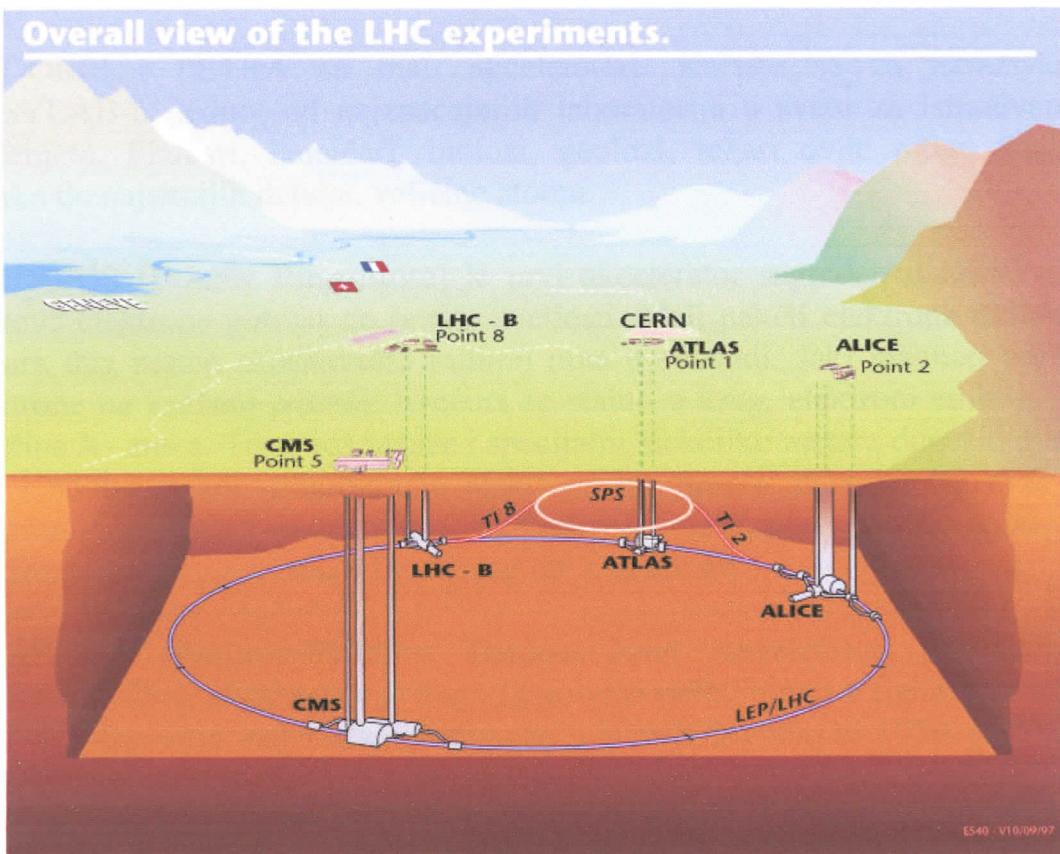
Element koji usmerava čestice i drži ih unutar predviđene kružne putanje je magnetno polje koje grade snažni dipolni magneti raspoređeni duž 63 km duge kružne vakuumske cevi.

Ovi magneti su u stanju u roku hiljadite sekunde pojačati intenzitet magnetnog polja, kako bi čestice koje se ubrzavaju svakim prolazom kroz niodiumsku akceleratorsku šupljinu i time dobiju veću energiju, ostale na "putanji" - u protivnom bi usmreene inercijom izazvale uništenje čitave instalacije, pa čak i kontaminaciju čitavog područja.

Drugi set kvadripolnih i sekstupolnih magneta ima funkciju da održi čestice u zbijenoj formaciji za sve vreme njihove rotacije. Kružna cev kroz koju putuju hadroni je u vakuumu kako se ne bi gubile čestice prilikom sudara sa molekulima vazduha, a to omogućuju vakuumske pumpe raspoređene po čitavoj dužini akceleratorskog tunela. Svi su ovi sofisticirani uređaji, zajedno sa sklopovima koji ih opslužuju, kontrolisani jednim od najsnažnijih kompjuterskih sastava ikad sastavljenih u Evropi, koji se složenošću i snagom može meriti čak sa američkim vojnim protivraktnim radarskim uređajima (npr. NORAD). Kod ovakvih, tehnički superiornih i zahtevnih instalacija, gotovo svaki uticaj je od presudne važnosti za kompletну smislenost i svrshishodnost čitavog projekta. Tako su prilikom izvođenja građevinskih radova korišćene tehnologije izrade i kontrole koje omogućavaju postizanje preciznosti od 0,1 mm na 10 km.

Prilikom korišćenja uređaja treba računati na prolazak francuskog voza TGV koji prolazi na relaciji Paris-Ženeva, a svojim zračenjem utiče na intenzitet magnetnih i električnih polja akceleratora, takođe posebna pažnja treba biti posvećena položaju Meseca i njegovom uticaju na obližnje jezero Leman i slično.

Kao što je već rečeno LHC kompleks se sastoji od podzemnih i nadzemnih instalacija, pri čemu je ukupna bruto površina nadzemnih instalacija 76.000 m^2 dok je zapremina podzemnih kostrukcija 242.000 m^3 . Instalacijski kompleksi su grupisani oko 10 lokacija duž akceleratorskog tunela.



Sl.12.

Već nakon ovakvog površnog uvida u ovaj poseban objekat jasno je da se radi o velikom i zahtevnom projektu koji potencijalno ostavlja dubok trag na svoju okolinu, pa je CERN prilikom izvođenja LHC-sastava posebnu pažnju posvetio preventivnom saniranju svih neželjenih uticaja koje on može imati na prirodnu okolinu. Za sve ove slučajeve su predviđena konkretna rešenja, od pročišćavača vazduha, olovnih štitnika i mernih uređaja radijacije preko posebne zvučne izolacije do ozelenjavanja i pošumljavanja lokacije.

7. DESY – HERA

Institut DESY se nalazi u Nemačkoj u Hamburgu. U institutu se nalazi nekoliko akceleratora, a najveći i za fiziku najznačajniji je HERA. Tu su još i mnogo manji akceleratori – PETRA, DORIS i DESY, i jedan linearni akcelerator VUV-FEL, prototip linearног akceleratora koji u budućnosti može dobiti ulogu najvažnijeg i najjačeg akceleratora na planeti.

DORIS i PETRA su mali akceleratori. Koriste se za istraživanja u HASYLAB-u, jednoj od najznačajnijih laboratoriјa u svetu za istraživanja X-zračenjem. Fizičari, hemičari, biolozi, lekari ovde mogu analizirati uzorke do najsitnijih detalja, veličine atoma.

DORIS (Double Ring Store) je prvi akcelerator sagrađen u DESY-ju. On ubrzava elektrone gotovo do brzine svetlosti. Mali paketi elektrona obilaze 300 metara dug prsten akceleratora million puta u sekundi. Jaki magneti održavaju elektrone na kružnoj putanji. Krećući se stalno u krug, elektroni emituju velike količine X-zraka. Tu se još nalaze i specijalni, nekoliko metara dugački magneti tzv. Undulatori koji primoravaju elektrone na cik-cak putanje. Na ovaj način elektroni emituju intenzivno sinhrotronno zračenje u širokom delu elektromagnetcnog spectra, od vidljivog do X-zračenja.

PETRA (Positron-Elektron Tandem Ring Akcelerator) je obima 2,3 kilometara. Ovaj akcelerator je dugo igrao vrlo važnu ulogu u fizici elementarnih čestica. Verovatno najznačajniji događaj u istoriji dogodio se 1979. godine kada su otkriveni gluoni, čestice koje su odgovorne za stabilnost atomskih jezgara. Sada se PETRA koristi samo za početno ubrzavanje protona i elektrona pre ubacivanja u mnogo jaču HERA-u.

HERA (Hadron-Elektron Ring Akcelerator) je u upotrebi od 1992. godine. Obim ovog akceleratora je 6,3 kilometara. Akcelerator se nalazi u tunelu prokopanom na dubini od oko 30 metara ispod grada. HERA je jedinstven u svetu. To je jedini accelerator u kome se analiziraju sudari protona i elektrona (pozitroni), a upravo to je glavna prednost ovog akceleratora. Snažno magnetno polje ubrzava elektrone i protone do ogromnih brzina i energija. U dve tačke u akceleratoru (detektori H1 i ZEUS), nekoliko miliona puta u sekundi dolazi do sudara ovih čestica. Prilikom sudara elektroni imaju energiju od 30 GeV, a protoni od 920 GeV.

Ovi sudari su u stvari najsavršeniji "mikroskop" koji omogućava da se zaviri u strukturu protona, a rezultati dobijeni analizom tih sudara mogu dati odgovore na neka od pitanja koja "muče" čovečanstvo već hiljadama godina.



Sl.13. SINHROTRON HERA

Osim ova dva detektora na HERA-i postoje još dva eksperimenta - HERMES i HERA-B. U ovim eksperimentima ne dolazi do sudara protona i elektrona već se snop electrona (tj. protona) sudara sa nepokretnom metom. HERMES koristi snop elektrona za istraživanje atomskog jezgra, pre svega spina, dok HERA-B koristi samo snop protona za proučavanje teških kvarkova.

Detektori su ogromnih dimenzija, koje prelaze desetak metara. Svaki od njih nalazi se na jednoj od četiri strane sveta: H1-sever, ZEUS-jug, HERA-B-zapad i HERMES-istok, i nalaze se na sedam spratova ispod zemlje.

8. ZAKLJUČAK

Poslednji u nizu akceleratora u DESY-ju nimalo ne liči na svoje prethodnike, ali će u budućnosti verovatno biti najvažniji accelerator u Hamburgu, a možda i u celom svetu. To je VUV-FEL (Vacum Ultraviolet Freelektron Laser) linijski akcelerator. Za razliku od svih drugih akceleratora gde se čestice kreću po kružnim putanjama, kod ovakvog akceleratora elektroni se kreću samo pravo.

VUV-FEL je prototip novom akceleratoru koji je nazvan TESLA (Tev-Energi Superconducting Linear Akcelerator), sa čijom će se gradnjom uskoro početi, a taj akcelerator će po mnogim osobinama biti na prvom mestu u svetu. Biće to 33km dugačak linearni kolajder u kome će se sudsarati elektroni i protoni.

TESLA i LHC predstavljaju budućnost fizike elementarnih čestica, a pred njima je mnogo zadataka i pitanja na koja treba da daju odgovore.

DESY će igrati vodeću ulogu u izgradnji novog internacionalnog kolajdera za elektrone i pozitrone. Ova mašina će omogućiti veliki korak napred u traganju za tajnama elementarnih čestica: Higsova čestica i supersimetrije, odgovoriti na pitanje "šta je vreme" veza beskrajno velikog (kosmologija) i beskrajno malog, nova iznenađenja koja prevazilaze čak i našu maštu.

9. LITERATURA

1. W. E. Burcham: "Nuklearna fizika, uvod sa fizikom čestica", Naučna knjiga, Beograd, 1974.
2. Dr Lazar Marinkov : "Osnovi Nuklearne fizike", Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad, jun 1976.
3. <http://s.r.Wikipedia.org/sr-el/Ciklotron/>
4. http://www.mmilan.com/2007/06/10/kako_rade_akceleratori
5. <http://cernenvironment.cern.ch.ch/>
6. <http://mmilan.com/2007/08/15/desy-internacionalni-letnji/>
7. <http://www.desy.de/>
8. <http://Letenka.mmilan.com/>
9. <http://www.eskola.hfd.hr.>

10. BIOGRAFIJA



Krunija Papić, rođ. Đurović, rođena 01. 09. 1957. godine u Bijeljini. Osnovnu školu i gimnaziju završila je u Bijeljini a Višu školu u Novom Sadu. Živi u Novom Sadu. Radi u Osnovnoj školi "Mihajlo Pupin" u Vrterniku kao nastavnik fizike. Udata, majka dvoje dece.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
KLJUČNA DOKUMANTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije: Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa: Tekstualni štampani material

TZ

Vrsta rada: Diplomski rad

VR

Autor: Krunija Papić

AU

Mentor: Prof. Dr.Miroslav Vesković

MN

Naslov rada: Akceleratori u nuklearnoj i fizici elementarnih čestica

NR

Jezik publikacije: srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda: srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja: Srbija

ZP

Uže geografsko područje: Vojvodina

UGP

Godina: 2007

GO

Izdavač: Autorski reprint

IZ

Mesto i Adresa: Prirodna-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4. Novi Sad

MA

Fizički opis rada: 10/42/-/-14/-/-

FO

Naučna oblast: Fizika

NO

Naučna disciplina: Opis akceleratora

ND

Predmetna odrednica/ključne reči: Akceleratori u nuklearnoj i fizici elementarnih čestica

PO

Čuva se: Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

ČU

Važna napomena: nema

VN

Izvod: U radu je opisana akceleracija čestica

Iz

Datum prihvatanja teme od NN veća: 18.05..2007.

DP

Datum odbrane: 26.10.2007.

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik: Dr Nataša Todorović, red. prof,

Član: Dr Radomir Kobilarov, red. prof,

Član: Dr Miroslav Vesković, red. prof.

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS
KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type: Monograph

DT

Type of record: Textual printed material

TR

Content code: Final paper

CC

Author: Krunija Papić

AU

Mentor/comentor: Dr Miroslav Vesović, full professor

MN

Title: Accelerators in nuclear physics and physics of elementary particles

TI

Language of text: Serbian (Latin)

LT

Language of abstract: English

LA

Country of publication: Serbia and Montenegro

CP

Lokality of publication: Vojvodina

LP

Publication year: 2007

PY

Publisher: Author's reprint

PU

Publication place: Faculty of Science and Mathematics, Novi Sad, Dositej Obradovic's Square

PP

Physical description: 10/42/-/-/14/-/-

PD

Scientific field: Physics

SF

Scientific discipline: Description of accelerators

SD

Subject/Key words: Accelerators in nuclear physics and physics of elementary particles

SKW

Holding data: Library of Department of Physics, PMF-a in Novi Sad

HD

Note: None

N

Abstract: In the work is described acceleration of particles

AB

Accepted by the Scientific Board: 18.05.2007.

ASB

Defended on: 26.10.2007.

De

Thesis defend board:

DB

President : Dr Nataša Todorović, full professor,

Member: Dr Radomir Kobilarov, full professor

Member: Dr Miroslav Vesović, full professor

