

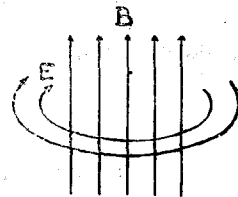
B E T A T R O N

JOSIP MOSER

Da bi se izvršile promjene atomskih jezgri, treba na njih djelovati elementarnim česticama ili gama zrakama velike energije. Elementarne čestice, kojima gađamo atomske jezgre, mogu imati električni naboj (protoni, deutoni, alfa čestica) ili mogu biti bez električnog naboja (neutroni). Kao čestice sa nabojem možemo koristiti alfa čestice, koje nastaju kod raspadanja radioaktivnih elemenata, ali možemo koristiti i čestice iz drugih izvora. Dok alfa čestice radioaktivnih elemenata već imaju velike energije, česticama iz drugih izvora treba tek dati velike energije tako, da ih ubrzavamo do velikih brzina. Ovo ubrzavanje vrši se pomoću nekih aparata, među kojima je jedan od najznačajnijih betatron. Ime mu dolazi odatle, što se u njemu ubrzavaju elektroni do brzina koje su blizu brzine svetlosti i tako se dobije zračenje koje je u bitnosti jednako beta zrakama iz prirodno i vještačko radioaktivnih elemenata.

Elementarne čestice mogu postići velike energije, ili jednokratnim ubrzanjem kroz vrlo jako električko polje, ili višekratnim ubrzanjem kroz razmjerno slabija polja, ili tako da se puste, da opisuju dugačke puteve duž kojih vlada električno polje. Ova se treća mogućnost primijenjuje kod betatrona.

U betatronu elektroni mnogo puta obilaze istu kružnicu, duž koje vlada električko polje, koje ih neprestano ubrzava. Silnice tog električkog polja imaju oblik kružnice i zato se to polje zove vrtložno električko polje. Ovakovo se električko polje može napraviti pomoću promjenljivog magnetskog polja. Ako se, naime, u nekom prostoru mijenja magnetski fluks Φ , onda u njemu nastaje električko polje, čije silnice obilaze u kružnicama oko magnetskih silnica (sl. 1). Kad bi se u takvom polju nalazio neki zatvoreni vodič, onda bi to polje u njemu izazvalo gibanje elektrona i kroz vodič bi tekla električna struja. Ali takovo vrtložno polje postoji i onda kada nema vodiča u kojem se može inducirati struja. Ono postoji i u vakuumu. Ako u vakuumu napravimo takovo vrtložno električko polje i u nj ubacimo slobodne elektrone, pa te elektrone prisilimo da se



Sl. 1

gibaju uzduž električkih silnica, onda će ih polje stalno ubrzavati. Elektrone možemo prisiliti, da se gibaju uzduž kružnih silnica vrtložnog električkog polja pomoću jakog magnetskog polja, čije su silnice okomite na ravninama u kojima leže silnice vrtložnog polja. Poznato je, naime, da magnetsko polje struju elektrona, koji se gibaju okomito na smjer magnetskih silnica, savija i da su staze elektrona u takvom polju kružnice s radiusom

$$r_0 = \frac{mv}{eB_0} = \frac{p}{eB_0} \quad (1)$$

gdje B_0 znači jakost magnetskog polja, e množinu elektriciteta, koju nosi jedan elektron, a $p = mv$ veličinu gibanja elektrona (m je masa, a v brzina pojedinog elektrona). Ako je magnetsko polje zgodno izabrano, može se postići da elektroni ostanu stalno na istoj kružnici. Ta se kružnica zove glavna kružnica i njezin ćemo radius označiti sa r_0 . Magnetsko polje B_0 , u kojem se elektroni gibaju po kružnici radiusa r_0 , prema formuli (1) mora biti proporcionalno brzini elektrona v , pa je se elektronima stalno povećava brzina mora se i to polje pojačavati.

Iz svega što je do sad izloženo vidi se, da magnetsko polje u betatronu ima dvostruku ulogu. Prvo, potrebno je jedno magnetsko polje, koje kroz površinu glavne kružnice šalje promjenljivi magnetski fluks Φ_0 , čija je zadaća, da napravi vrtložno električko polje, koje će ubrzavati elektrone. A drugo, potrebno je magnetsko polje B_0 , da savija staze elektrona i vodi elektrone po glavnoj kružnici. Jer i prvo polje savija staze elektrona, moraju ova dva polja zadovoljavati neki uvjet, da rezultat njihovog zajedničkog djelovanja bude gibanje elektrona po glavnoj kružnici. Taj uvjet zovemo uvjet 1:2, a našao ga je 1928. godine norveški fizičar Widerøe, koji je tada radio u Njemačkoj. Prema tom uvjetu mora promjenljivi magnetski fluks Φ_0 , koji prolazi kroz površinu glavne kružnice i stvara vrtložno električno polje, biti dvaput veći od magnetskog fluksa $r_0^2 \pi B_0$, koji kroz površinu glavne kružnice teče radi polja B_0 , koje vodi elektrone po njoj. Dakle

$$\Phi_0 = 2 r_0^2 \pi B_0 \quad (2)$$

Ova se formula može lako dokazati. Prema 2. Maxwelllovoj jednadžbi je električno polje E_0 , koje djeluje tangencijalno duž kružnice radiusa r_0 u aksialno simetričnom promjenljivom magnetskom polju:

$$E_0 = \frac{1}{2\pi r_0} \frac{d\Phi_0}{dt} \quad (3)$$

Sila kojom ovo polje djeluje na elektron je eE i ona je prema osnovnim zakonima mehanike jednaka promjeni veličine gibanja u jedinici vremena. Dakle

$$\frac{dp}{dt} = eE_0$$

iii

$$\frac{dp}{dt} = \frac{e}{2\pi r_0} \frac{d\Phi_0}{dt}$$

Ovo daje integracijom:

$$p = \frac{e}{2\pi r_0} \Phi_0 + C$$

Ako u vrijeme kad je magnetsko polje nula, dakle $\Phi_0 = 0$, imamo elektron koji miruje, dakle $p = 0$, onda izlazi konstanta integracije $C = 0$. Dakle

$$p = \frac{e}{2\pi r_0} \Phi_0 \quad (4)$$

i pomoću (1) izlazi

$$\Phi_0 = 2\pi r_0^2 B_0,$$

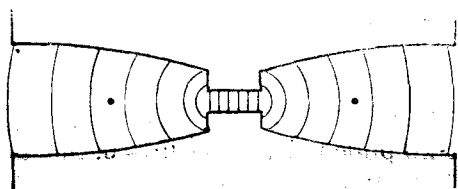
a ovo je uvjet 1:2.

Budući da u ovom izvođenju dolazi svuda veličina gibanja, a nigdje ne dolazi samo masa, zato taj izvod vrijedi i za brzine, kod kojih bi trebalo uzimati relativističku korekturu za masu, kad bi u formulama dolazila sama masa. Dakle, ako je zadovoljen uvjet 1:2, onda elektroni ostaju na glavnoj kružnici i kad se ubrzaju i do blizu brzine svjetlosti.

Kako se iz formule (2) vidi, oba magnetska polja $\Phi_0/r_0^2\pi$ i B_0 mijenjaju se tako, da stalno ostaju među sobom proporcionalna. Zato ih izvodimo pomoću promjenljive električne struje koju propuštamo kroz iste namotaje na elektromagnetu. Prema tome, radi se u stvari, o jednom magnetskom polju, koje ima oba gore opisana svojstva. U te namotaje puštamo izmjeničnu struju, ali od nje koristimo za ubrzavanje elektrona samo prvu četvrtinu periode u kojoj struja, a time i njeno magnetsko polje, raste. Radi toga se iz betatrona ne dobiva konstantna struja vrlo brzih elektrona, nego se dobiva u jedinici vremena toliko isprekidanih mlazova, kolika je frekvencija upotrebljene izmjenične struje. Ta frekvencija nije osobito velika. Ona se kreće između 50 i 500 herca.

Za vrijeme ubrzavanja elektron u betatronu obiđe preko 250 hiljada puta glavnu kružnicu i zato u aparatu opisuje vrlo dugačke puteve. Tako kod betatrona koji radi na frekvenciji 500 herca iznosi dužina puta elektrona oko 150 kilometara, a kod betatrona koji radi na frekvenciji 50 herca oko 1500 km. Na tako dugom putu postoji dovoljno mogućnosti da se elektron sudari s kojom od molekula, koje su preostale nakon visokog evakuiranja prostora u kojem se elektroni kreću. Uslijed takvog sudara biva elektron izbačen iz svoje putanje, pa da on radi toga ne bi bio izgubljen, mora magnetsko polje oko glavnog kruga biti takovo, da ono prisili takav elektron da se vrati na glavni krug.

Da bi se to postiglo, ne smije magnetsko polje biti homogeno, nego mora biti takovo da ono opada kada se ide od središta aparata prema njegovoj periferiji. Dakle razniak se među polovima mora povećavati. Presjek običnog oblika polova je prikazan na slici 2. Među polovima ucrtane su i magnetske silnice sa svojom gustoćom, a dvije crne točke predstavljaju presjek glavnog kruga. Oko tog glavnog kruga mora postojati jedno područje stabilnosti, što znači, da polje u tom području mora imati



Sl. 2

takav smjer i jakost, da na elektrone koji su u njemu, djeluje još i silom, koja ih približava glavnoj kružnici. Da bi takovo područje stabilnosti postojalo mora ovisnost magnetskog polja o udaljenosti od osi aparata biti podvrgnuto t. zv. uvjetima stabilizacije. Dva su takva uvjeta. Naime, smjer kojim elektron napušta glavni krug, može se rastaviti u dvije komponente, jednu u smjeru radiusa, a drugu okomito na ravninu glavnog kruga. Jedan uvjet mora stabilizirati gibanje u smjeru prve a drugi u smjeru druge komponente. Zovemo ih radijalni i aksijalni uvjet stabilizacije. Steenbeck i Spenke* (1935), Kerst i Serber (1941), našli su te uvjete za stabilizaciju. Uvjet za radijalnu stabilizaciju glasi

$$\frac{r}{B} \frac{\partial B}{\partial r} < 0$$

a uvjet za aksijalnu

$$\frac{r}{B} \frac{\partial B}{\partial r} + 1 > 0.$$

Oba se ova uvjeta dadu spojiti u zajednički uvjet

$$0 > \frac{r}{B} \frac{\partial B}{\partial r} > -1 \quad (5)$$

Najjednostavnije magnetsko polje koje zadovoljava ovim uvjetima mijenja se po zakonu

$$B = \frac{\text{const}}{r^n} \quad (6)$$

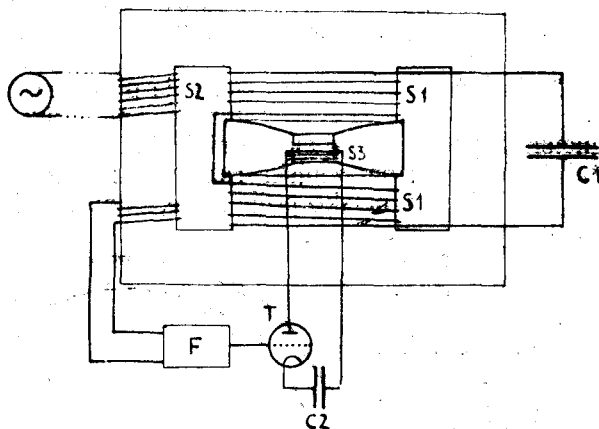
gdje je $0 < n < 1$

Za $n=1$ dobiva se najbolja aksijalna stabilizacija, ali onda nema radijalne, a za $n=0$ je obrnuto. Za $n = \frac{1}{2}$ obje su stabilizacije.

jednako dobre. Taj je eksponent uzet kod praktične izvedbe prvih njemačkih betatrona, dok je kod američkih uzeto $n = \frac{3}{4}$.

Ako se polovima elektromagneta dađe takav oblik da polje među njima zadovoljava uvjet stabilizacije, onda će put elektrona, koji nije na glavnoj kružnici, oscilirati oko glavne kružnice. Te su oscilacije prigušene. Amplituda im se s vremenom umanjuje, i zato se putanja elektrona sve više približava glavnoj kružnici. Područje stabilnosti ograničeno je na vanjskoj i na unutarnjoj strani s dvije kružnice, koje se zovu granične kružnice. Oni elektroni, koji pređu granične kružnice i napuste područje stabilnosti, ne vraćaju se više k glavnoj kružnici, nego završavaju svoj put na stijenama posude za evakuiranje i time su izgubljeni za rad aparata.

Prema do sada izloženim principima rada, opća shema betatrona bila bi ova. Željezna jezgra ima oblik prikazan u slici 3. Između krajeva srednjeg dijela nastaje magnetsko polje.

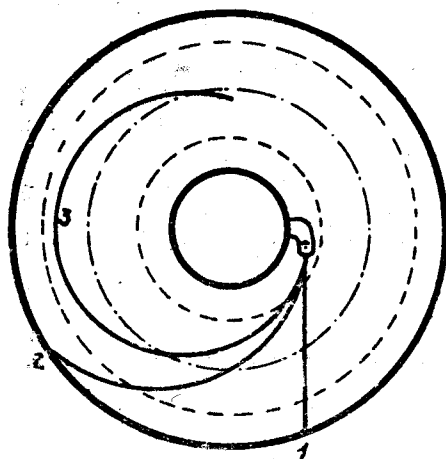


Sl. 3

Taj srednji dio nosi na sebi spiralu $S1$ (sl. 3), koja s kondenzatorom $C1$ čini električni titrajni krug. $S2$ je spirala koja je vezana za generator izmjenične struje tako da sve djeluje kao rezonancijski transformator kojem je $S2$ primarna, a $S1$ sekundarna spirala. Izmjenična struja u spirali $S1$ uzrokuje promjenljivo magnetsko polje potrebno za ubrzanje elektrona. Na srednji dio željezne jezgre nataknuti su polni nastavci, koji imaju presjek kakav je prikazan u slici 2, pa oni daju magnetskom polju onakav oblik, kakav je potreban da se zadovolji uvjet stabilizacije (6). Među polovima nalazi se komora za evakuiranje, unutar koje se vrši ubrzanje elektrona. Ona je od porcelana, keramike ili stakla i iznutra je obložena tankim slojem srebra.

ili grafita. Iz praktičnih razloga polni nastavci su učvršćeni na toj komori i zajedno se s njom mogu lako izvaditi iz aparata.

U vakuum komori je ugrađen injektor, koji ubacuje elektrone. Sastavljen je iz užareni niti, Wehneltova cilindra i anode



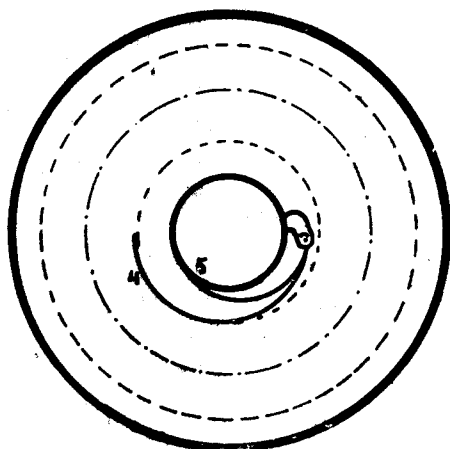
Sl. 4

za ubrzavanje. Užarena nit kao katoda emitira elektrone, koje Wehnelov cilindar skuplja u uski snop, a napetost između anode i katode im daje izvjesnu početnu brzinu, kojom ulaze u područje stabilnosti betatrona. Ta napetost je kod raznih konstrukcija različita i kreće se između 5 i 50 kv. Injektor je namješten neposredno uz unutarnji granični krug tako, da elektroni, koji iz njega iziđu, ulaze u područje stabilnosti. U vrijeme kad struja, koja pobuđuje magnetsko polje raste, onda se elektronski snop savija u kružni luk.

Dok polje nije dovoljno jako, ovaj snop završava na vanjskoj stijeni vakuum komore (sl. 4, sluč. 2).

Daljnje jačanje polja izaziva veće savijanje i kad polje postigne dovoljnu jakost bit će elektronski snop toliko savijen, da trajno ostaje unutar područja stabilnosti (sl. 4, sluč. 3). Elektroni koji sada izlaze iz injektora, pune područje stabilnosti i to su oni elektroni koje aparat iskorištava. Kod daljnjeg jačanja magnetskog polja zakrivljenost ubačenog elektronskog snopa dalje

raste, dok konačno ne postigne periferiju unutarnjeg graničnog kruga (sl. 5, sluč. 4). Još veće pojačanje polja prejako savija ubačeni snop elektrona, tako da on izlazi iz područja stabilnosti



Sl. 5

U vrijeme kad struja, koja pobuđuje polje prolazi kroz nultočku, u komori

na unutrašnjoj strani i svršava na unutrašnjoj stijeni vakuum komore (sl. 5, sluč. 5). Ti elektroni ne pridonose daljnjem radu aparata.

Elektroni koji su ubačeni u područje stabilnosti ostaju u njemu i tu se ubrzavaju. Što dalje polje raste, to se oni sve više skupljaju oko glavne kružnice. Tako se dobije uski snop elektrona koji obavi glavnu kružnicu. Kada struja koja pobuđuje magnetsko polje, dođe do blizu maksimuma, tada treba taj prsten ubrzanih elektrona razoriti i elektrone iz njega izvući. To se postizava tako, da se jednim novim magnetskim poljem, koje se dodaje prijašnjem polju, pokvari uvjet 1:2. U tu svrhu se pusti vrlo kratko vrijeme struja u spiralu S3, koja je namotana oko kraja jednog od polnih nastavaka (slika 3). Da bi struja tekla samo kratko vrijeme, ona se dobiva izbijanjem kondenzatora C2 kroz tiratronske cijev T. Tiratron za vrijeme od 10^{-5} sek. izbija kondenzator, a da bi on stupio u djelovanje baš onda, kada treba, spojen je s jednim faznim regulatorom F. Struja koja prolazi kroz spiralu S3 umanjuje magnetsko polje, koje vodi elektrone po glavnoj kružnici, i polje koje sada vlada više ne zadovoljava uvjet 1:2. Zato elektroni sada napuštaju glavnu kružnicu i opisujući puteve, koji imaju oblik spirale, dođu do vanjskog ruba vakuum komore. Na mjesto na koje oni padaju može se postaviti ili Lenardov prozorčić od tanke aluminijske folije i tako izvesti elektrone van aparata, ili antikatoda od metala. Kad elektroni udare o antikatodu njihovo se gibanje za koči. Rezultat tog kočenja je da se veći dio njihove energije pretvori u toplinu, a ostali dio u rentgenske znakove sa visokom energijom od nekoliko desetaka do 100 MeV. One prema tomu energijom daleko premašuju gama zrake iz radioaktivnih elemenata.

Ti se kvanti zračenja upotrebljavaju za dezintegracije atomskih jezgara. Naime, ako jezgra apsorbira kvant tako visoke energije, ona može emitirati i više od jedne čestice, tako da se u Wilsonovoj komori vidi zvijezda njihovih tragova. Radi toga je betatron moćno sredstvo za proučavanje osobina atomskih jezgri. Zračenje koje daju manji betatroni može se korisno upotrebiti i u medicini. Tako je zračenje betatrona s konačnom energijom 6 MeV ekvivalentno zračenju 20 grama radiuma.

Za vrijeme ubrzavanja pojedini elektron u betatronu izvrši nekoliko stotina hiljada obilazaka i postizava brzinu koja se jako približava brzini svjetlosti. Kod tako velike brzine elektronu se povećava i masa onako kako to traži teorija relativnosti. Tako kod betatrona firme General Electrical Company, koji daje konačnu energiju od 100 MeV, elektron kod konačne energije postizava brzinu od 99,99% brzine svjetlosti i ima 200 puta veću masu od svoje mase mirovanja.

Prvi upotrebljivi betatron sagradio je 1941. Kerst u Americi. Taj je imao 2,3 MeV konačne energije. Kasnije su građeni

betatroni s većim energijama. Pokazalo se da se po ovom principu ne može znatno preći energija od 100 MeV. Razlog tomu je ovaj. Teoretski je dokazano da nabijena čestica, kad se giba po kružnici, emitira energiju u obliku zračenja. Taj je efekt 1947 i eksperimentalno dokazan. Emitirana energija je proporcionalna sa $\frac{E^4}{r}$ i zato se njezin iznos jako povećava kad raste energija elektrona E , pa je zato ograničena konačna energija, koja se može elektronu dati kod gibanja po kružnici. Kombinacija principa betatrona s principom rada jednog drugog aparata za ubravanje čestica t. zv. sinhrotrona otvara mogućnost za postizavanje još većih konačnih energija.

Da bi se dobila neka slika o veličini betatrona, iznosim neke brojčane podatke o velikom američkom betatronu od 100 MeV, koji je izgradila firma General Electrical Company. Težina mu iznosi 117 tona, dimenzije željeznog okvira $4,5 \times 2,7$ m², radius glavne kružnice 84 cm, poprečni presjek područja stabilizacije 8×15 cm², maksimalno magnetsko polje u glavnom krugu 4000 gausa. Radi na frekvenciji 60 herca. Elektroni se ubacuju sa napetošću od 50 kV, u aparatu oni izvrše 250 hiljada obilazaka i pri svakom obilasku im se energija prosječno poveća za 400 eV. Gama zrake koje taj betatron proizvodi imaju u udaljenosti 1 m od izlaznog mjesta u sredini snopa jakost od 2600 rentgena u minuti. Aparat se nalazi u posebnoj zgradi i za zaštitu okolnih prostorija od njegovog zračenja, ograđen je betonskim zidom od 90 cm debljine. Tamo, gdje iz njega izlazi snop zraka, nalazi se rupa u tom zidu i zrake prelaze u susjednu prostoriju gdje je prostor za eksperimentiranje.