

DINAMIKA JONSKOG SNOPA U AKCELERIRAJUĆEM REGIONU CIKLOTRONA VINCY

Stanko Tomić

Laboratorija za fiziku (010), Institut za nuklearne nauke VINCĀ, P.O. Boz 522, 11001 Beograd, Jugoslavija

Evgenij Samsonov

Laboratory of Nuclear Problems, Joint Institute of Nuclear Research, 141960 Dubna, Moscow, Russia

Sadržaj - Savremene konceptije teškojonskih ciklotrona su orijentisane ka malim zazorima magneta, što omogućava znatno bolje karakteristike i veću efikasnost magnetnog polja. Na ovaj način se ograničava moguće rešenje akceleratorne strukture i uslovljava se postavljanje duanata u doline magneta. Ovaj pristup, koji je usvojen kod ciklotrona VINCY, nametnuo je potrebu detaljnog proračuna dinamike jonskih snopova u akcelerirajućem regionu. U tu svrhu učinjena je detaljna analiza u radialnom i aksijalnom faznom prostoru za jonske snopove sa $\eta = 1,05$ i $0,25$. Takođe, diskutovani su slučajevi energetskog rastura unutar emitanse i uticaj perturbacije prvog harmonika magnetnog polja na amplitudu radialnih betatronskih oscilacija.

1. UVOD

Ciklotron VINCY [1] je više čestična i višenamenska mašina čija je konstrukcija i izgradnja u toku u Institutu za nuklearne nauke Vinča u Beogradu. Da bi se ilustrovale performanse u tabeli 1. su navedeni njegovi glavni parametri.

Tabela 1. Glavni parametri ciklotrona VINCY.

Tip čestica koje se ubrzavaju	$\eta = Z/A$	0.15-1.0
Skretna moć magneta	[MeV]	145
Fokusirajuća moć magneta	[MeV]	75
Dijametar pola magneta	[cm]	200
Broj sektora		4
Spiralnost sektora	[°]	0
Ugaoni otvor sektora	[°]	42
Rastojanje između sektora	[cm]	3.1
Rastojanje između dolina	[cm]	19
Broj trim kalemova		10
Broj harmoniskih kalemova		8
Broj duanata		2
Ugaoni otvor duanata	[°]	40
Opseg frekvencija duanata	[MHz]	17-31
Harmonici ubrzavanja	$h = \omega_{RF}/\omega$	1,2,4
Vertikalna apertura duanata	[cm]	2,2
Maks. napon na duanatima	[kV]	100

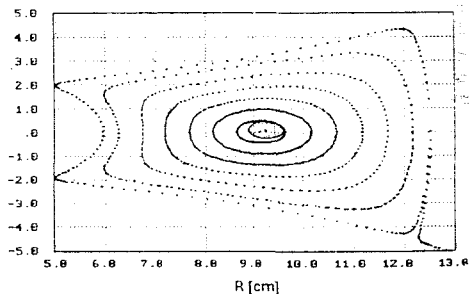
Potvrda njihove valjanost učinjena je serijama proračuna dinamike jonskih snopova u akcelerirajućem regionu. Tokom ovih izračunavanja posebna pažnja je posvećena što tačnijoj proceni amplituda transverzalnog oscilovanja, betatronskim učestanostima, faznom kretanju i parametrima snopa u ekstrakcionom regionu ciklotrona. Takođe, razmatran je uticaj prvog harmonika magnetnog polja na ponašanje snopa duž akcelerirajućeg regiona. Kao rezultat, dobijen je mogući opseg param-

etara jonskih snopova na ekstrakcionoj foliji u ekstrakcionoj oblasti ciklotrona VINCY.

2. DINAMIKA JONSKOG SNOPA

U proračunu dinamike jonskih snopova uzeti su u razmatranje tri tipa jona: H^- , D^- i $^{20}Ne^{5+}$ koji odgovaraju modovima ubrzavanja na prvom, drugom i četvrtom harmoniku RF sistema. Ulazne emitanse ovih snopova, na početku akcelerirajućeg regiona, su prethodno dobijene nakon veoma opsežne optimizacije geometrije centralnog regiona [2]. Početni parametri snopova su prikazani u tabeli 2. Sve čestice su ubrzavane sa ubrzavajuće ravnotežne orbite (AEO) [3], čije je određivanje učinjeno tako da smanji amplitudu radialnih betatronskih oscilacija ispod 1 mm. Na slici 1. je pokazan položaj AEO u odnosu na statičku ravnotežnu orbitu (SEO) u radialnom-faznom prostoru za čestice sa specifičnim naelektrisanjem $\eta = 1$. Takođe, na ovoj slici se jasno vidi deformacija radialnog faznog prostora u četvorog roglasti lik koji odgovara simetriji četvrtog reda magnetnog polja ($N = 4$), odnosno uticaju rezonance $Q_r = N/4$.

Pr [cm]



Slika 1. Položaj AEO (šrafrano područje) u odnosu na statičku fazni diagram za jone H^- .

Relativan položaj separatriksa, odnosno nestabilnog kretanja je na $R = 3.25$ cm od AEO, što govori o veoma velikoj akseptansi akceleratora za ovaj tip jona. Simuliranje celokupnog paketa čestica koji se ubrzava, "bunch", izvršeno je stohastičkim generisanjem od 100 do 1000 čestica, pomoću korelisane Gauss-ove raspodele unutar 6D faze zapremine, pri čemu treba naglasiti da je faza čestica u odnosu na fazu radio frekventnog (RF) sistema uzeta konstantna za sve čestice na početku ubrzavanja. Nakon toga čestice su ubrzavane tokom 500. 260 i 112

krugova za H^- , D^- i $^{20}Ne^{5+}$ redom. Električno polje u ubrzavajućim procepima je opisano analitičkim relacijama [4]:

$$E_y = \frac{U_{RF}}{\Delta y \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\Delta y}\right)^2\right] \cos[\omega t - \psi_0] \quad (1)$$

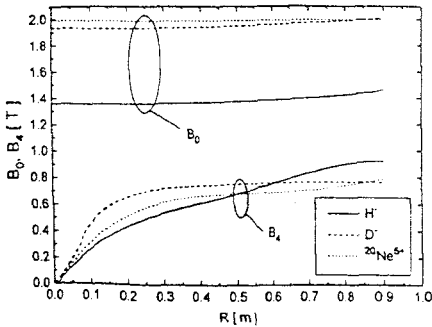
$$E_z = \frac{yz E_y}{\Delta y^2} \left\{ 1 + \frac{1}{6} \left(\frac{z}{\Delta y}\right)^2 \left[\left(\frac{y}{\Delta y}\right)^2 - 3\right] + \dots \right\} \quad (2)$$

gde je $\Delta y = 0.2H + 0.4W$, E_y , E_z - horizontalna i vertikalna komponenta električnog polja, U_{RF} napon na duantima, H , W - aksijalna apertura duanata i širina ubrzavajućeg procepa, ω - učestanost obrtanja čestica i ψ_0 - početna faza čestica u odnosu na fazu RF sistema.

Tabela II. Početni parametri snopova.

Tip čestice koje se ubrzavaju	H^-	D^-	$^{20}Ne^{5+}$	
Početna energija	[MeV/c]	0.725	0.350	0.060
Radius centralne čestice	[cm]	0.250	4.818	0.270
Distanse:				
radijalna (seosornalnoava)	[mm mrad]	2.08	1.72	2.45
radijalna (seosornalnoava)	[mm mrad]	82.9	48.1	145.5
aksijalna (seosornalnoava)	[mm mrad]	15.8	21.8	15.8
Elongacija od AEO:				
radijalna	[mm]	2.2	2.5	4.0
aksijalna	[mm]	3.0	3.0	3.0
Napon ubrzavanja	[kV]	100	100	80
Učestanost obrtanja	[MHz]	20.740	14.770	7.580
Harmonik	n	1	2	4
Faza dijela bučbe	$\lambda \times [^\circ]$	15	40	40

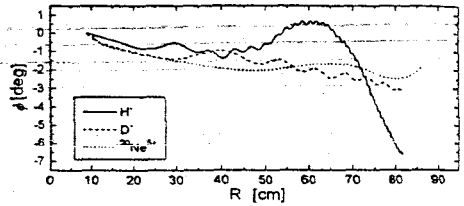
Oblik sektora magnetne strukture je formiran nakon mnogobrojnih 2D i 3D proračuna [5], kao i uzimanjem u obzir eksperimentalnih rezultata koji su dobijeni na model magnetu (skale 1:10) [6]. Na slici 2. su prikazani smutovani eksperimentalni rezultati koji opisuju amplitude glavnog (četvrtog) harmonika magnetnog polja za tri nivoa pobude magnetu. Takođe, na slici su prikazane i odgovarajuće vrednosti izohronih polja koje su dobijene pomoću iterativne procedure [7].



Slika 2. Srednje vrednosti magnetnih polja i odgovarajućih glavnih harmonika za tri režima ubrzavanja.

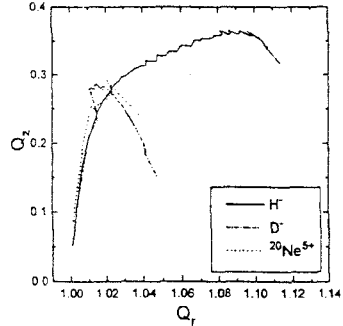
Ova magnetna polja ukazuju na tri režima ubrzavanja koji su razmatrana. Evolucija faza centralnih čestica u bunch-evima u odnosu na fazu RF kao i kretanja centralnih čestica u dijagramu rezonanci (Q_r , Q_z) za jone sa $\eta = 1, 0.5$ i 0.25 su ilustrovani slikama 3. i 4. Ovi rezultati su dobijeni integracijom jednačina kretanja da bi se opisalo longitudinalno i transverzno kretanje čestica.

Evidentno je malo fazno kašnjenje tokom ubrzavanja. U najgorem slučaju za jone $\eta = 1$, ovo kašnjenje je manje od 10° u odnosu na fazu RF, slika 3.



Slika 3. Evolucija faze centriranih čestica u odnosu na fazu RF sistema za jone sa $\eta = 1, 0.5$ i 0.25 .

Sa aspekta transverzalnog kretanja snopa naročito su opasne sledeće rezonance: interna nelinearna rezonanca $kQ_r = N$, gde je N stepen simetrije magnetnog polja i Walkinshow-ova rezonanca $Q_r = 2Q_z$. U slučaju ciklotrona VINCY rezonanca $Q_r = 4/3$ predstavlja "stop band" i praktično ju je nemoguće proći. Ovu rezonancu uslovljava nelinearan oblik magnetnog polja duž trajektorije čestica (azimutalna varijacija magnetnog polja). Na statičkom faznom dijagramu se evidentira pojavom separatriksa izvan čije oblasti je kretanje nestabilno. Walkinshow-ova rezonanca utiče na vertikalno uvećavanje snopa, "blow up", i ona se pobuđuje nelinearnošću kvadrata srednjeg polja. Njen uticaj je naročito velik u ekstrakcionoj oblasti kada snop nije korektno ubrzan sa AEO.

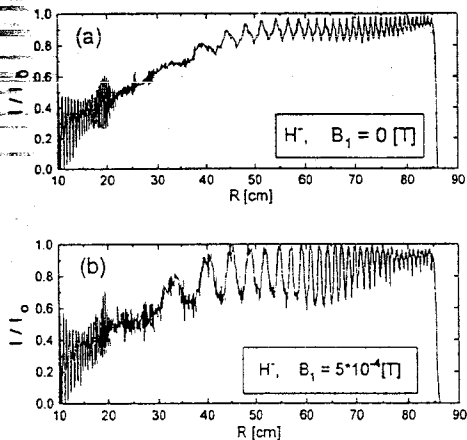


Slika 4. Kretanje centriranih čestica u dijagramu rezonanci za jone sa $\eta = 1, 0.5$ i 0.25 .

Kvalitet upravljačkog magnetnog polja se stoga najbolje vidi na slici 4. na kojoj je jasno pokazano da je kretanje čestica u ciklotronu VINCY daleko od najopasnijih rezonanci sa aspekta gubitka snopa.

3. RADIJALNA RASPODELA STRUJE SNOPA
Da bi se proverio kvalitet kretanja snopa duž radijusa, korišćen je metod numerički simulirane radijalne diferencijalne probe. Za širinu probe je uzeta vrednost od

1 mm. Ona je pomerana duž radijusa na azimutalnom položaju probe PRI (na simetrali sektora 1). Na slici 5. su prikazane radijalne raspodele struje snopa koje su dobitne u idealnom četvoru simetričnom magnetnom polju nakon uzimanja u obzir prvog harmonika magnetnog polja konstantne vrednosti $B_1 = 5 \times 10^{-4}$ T duž radijusa.



Slika 5. Radijalna raspodela struje snopa: bez prisustva prvog harmonika magnetnog polja a) i uzimanjem u obzir prvog harmonika magnetnog polja b).

U svim slučajevima centralna čestica u bunch-u je imala amplitudu radijalnih betatronskih oscilacija manju od 1 mm. Uprkos tako maloj vrednosti, pulsiranje raspodele struje snopa je jasno vidljivo na radijusima većim od 40 cm. Uzimanjem u razmatranje prvog harmonika magnetnog polja amplituda radijalnih oscilacija dostiže vrednost od 5 mm, što uslovljava mnogo veće pulsacije radijalne raspodele struje snopa. Na osnovu toga, metod diferencijalnih proba se može koristiti kao veoma senzitivnan aparat pri proceni radijalne necentriranosti snopa u našem ciklotronu.

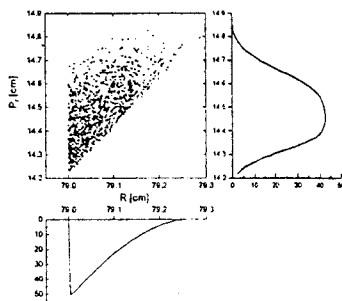
4. PARAMETRI SNOPA NA EKSTRAKCIJI

Laki joni kao na primer H^- i D^- , će biti ekstrahovani iz ciklotrona VINCY pomoću ekstrakcione folije. Njeno pozicioniranje je predviđeno u oblasti radijusa $R \in [70, 86]$ cm i azimutalnog ugla $\theta \in [225^\circ, 260^\circ]$. Položaji ekstrakcione folije su u proračunima uzet $R_{foli} = 79$ cm i $\theta_{foli} = 249^\circ$ za H^- i $R_{foli} = 78$ cm i $\theta_{foli} = 252^\circ$ za D^- . Na slici 6. je prikazan izgled snopa u radijalnom faznom prostoru za jone H^- . Takođe, prikazane su radijalna i impulsna raspodela snopa na foliji. Radi procene ponašanja snopa u faznom prostoru izvršena je normalizacija emitanse snopa:

$$\epsilon_N = \gamma\beta\epsilon \quad (3)$$

gde je $\beta = v/c$ relativistički odnos brzina, $\gamma = E/E_0$ odnos totalne energije prema energiji mirovanja čestica i ϵ nenormalizovana emitansa. U radijalnom faznom prostoru na ekstrakcionoj foliji vrednosti normalizovanih emi-

tansi su 1.02π mm mrad i 1.24π mm mrad, za H^- i D^- redom, što je 2 odnosno 1.4 puta manja od istih na početku ubrzavanja. S obzirom da su aksijalne emitanse skoro nepromenjene, razlika u radijalnim normalizovanim emitansama se objašnjava činjenicom da je snop na početku ubrzavanja bio mono energetski dok na ekstrakcionoj foliji snop poseduje izvesnu raspodelu u energetskom smislu. Takođe, proračuni pokazuju da prvi harmonik magnetnog polja utiče na povećanje radijalnih emitansi i uvećava energetski rastur u snopu koji se ekstrahuje. Međutim, uticaj prvog harmonika je suprotan kod H^- i D^- jona. Kod H^- jona on prouzrokuje značajno uvećanje radijalne emitanse i malo uvećanje energetske razmazanosti. Za D^- jone ovaj efekat je potpuno suprotan.



Slika 6. Radijalna emitansa snopa jona H^- na ekstrakcionoj foliji koja je postavljena na $R_{foli} = 79$ cm. Energija čestica u snopu je 60.8 MeV/n, dok je energetski rastur unutar emitanse 0.7% .

U svakom slučaju može se zaključiti da pojava prvog harmonika magnetnog polja ($\geq 5 \times 10^{-4}$ T) vodi ka bitnom pogoršanju parametara snopa na ekstrakcionoj foliji. Karakteristike snopova na ekstrakcionoj foliji su sumarno date u tabeli 3.

Tabela III. Parametri snopova na ekstrakcionoj foliji.

$B_1 = 0$ [T]	Tip čestica koja se ubrzava		H^-	D^-
	ϵ_N [mm mrad]	$\Delta W/W$ [%]	60.8	28.7
$B_1 = 5 \times 10^{-4}$ [T]	ϵ_N [mm mrad]		2.76	4.93
	ϵ_N [mm mrad]		1.02	1.24
	$\Delta W/W$ [%]		0.7	1.4
	ϵ_N [mm mrad]		7.00	5.54
	ϵ_N [mm mrad]		2.59	1.39
	$\Delta W/W$ [%]		0.83	2.6

5. ZAKLJUČAK

Proračuni ukazuju na stabilno kretanje snopa u ubrzavajućem regionu što potvrđuje valjanost odabranih vrednosti magnetnog polja. Prvi harmonik magnetnog polja prouzrokuje značajno pogoršanje kvaliteta snopa na ekstrakcionoj foliji koje se očituje u uvećavanju radijalne emitanse snopa. Takođe, predložen je efikasan metod za procenu radijalnih koherentnih oscilacija koji se zasniva na metodu merenja diferencijalnim probama. Sa aspekta aksijalnog kretanja snopa, procenjene su dozvoljene vrednosti pozicioniranja duž osi. Dinamika jonskih snopova u ciklotronu VINCY, pokazuju izraženom stabilnost pri ko-

rektno izabranim početnim uslovima određenim centralnim regionom.

LITERATURA

- [1] N. Nešković et al., "Status report on the VINCY Cyclotron", Proceedings of the 14th International Conference CICLOTRONS AND THEIR APPLICATIONS, Cape Town, South Africa, pp. 82-85, 1995.
- [2] D. V. Altiparmakov, "Electrodes in the central region of the VINCY Cyclotron", Proceedings of the 12th information meeting on the TESLA Accelerator Installation, Belgrade, Yugoslavia, 1997.
- [3] Lj. Milinković, K. Subotić and E. Fabrici, "Properties of centered accelerated equilibrium orbits", Nuc. Instr. and Meth., vol. A273, pp. 87-96, 1988.
- [4] N. Hazewindus, J. M. van Niewland, J. Faber and L. Leistra, "The magnetic analogue as used in the study of a cyclotron central region", Nuc. Instr. and Meth., vol. 118, pp. 125-134, 1974.
- [5] D. V. Altiparmakov, S. S. Tomić, M. V. Marković and N. A. Morozov, "Computer modeling of the isochronous field in the VINCY Cyclotron", Proceedings of the 14th International Conference CICLOTRONS AND THEIR APPLICATIONS, Cape Town, South Africa, pp. 201-203, 1995; D. V. Altiparmakov et al., "Operating range of the VINCY Cyclotron", Proceedings of the 5th EPAC, Barcelona, vol. 3, pp. 2210-2212, 1996.
- [6] S. Čirković et al., "Simulation of the VINCY Cyclotron magnet field using a model magnet", Proceedings of the 5th EPAC, Barcelona, vol. 3, pp. 2213-2215, 1996.
- [7] M. M. Gordon, "Calculation of isochronous fields for sector-focused cyclotrons", Part. Accel., vol. 13, pp. 67-84, 1983.

Abstract - Modern concept of heavy ion cyclotrons assumes a tendency of decreasing the gaps between magnet poles, enabling better efficiency of the magnetic field circuit. This restricts possible solutions of acceleration structure and imposes the necessity of installing the dees in valleys of magnetic structures. This approach, which is accepted in the VINCY Cyclotron, requires a detailed study of the ion beam dynamics in the acceleration region. Consequently, we analyzed ion beams with $\eta = 1, 0.5$ and 0.25 in radial and axial phase space. Also, the energy spread in emittances and the influence of the first harmonic of the magnetic field on the radial betatron oscillations are discussed. The transformation of coherent into incoherent radial oscillations as well as the effect of radial off-centering on the beam vertical size at Walkinshaw resonance location, is pointed out.

ION BEAM DYNAMICS IN THE ACCELERATION REGION OF THE VINCY CYCLOTRON
Stanko Tomić and Evgenij Samsonov