

ZGODOVINA POSPEŠEVALNIKOV: Od idej do prvih izvedb

Stanislav Južnič*

HYSTORY OF ACCELERATORS: From ideas to their first realisation

POVZETEK

V razpravi povzemamo zgodovino pospeševalnikov od idej v prejšnjem stoletju do prvih izvedb. Posebno pozornost posvečamo štiridesetletnici Van de Graaffovega pospeševalnika in betatrona na Institutu Jožef Stefan.

ABSTRACT

We deal with the history of accelerators from ideas in the past century, to their first realisation. The 40th anniversary of the Van de Graaff accelerator and the betatron of the Jozef Stefan Institute in Ljubljana is emphasized.

Uvod

Pred sedemdesetimi leti je prišlo do napete tekme v pospeševanju protonov do energije, potrebne za razbitje jedra atoma. Tedanje dogajanje imamo lahko za začetek tistega, kar je pozneje postal zlati vek fizike visokih energij.

Za Rutherfordov znameniti poskus s sipanjem delcev α je bilo treba le nekaj vrvi in voska ter toliko več razuma in domišljije. Pozneje so pospeševalniki postali ena najzahtevnejših tehnologij na svetu.

Predzgodovina

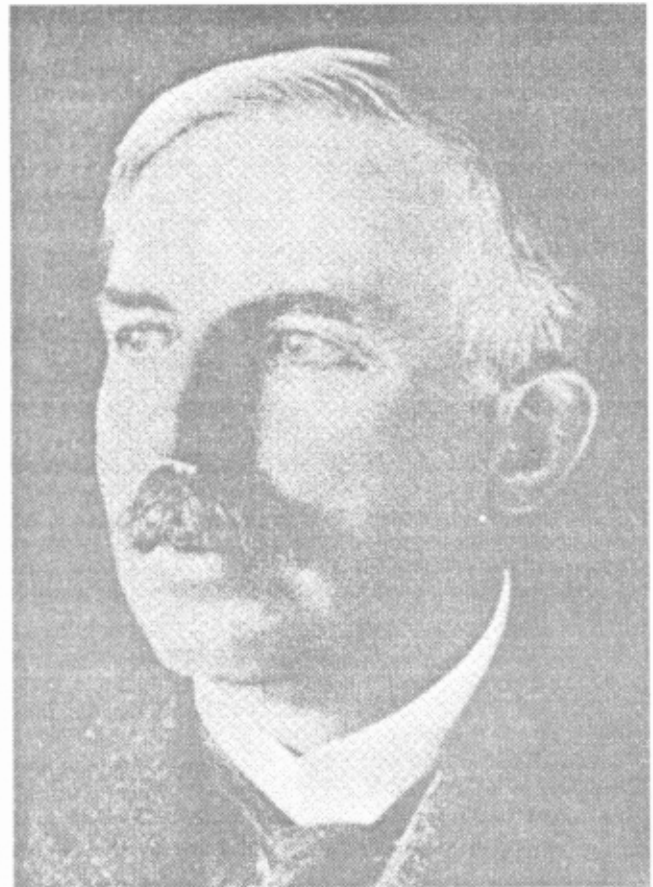
Umetnost izdelave pospeševalnikov se je rodila iz starejše tehnologije visokonapetostnih elektrostatskih naprav in vakuumskih črpalk. Prvega prednika teh naprav je sestavil okoli leta 1710 Anglež Francis Hawksbee (1670-1713), Hookov naslednik na mestu vodje eksperimentov pri Royal Society. Izpraznjeno okroglo stekleno posodo je vrtil okoli osi. Ko je vrtečo se posodo drgnil ob kos krzna, je dobil dovolj napetosti, da je lahko opazil praznjenje v posodi.

Leta 1784 je Nizozemec Martin van Marum (1750-1837) proizvajal več kot pol metra dolge iskre s čudovitim elektrostatskim strojem, ki je bil postavljen v veliki dvorani v Teylerjevem muzeju v Haarlemu na Nizozemskem.

Leta 1897 je J.J. Thomson pripisal katodnim žarkom lastnosti elektronov. Prvi je spoznal, da v svojih poskusih razbija atome.

Leta 1911 je Ernest Rutherford (1871-1937) objavil rezultate sipanja delcev α na atomih, ki so dokazovali obstoj trdnega jedra. Osem let pozneje se je Rutherfordu posrečila prva umetna sprememba jedra. Dušik je obstreljeval s 5 do 8 MeV delci α , ki so nastali pri razpadih radija in torija in dobil protone (Livingston, 1962, 4). Ob protonih so leta 1925 v Wilsonovi celici opazili še kratko sled kisikovega izotopa ^{17}O .

Po prvi svetovni vojni so raziskovalci rentgenskih žarkov razvili naprave, v katerih so delci dosegali energije 100



Slika 1. Ernest Rutherford (1871-1937), angleški fizik, ki je leta 1919 prvi razgradil atomsko jedro

do 200 keV. Zaradi težav pri izolaciji in zaradi razelektritev ni bilo mogoče doseči višjih energij, primerljivih z energijo žarkov radioaktivnih elementov, ki jih je uporabljal Rutherford. Preseganje teh težav je postala ena osnovnih usmeritev raziskovalcev. Kazalo je, da bo mogoče kmalu sistematično preučevati oziroma razbijati novoodkrita jedra atoma v pospeševalnikih z dovolj visokimi energijami.

Tekma za razbitje jedra

Ernest Orlando Lawrence (1901-1958) je bil vnuk norveškega učitelja, ki je emigriral v Madison, Wisconsin. Rojen je bil v majhni vasici Canton v Južni Dakoti 8.8.1901. Nobelovo nagrado iz fizike je dobil leta 1939.

Nekega pomladnega večera leta 1929 je Lawrence slučajno naletel na razpravo v reviji Archiv für Elektrotechnik manj znanega Norvežana Rolfa Wideröa, ki je delal pri Brown-Boveri Company v Švici. Pisanja si ni ogledal od začetka, dokler ni njegove pozornosti pritegnila skica merilne naprave.

Ideja Šveda Gustava Isinga iz leta 1924, ki jo je uporabil Wideröa leta 1928, je zadevala poznejši betatronski in

* Stanislav Južnič je profesor fizike in računalništva na srednji šoli v Kočevju. Leta 1980 je diplomiral iz tehnične fizike na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo, magistriral pa leta 1984 iz zgodovine fizike na Filozofski fakulteti v Ljubljani.



Slika 2. Ernest O. Lawrence (1901-1958) s svojim prvim ciklotronom

linearni resonančni pospeševalnik. Ni bila povsem nova. To metodo pospeševanja si je zamislil že Karl Taylor Compton (1887-1954), predsednik MIT, na primeru otroka na gugalnici. Vedel je, da s porivanjem v enakih časovnih presledkih lahko gugalnica zaniha do zelo velikih višin, če ravno jo je vsako porivanje premaknilo le za majhno razdaljo.

V Isingovem namišljenem aparatu naj bi hitrost linearno naraščala z energijo, kar ni bilo primerno za elektrone določene energije. Wideröu se je posrečil poskus z resonančnim pospeševanjem natrijevih in kalijevih ionov. Med tri valjaste elektrode je postavil presledka, dolga po 15 cm. Oscilator je naravnal na frekvenco malo nad 1 MHz s potencialnimi razlikami 20-50 kV. V takšnem linearnem pospeševalniku je pospešil ione do energij, ki so ustrezale dvakratni vrednosti izbrane napetosti. Tako je potrdil možnost, da lahko z majhno napetostjo damo izstrelkom zaznavno hitrost, če jo le dodajamo v pravilnih presledkih.

Lawrence je že dolgo iskal pot, po kateri bi se ognil visokofrekvenčnim tokovom v svoji zapleteni napravi, v kateri je pospeševal izstrelke do ogromnih hitrosti v izpraznjeni posodi. Tako je Wideröeva ideja pri njem padla na plodna tla. V nekaj minutah je narisal aparat in zapisal enačbe. Naslednji dan je prijatelju že poročal o izumu.

Zamisel Lawrencea je bila, da naj bi električno nabiti izstrelke krožil v močnem magnetnem polju. Izstrelke je najprej dobil močan pospeševalni sunek v recipientu v praznem prostoru v obliki ponve, opremljene s pokrovom. Lawrence je nato izstrelke pospeševal s ponavljajočimi se električnimi sunki, zaradi katerih je izstrelke krožil po vedno širših krogih z vedno višjimi hitrostmi. Končno je izstrelke zadel rob recipienta in rina prehodu skozi razpoko priletel v merilni prostor. Tam so z izstrelki obstreljevali jedra atomov.

Lawrence je nastavljal gostoto magnetnega polja tako, da je izstrelke priletel ravno v trenutku, ko je izmenični tok spremenil svojo smer in je bil pripravljen za sprejem naslednjega sunka. Nihanja visoke frekvence je uporabljal za povečevanje hitrosti izstrelka. Lawrence je upal, da bo s tisočkrat uporabljenimi tisoč volti dobil enak učinek, kot če bi enkrat uporabil milijon voltov.

Januarja 1930 je konstruiral prvi pospeševalnik na resonanco, kasneje imenovan ciklotron. Med pola elektromagneta je postavil izčrpano posodo premera 10 cm. Znotraj posode je postavil dve izolirani elektrodi v obliki črke D, povezani z izmenično napetostjo visoke frekvence. Drugi deli naprave so bili iz stekla, ki ga je hermetično zatesnil z voskom.

Ob pomoči diplomanta N.E. Edlfsena je dobil resonanco. Septembra 1930 je Lawrence na seji nacionalne akademije znanosti v Berkeleyu prvič javno poročal o svoji napravi na krožno magnetno resonanco in objavil razpravo v reviji Science skupaj z Edlfsenom (Jaffe, 1944, 441; Wilson, 1981, 88; Livingston, 1962, 134).

Lawrencov ciklotron je bil sprva namenjen raziskovanju strukture atomov. Po prvem modelu iz stekla je Lawrence s pomočjo svojega učenca Livingstona sestavil drugo, podobno napravo iz kovine. S napetostjo 2000 V je lahko pospešil vodikove ione do energij 80 keV. Livingston je v doktoratu z dne 14.4.1931 demonstriral veljavnost principa ciklotronske resonance (Livingston, 1962, 134).

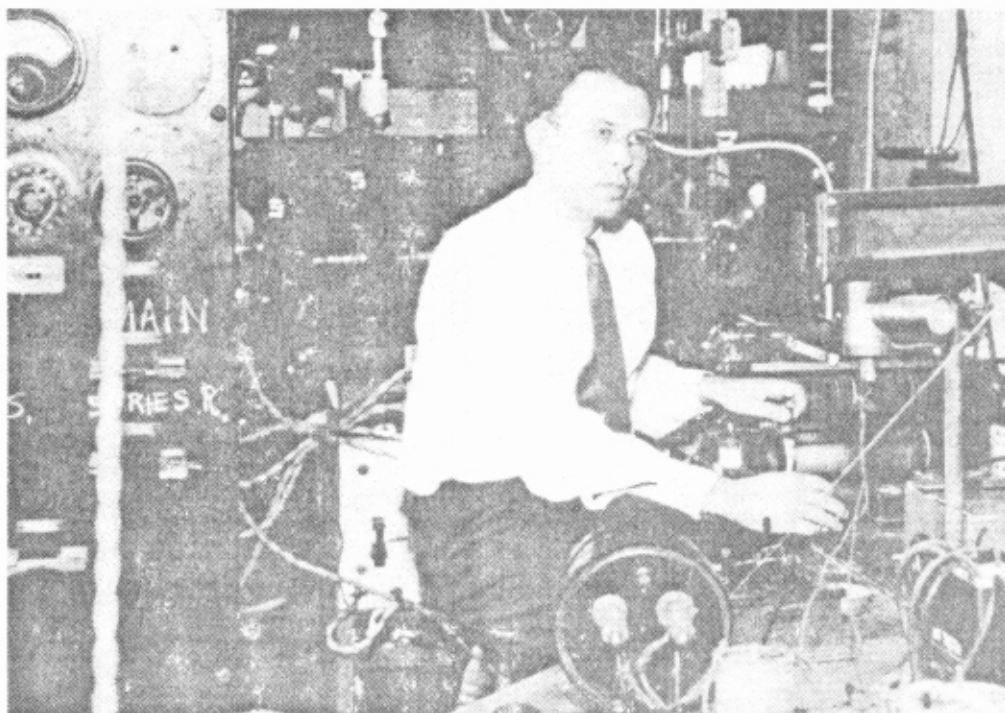
Februarja 1932 je Lawrence zgradil model, vreden 1000 USD, velikosti 30,5 cm in s pospeševalno napetostjo 1.2 MV. Poleti 1932 je Lawrence s svojo napravo prvi v Novem svetu razbil litijevo jedro.

Angleži dobijo tekmo

Lawrence in Livingston sta bila prva, ki sta pospešila protone nad 1 MeV. Kljub temu pa nista prva razbila jedra atoma. To se je posrečilo v Cavendishevem laboratoriju Angležu Cockcroftu in Ernestu Thomasu Sintonu Waltonu, rojenemu leta 1903 na Irskem.

Vodja laboratorija Rutherford je sprva nasprotoval dragim investicijam v pospeševalnike. Vlekla ga je romantika pretekle generacije, ko je bilo mogoče s primitivnim orodjem dobiti pomembna fizikalna odkritja. Leta 1927 pa je v govoru pred Royal Society že napovedoval naprave s 300 in 900 kV, ki bodo omogočale preučevanje strukture atomskega jedra. Konec leta 1928 je napolil Cockcrofta k začetku del na visokonapetostnem pospeševalniku, kjer se mu je naslednje leto pridružil še Walton. Prvi poskusi so bili opravljeni marca 1930.

Marca 1932 sta Cockcroft in Walton preuredila napravo za obstreljevanje litijevih jeder s protoni. Pri 125 kV sta že opazila veliko močnih scintilacij, ki jih je bilo pri 400 kV že več sto v minuti pri toku protonov nekaj μA . Zaradi iskrenja sta Cockcroft in Walton lahko ohranjala napetost



Slika 3. Ernest C. Lawrence s svojim ciklotronom iz leta 1934, premer ciklotrona je bil 67,5 cm.

le do pol milijona voltov, po drugih virih tudi 600 in 700 kV. Rutherford je kljub temu spodbujal poskus. Verjel je teorijam Gamowa (1928) ter Condon in Gurneya (1929), po katerih naj bi že 0.5 MeV ali manj zadostovalo za razbitje lahkih jeder (Livingston, 1963, 4), čeprav so drugi raziskovalci predvidevali prodor v jedro šele pri napetostih okoli 1 MV.

Po trku protonov z litijevimi jetri v Cavendishevem laboratoriju so nastajali delci z največjim dosegom okoli 8 cm. To je dokazovalo, da gre za delce α , kar so potrdili še posnetki v Wilsonovi celici. Jedro atoma je bilo prvič moč razbijati kontrolirano, alkimije je postala realnost.

20.4.1932 je Rutherford poročal o uspehih Cockcrofta in Waltona pred Royal Society. Angleži so dobili tekmo in pokazali, da gre vendarle za fiziko in ne zgolj za moč uporabljenega orodja. Ugotovili so tudi masni defekt 0.018574 a.m.e., ki je ustrezal napovedim Einsteinove enačbe. Podobne poskuse so opravili tudi z borom, fluorom in aluminijem. Scintilacije so dobili tudi pri poskusih z berilijem in ogljikom, ne pa s kisikom in bakrom pri obstreljevanju s protoni energije do 4 keV (Staroseljskaja, 1967, 258-261). Podobne transmutacije atomov je leta 1935 preučeval tudi Lawrence.

Kmalu je Cockcroft-Waltonov pomnoževalnik napetosti lahko dosegal 750 kV. Pozneje so na osnovi njihovih načrtov pri družbi Philips v Eindhoven postavili za Cavendishev laboratorij napravo, ki je dosegala 1,25 MV. Izkazalo se je, da je to praktična meja, ki jo lahko doseže pospeševalnik tega tipa v zraku pri atmosferskem tlaku (Livingston, 1962, 5).

Rutherford je dobil Nobelovo nagrado iz kemije leta 1908, leta 1951 pa sta si Cockcroft in Walton delila Nobelovo nagrado iz fizike za uspehe pri razvoju pospeševalnikov.

Pospeševalniki prerastejo v "big science"

William Brobeck je bil prvi profesionalni inženir, ki je leta 1938 nastopil službo pri Radiation Laboratory. Prav on si je najbolj prizadeval za spremembo prejšnje tehnologije "niti in voska" v sodobno inženirsko prakso (Wilson, 1981, 97).

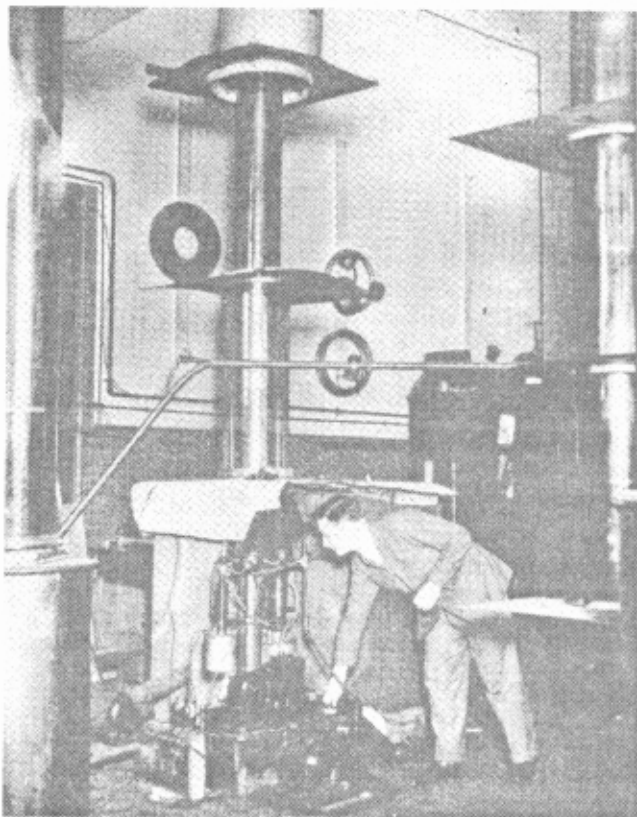
V tridesetih letih je Lawrence sestavil ciklotron velikosti 70 cm, ki je dajal nekaj mikroamperov toka devteronov z energijo 5 MeV ali helijevih jeder z energijo 10 MeV. Pol velikega elektromagneta je imel premer 114 cm in je bil zakopan v zemljo do višine kuhinjske peči. Komandni prostor je bil 5 m višje, operaterja pa je varovala pred sevanjem še dodatna zaščitna ovojnica.

Leta 1939 je Lawrence postavil svoj ciklotron velikosti 70 cm v večji ciklotron velikosti 1,5 m, ki je bil postavljen za medicinska preučevanja raka. Večji ciklotron je bil težak 220 ton in je dajal tok devteronov 10 mA s 16 MeV ali pa tok 1 mA helijevih ionov z energijami po 32 MeV.

Julija 1941 je Lawrence začel v Berkeleyu zidati zgradbo s 24 stranicami. Visoka je bila 30 m, s 50 m premera, vanjo pa naj bi postavili ciklotron do tedaj še ne dosežene moči. Dela so se nadaljevala tudi po napadu na Pearl Harbour 7. decembra, saj je bilo mogoče pričakovati tudi dejavnosti za vojaške potrebe (Jaffe, 1944, 456-457). Ta 467 cm velik sinhrociklotron je bil končan po vojni leta 1949. Stal je 1,8 milijonov USD in je dosegal 340 MeV, po drugih virih 380 MeV. Leta 1887 rojeni Američan Alfred Lee Loomis, bankir multimilijonar in znanstvenik, je bil posebno zaslužen za zbiranje potrebnega denarja (Alvarez, 1983, 31).

Da bi presegli prag ~100 MeV, ki nastane zaradi naraščanja mase pospeševanih delcev, so uporabili idejo Američana McMillana in Rusa Vladimirja Vekslerja (1907-

1966) iz let 1944 in 1945 o sinhronizaciji magnetnega in električnega polja. Tako so dosegli stalno pospeševanje ionov v sinhrociklotronu (Lapp, 1960, 183; McMillan, 1984, 31).



Slika 4. Cockcroft-Waltonov generator napetosti (do 750 kV) v Cavendishovem laboratoriju.

McMillan je leta 1951 dobil Nobelovo nagrado iz kemije za odkritje transuranskih elementov.

Van de Graaffov pospeševalnik

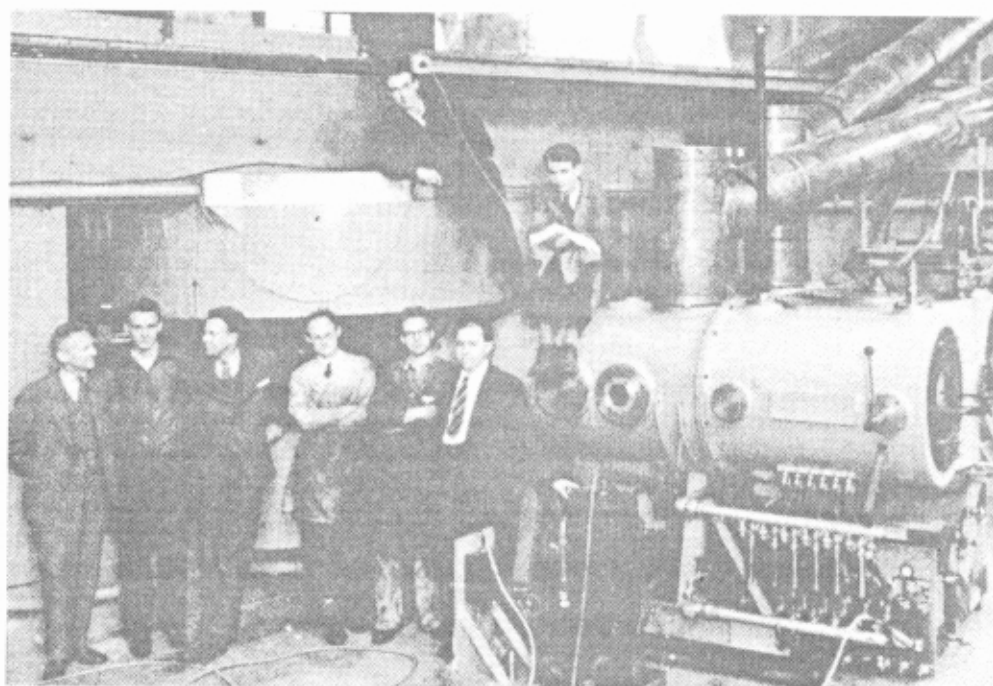
Že leta 1748 je Benjamin Franklin (1706-1790) delal poskuse s strelo. Poskus, da bi energijo strele ujel v kondenzator, je leta 1753 v Petrogradu spravljal ob življenju Georga Wilhelma Richmana (1711-1753).

Tudi med tekmo za razbijanje atomov v tridesetih letih so raziskovalci vedeli, da so napetosti pri streli 15 MV, kar je bilo precej več, kot so v laboratorijih lahko takrat uporabljali za pospeševanje delcev. Zato so Brush, Lange in Urban delali poskuse na gori Generoso v Švici. Med dvema skalama so napeli kovinsko mrežo, na kateri se je nabiral pozitiven naboj. Pri posebno močni streli so lahko dobili iskro dolgo 5 m, ki je ustrezala napetosti 10 MV. Vendar se je Urban med poskusom smrtno ponesrečil (Karcev, 1969, 53).

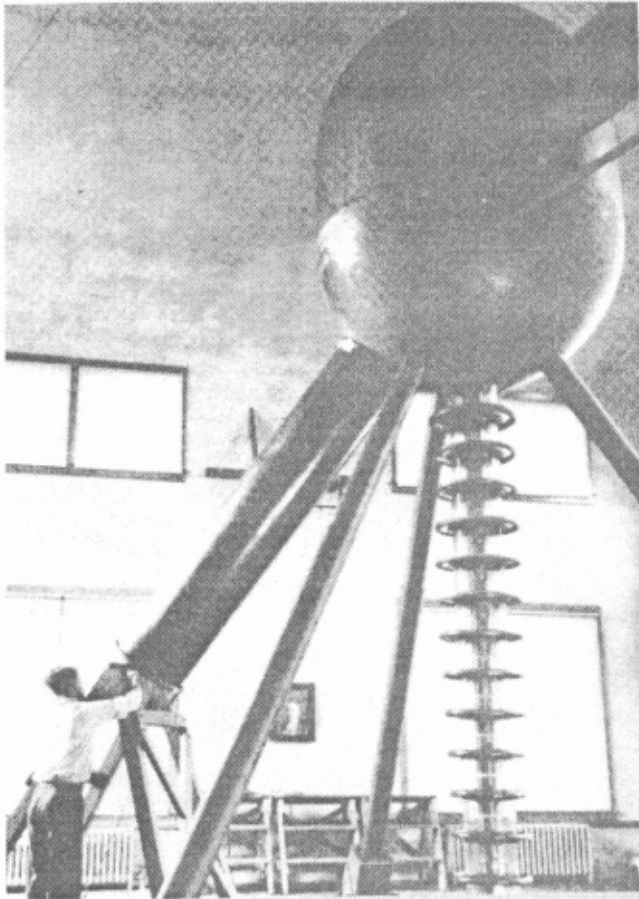
Med leti 1919-1932 so pospeševalnike gradili s pomočjo generatorjev visoke napetosti, ki so neposredno pospeševali nabite delce v konstantnem električnem polju. Razvoj takšnih naprav je bil okronan z elektrostatskim Van de Graaffovim generatorjem leta 1931 in kaskadnim generatorjem Cockcrofta in Waltona leto pozneje.

Robert Jemison Van de Graaff (1901-1967) iz Alabame je uporabil transformator za povečevanje napetosti in s tem sledil starim idejam Olta von Guericka iz leta 1671. Idejo o nabijanju elektrostatskega generatorja s tekočim trakom je prvi predlagal Augusto Righi (1850-1920) okoli leta 1890. Priredil je starejšo Kelvinovo zamisel o generatorju na nabite kapljice vode.

Carl T. Compton s fizikalnega oddelka univerze v Princetonu je podprl idejo svojega sodelavca Van de Graaffa. Tako je leta 1929 nastal prvi model. Leta 1931 je dosegel napetost 1.5 MV, o čemer je poročal pred Ameriško fizikalno družbo (Livingston, 1963, 31-32).



Slika 5. Ciklotron s premerom 1.5 m, ki so ga leta 1939 postavili Lawrence in sodelavci. Z leve proti desni stojijo: Donald Cooksey, Dale Corson, Ernest O. Lawrence, Robert Thornton, John Backus in Winifield W. Salisbury; sedita Louis W. Alvarez (levo) in Edwin M. McMillan (desno).



Slika 6. Prvi Van der Graaffov elektrostatični pospeševalnik, ki so ga leta 1930 zgradili Merle A. Tuve, Odd Dahl in Lawrence Fafstad v Carnegie Institution v Washingtonu.

Leta 1932 je Van de Graaff prešel na MIT, kjer je ob Comptonovi podpori začel delati na močnejših generatorjih. Istočasno so Merle A. Tuve, Odd Dahl in Lawrence Hafstad v Carnegie Institution v Washingtonu zgradili prvi praktični Van de Graaffov elektrostatični pospeševalnik (Livingston, 1963, 33). To je bila ena prvih naprav, ki je omogočala pospeševanje do energije okrog 1 MeV, potrebne za prodor v jedro atoma.

Leta 1933 je Van de Graaff sestavil napravo "Grosse Bertha" iz dveh delov, ki sta tehtala po 16 ton. Skrbno polirana krogla iz aluminija premera 5 metrov in debeline 6 mm je bila postavljena na vrh izoliranega valja, ki je imel premer 7.5 m in višino 2 m. V votli valj je bil speljan premikajoči se jermen iz svile ter nanj prenašal naboj iz visokonapetostnega usmernika. Pozneje je Westinghouseova električna družba na enakih principih postavila velikansko hruškasto napravo za razbijanje atomov v predmestju Pittsburga (Jaffe, 1944, 445-446).

Van de Graaffov pospeševalnik pri nas

27.11.1954 je v laboratoriju Edvarda Cilenška "za gradnjo in vzdrževanje akceleratorjev (E3)" delal že električni del Van de Graaffovega pospeševalnika lastne izdelave pri tlaku 1 atmosfere. Domači znanstveniki so za napravo sami napravili načrte, sami konstruirali, sestavljali in preizkušali posamezne dele.



Slika 7. Donald W. Kerst s svojim prvim betatronom (2.3 MeV), ki ga je zgradil leta 1940 na Univerzi v Illinoisu.

Celotna gradnja pospeševalnika je trajala nekaj več kot štiri leta, med leti 1953 in 1957. Zgradili so napravo zaprtega tipa, ki je obratovala pod tlakom 10 atmosfer dušika. Lahko so fokusirali elementarne delce na tarčo v območju med 200 kV in 2,3 MV. Za visoki vakuum v pospeševalni cevi so uporabili difuzijsko črpalko s sesalno hitrostjo 500 l/s (Cilenšek, 1958, 188, 394 in 396).

Maja 1956 so prvič pospešili žarek skozi cev pri napetosti 2 MV. Marca 1961 je bil pospeševalnik dokončan in od takrat v skoraj stalnem obratovanju.

Leta 1963 so z Van de Graaffovim pospeševalnikom preučevali strukturo nivojev v lažjih elementih s pomočjo reakcije (p,γ) . Vendar je bila naprava za raziskave v jedrski fiziki že zastarela, podobno kot betatron in nevtronski generator (Kroflič, 1989, 19, 20, 22, 23, 26, 28, 30 in 31).

Pospeševalniki elektronov

Prvi pospeševalnik elektronov je bila "katodna cev", ki so jo uporabljali že pred poldrugim stoletjem. V 20. stoletju so elektrone najprej pospeševali z napravami Van de Graaffa, s katerimi pa ni bilo mogoče preseči nekaj MeV. Ciklotron ni bil uporaben, saj začne masa pospeševanih elektronov zaznavno naraščati že pri nekaj 10 keV.

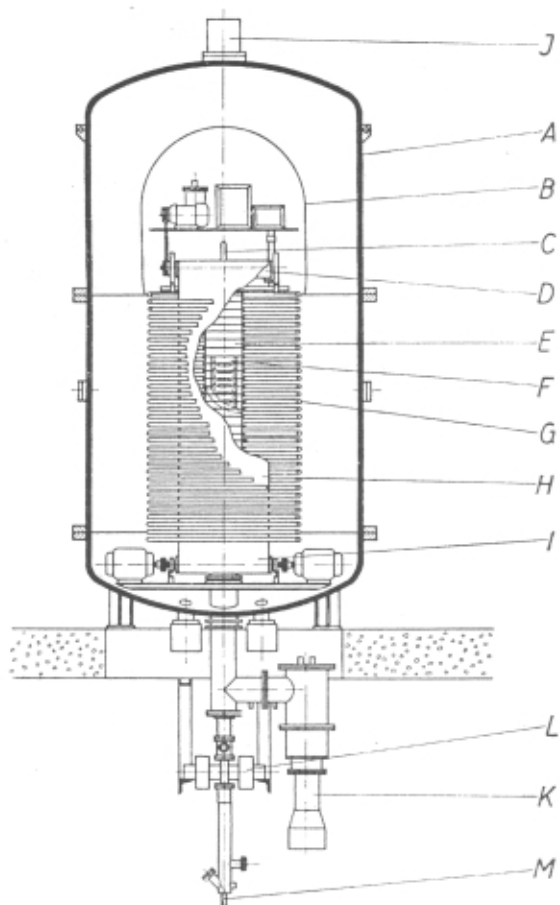
Ameriški inženir Slepian in Wideröe zato v tridesetih letih nista dosegla večjih uspehov pri pospeševanju elektronov. Leta 1933 je M. Steenbeck pri Siemens Röhrenwerk matematično formuliral pogoje za stabilnost polja v pospeševalniku (Siemens, 1957, II, 195).

Američan Kerst z univerze Illinois je leta 1940 konstruiral betatron, ki je uporabljal zakon elektromagnetne indukcije in dosegal 2,3 MeV. Uporabil je Wideröevo idejo "pretvornika curka" iz leta 1928, ki je zadevala magnetni indukcijski del betatrona. Vendar Wideröe še ni poznal zakonitosti, s katerimi lahko obdržimo elektrone v orbiti (Abramov, 1977, 101; Laughlin, 1983, 29; Livingston, 1962, 134; Kerst, 1941, 48).

Betatron pri nas

Poleti leta 1954 so na Institutu Jožef Stefan kupili betatron. Leta 1956 se je Darku Jamniku posrečilo pri energiji 20 MeV doseči stabilizacijo na 5 keV. Tako je bil betatron

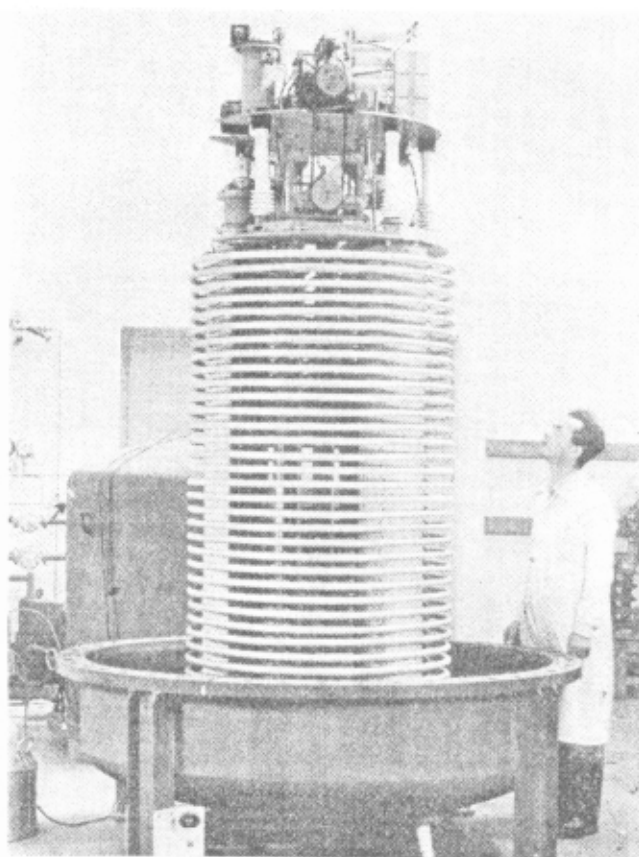
na IJS v območju energij do 30 MeV najnatančnejša naprava na svetu za raziskovanje jedrskega fotoefekta (Kroflič, 1989, 19, 20, 22 in 23).



Slika 8. Prerez elektrostatskega pospeševalnika za 2 MV na Inštitutu Jožef Stefan v Ljubljani (A - kotel, B - visokonapetostna elektroda, C - ionski izvir, D - gornji valj, E - pospeševalna cev, F - elektrode, G - koronski obroči, H - trak, I - spodnji valj, J - rotacijski voltmeter, K - difuzijska črpalka, L - masni separator in M - tarča)

LITERATURA

- Alvarez Luis Walter (rojen 1911), Alfred Lee Loomis - last great amateur of science, *Physics today*, januar 1983, 25-34
- Cilenšek Edvard, Elektrostatski pospeševalnik na Inštitutu "Jožef Stefan" v Ljubljani, *Elektrotehnični vestnik*, (1958) 187- 192 (I del) in 393-397 (II del)
- Cockcroft John Douglas (1897-1967), *Scattering the atom*, v zborniku: *Science lifts the veil*, Longmans Green & Co. Ltd, Cambridge, 1944



Slika 9. Elektrostatski pospeševalnik za 2 MV z odkritim kotlom in odkrito visokonapetostno elektrodo, zgrajen na Inštitutu Jožef Stefan.

- Jaffe Bernard, *Savant Americans*, Overseas editions, INC., New York, 1944
- Karcev V., *Novelli o fizike*, Znanie, Moskva, 1969
- Kerst Donald William (rojen 1911), *The Acceleration of Electrons by Magnetic Induction*, *Phys.Rev.* 60 (1941) 47-53
- Kroflič Marjan, 40 let Inštituta "Jožef Stefan", Ljubljana, maj 1989
- Lapp Ralph E., *Roads to discovery*, Harper & Brothers Publishers, New York 1960
- Laughlin John S., *History of medical physics*, *Physics today*, julij 1983, 26-33
- Livingston Milton Stanley (rojen 1905) in John P. Blewett, *Particle accelerators*, McGraw-Hill, 1962
- McMillan Edwin Mattison (rojen 1907), *A history of the synchrotron*, *Physics today*, februar 1984, 31-37
- Siemens Georg, *History of the house of Siemens*, II, Karl Alber, Freiburg/Munich, 1957
- Starosejskaja-Nikitina O.A., *Ernest Rutherford*, Nauka, Moskva, 1967
- Wilson R.R., *US particle accelerators at age 50*, *Physics today*, november 1981, 86-103