

HRVATSKA ENCIKLOPEDIJA

SVEZAK V



DILATACIJA — ELEKTRIKA

NAKLADA HRVATSKOG IZDAVALAČKOG BIBLIOGRAFSKOG ZAVODA

TISAK - BAKROTISAK - OFFSET TIPOGRAFIJA
ZAGREB 1945

ENCYCLOPAEDIA CROATICA

TOMUS V



DILATACIJA — ELEKTRIKA

SUMPTIBUS INSTITUTI BIBLIOGRAPHICI CROATICI, ZAGREBIAE

IN AEDIBUS „TYPOGRAPHIAE“, ZAGREBIAE MCMXLV

POPIS SURADNIKA U V. SVEZKU PO INICIALIMA

- A. A. Alfred Albini ing., sveuč. docent, Zagreb.
 A. B. Albert Botteri dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 A. B-a. Albert Bazala dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 A. B-c. Antun Barac dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 A. B-ć. Aleksandar Blašković dr., sveuč. prof., Zagreb.
 A. B-n. Antun Belan, rudar. viši pristav Glav. ravnateljstva rudarstva, Zagreb.
 A. D. Antun Dabinović dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 A. G-s. Aleksandar Gahs dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 A. H. Andrija Hupbauer dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 A. H-r. Albert Haller dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 A. I. Antun Ivachnjuk ing., arhitekt, Zagreb.
 A. J-k. Antun Jiroušek, ravnatelj muzeja u m., Zagreb.
 A. L. Alfred Leitner dr., docent EKVŠ, Zagreb.
 A. M. S. Antun Messner-Sporšić dr., profesor, Zagreb.
 A. Mi-ć. Ante Milošević, kanonik prepošt, Kotor.
 A. N. Alija Nametak, profesor, Sarajevo.
 A. O. Albert Ogrizek dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 A. Ob. Ante Obuljen, asistent Geofiz. zavoda, Zagreb.
 A. P. Aleksandar Primožić dr., nadsavj. Min. obrta, veleobrtar i trgovine, Zagreb.
 A. P-ć. Andrija Petračić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 A. S. Aleksandar Sutlić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 A. Sch. Artur Schneider dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 A. S-v. Aleksandar Solovjev dr., sveuč. prof., Beograd.
 A. Š-k. Antun Šimčik, književnik, Zagreb.
 A. Š-r. Andrija Štampar dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 A. T. H. Aleksandar Tinti-Halper Sigetski dr., ravnatelj »Croatiae«, tvornice portland cementa, Zagreb.
 A. T-k. Antun Trstenjak dr., sveuč. docent, Ljubljana.
 A. V-ć. Ante Vuletić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 A. Ž. Andrija Živković dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 Al. B. Aleksandar Bistrițeanu, sveučilišni asistent, Bukurešt.
- B. A. Branka Akačić dr., mr. ph., sveuč. asistent, Zagreb.
 B. B-ć. Branimir Bratanić dr., sveuč. asistent, Zagreb.
 B. D. Branko Dragišić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 B.D. Branislav Đurđev, arhivar Hrv. drž. muzeja, Sarajevo.
 B. E. Bertold Eisner dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 B. O. Božidar Oklješa dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 B. S. Bogoljub Strižić dr., D. I., prof. Viš. bog. uč., Split.
 B. Š. Božidar Širola dr., upravitelj Hrv. etnografskog muzeja, Zagreb.
 B. Š-ć. Božidar Špišić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 B. V. Boris Vrtar dr., sveuč. asistent, Zagreb.
 B. Z. Bartol Zmajčić barun, čin. Drž. arhiva, Zagreb.
 B. Z-k. † Boris Zarnik dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- Č. V. Čedomil Veljačić, nastavnik Grad. škole, Vis.
 Č. T. † Ćiro Truhelka dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- D. B-ć. Dragutin Barković dr. ing., ravn. Bolnice milosr. sestara, Zagreb.
 D. C. Drago Cvetko, prof. konzervatorija, Ljubljana.
 D. F. A. Drago F. Andričević, prokurista Prve hrv. šted., Zagreb.
 D. G. Dušan Grabrijan ing., Sarajevo
 D. H. Dragutin Horvat ing., sveuč. docent, Zagreb.
 D. I-ć. Dragutin Ilančić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 D. K. David Karlović dr., profesor EKVŠ, Zagreb.
 D. K-d. Dragutin Kniewald dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 D. P. Dragoljub Pavlović dr., sveuč. prof., Beograd.
 D. P-ć. Dušan Pejnović dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 D. S-ć. Dinko Sučić dr., sveuč. docent, Zagreb.
- Đ. G. Đuro Gračanin dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 Đ. K. Đuro Kurepa dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 Đ. N. Đuro Nenadić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 Đ. S. Đuro Stipetić ing., sveuč. profesor, Zagreb.
- E. F. S. Eros Francesco Sequi, lektor, Zagreb.
 E. L. Emilije Laszowski, ravnatelj Drž. arhiva u m., Zagreb.
- E. M. Ernest Mayerhofer dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 E. M-s. Ernest Marks dr. ing., prof. EKVŠ, Zagreb.
 E. R. Ernest Radetić, čin. Grad. elektr. centrale, Zagreb.
 E. S. Eugen Sladović dr., prof. EKVŠ, Zagreb.
 E. Š. Emil Štampar dr., sveuč. asistent, Zagreb.
- F. B. Franjo Bučar dr., profesor, Zagreb.
 F. B-ć. Franjo Bošnjaković dr. ing., sveuč. profesor, Zagreb.
 F. B-r. Franjo Benzinger dr., profesor, Zagreb.
 F. C. Franjo Car, publicist, Zagreb.
 F. D. Franjo Durst dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 F. F. † Franjo Fancev dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 F. G-ć. Ferdo Grospić dr., primarij Zakladne bolnice, Zagreb.
 F. I. Franjo Ivaniček dr., profesor, Zagreb.
 F. K. Franjo Kogoj dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 F. K-ć. Franjo Kranjčević dr. ing., profesor EKVŠ, Zagreb.
 F. K-k. Fran Kesterčanek dr., odvjetnik, Dubrovnik.
 F. K-n. Fran Kušan dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 F. M-ć. Franjo Margetić, observator Geofiz. zavoda, Zagreb.
 F. O. Franjo Operman dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 F. Š. Fran Šuklje dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 F. Š-c. Franjo Šanc dr., D. I., priv. doc., Zagreb.
 F. T. Fran Tučan dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 Fr. H. Franjo Herman dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- G. C. N. G. C. Nicolescu, sveuč. asistent, Bukurešt.
 G. Cv. Gabro Cvitanović dr., prof. Viš. bogosl. učil., Makarska.
 G. D. Giuseppe Donnini dr., profesor, Zagreb.
 G. K. Georgije Konstantinov, književnik, Sofija.
 G. N. Grga Novak dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 G. Š. Gustav Šamšalović dr., profesor VPS, Zagreb.
- H. B. Hiacint Bošković dr., prof. teol., Dubrovnik.
 H. I. Hrvoje Iveković dr. ing., teh. nadz. Zdravstv. zavoda, Zagreb.
 H. K. Hamdija Kreševljaković, profesor, Sarajevo.
 H. L. Hinko Luterotti, poručnik bojnog broda, Zagreb.
 H. Š. Hazim Šabanović, kustos Hrv. zem. muzeja, Sarajevo.
 H. U. Horia Ursu, sveuč. asistent, Bukurešt.
- I. B-t. Ivan Botteri dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 I. E. Ivan Esih dr., savjetnik Min. nar. prosvjete, Zagreb.
 I. F-ć. Ivan Filipović ing. kem., viši rudarski pristav, Zagreb.
 I. H. Ivo Horvat dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 I. H-t. Ivo Horvat ing., sveuč. asistent, Zagreb.
 I. I. Ivo Ivančević dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 I. J-s. Ivo Juras, upravitelj učit. škole u m., Zagreb.
 I. P. Ivan Pevalek dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 I. P-ć. Ive Prčić, novinar, Subotica.
 I. R-g. Ivan Rittig, sveuč. profesor, Zagreb.
 I. R-o. Ivan Rendeo, upravitelj gimn. u m., Zagreb.
 I. S-ć. Ivo Sučić, činovnik HIBZ-a, Zagreb.
 I. Sr-ć. Ivo Srebrenić, profesor, Zagreb.
- I. Š. Ivan Šmaljcely dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 I. Š-l. † Ivo Šrepel, upravitelj Hrv. drž. galerije umjetnosti, Zagreb.
- J. A. Juraj Andrassy dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 J. A-ć. Josip Andrić dr., urednik Knjiž. društva sv. Jeronima, Zagreb.
 J. An-s. Josip Andreis, profesor, Zagreb.
 J. B. Josip Badalić dr., knjižničar Hrv. nar. i sveuč. knjiž., Zagreb.
 J. B-ć. Julije Benešić, profesor, Zagreb.
 J. B-d. Julije Budisavljević dr., sveuč. prof., Zagreb.
 J. Bu-k. Jozo Budak dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 J. B-ž-ć. Juraj Božičević, sveuč. profesor, Zagreb.

- J. D. Josip Demarin, profesor VPŠ, Zagreb.
 J. D-e. Jean Dayre, upravitelj Franc. inst., Zagreb.
 J. D. M. Jeremija D. Mitrović, novinar, Beograd.
 J. G-č. Joža Gregorić, svećenik, Zagreb.
 J. Gl-r. Josip Glaser dr., predst. živč. odjela Bolnice milosrdnica, Zagreb.
 J. H-m. Josip Hamm dr., profesor, Zagreb.
 J. H-t. Josip Horvat, publicist, Zagreb.
 J. J-ić. Josip Jelašić dr., sudac, Zagreb.
 J. K-j. Janko Kalaj dr., profesor, Zagreb.
 J. L. Josip Lončar dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 J. L-k. Josip Letnik dr., observator Geofiz. zavoda u m., Zagreb.
 J. N. Josip Nagy dr., profesor EKVŠ, Zagreb.
 J. O. Janko Oberški dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 J. P-k. Josip Poljak dr., uprav. Geolož. muz., Zagreb.
 J. R-č. Josip Roglić dr., profesor VPŠ, Zagreb.
 J. R-ić. Josip Rakamarić ing., nadstojnik carinskog laboratorija, Zagreb.
 J. S. Jaroslav Sakač, sveuč. profesor, Zagreb.
 J. Š. Josip Steller dr., tajnik Drž. riznice, Zagreb.
 J. Š-k. Jaroslav Šidak dr., sveuč. docent, Zagreb.
 J. T-a. Josip Torbarina dr., sveuč. docent, Zagreb.
 J. Tbk. Josip Tabak, publicist, Zagreb.
 J. Ž. Joža Živković, profesor, čin. Drž. riznice, Zagreb.
 K. B. Krunoslav Babić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 K. B-č. Karlo Balić dr., prof. Anthonianuma, Rim.
 K. B-k. Kamilo Bošnjak, bankovni ravnatelj, Zagreb.
 K. D-č. Krunoslav Draganović dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 K. G. Karlo Grimm dr., provincial D. I., Zagreb.
 K. K. Kosta Kerofilas dr., književnik, Atena.
 K. K-č. Kruno Krstić dr., sveuč. asistent, Zagreb.
 K. K-i. Karlo Kempni dr., sveuč. docent, Zagreb.
 K. R. V. Konstantin Rimarić-Volinski, profesor, Sisak.
 K. T. K. Kruna Tomić Karović dr., sveuč. docent, Zagreb.
 L. B-č. Lovro Bosnić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 L. K-č. Lovre Katić dr., profesor VPŠ, Zagreb.
 L. T. Lujó Thaler dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 Lj. A. Ljudevit Andrassy dr., sveuč. prof., Zagreb.
 Lj. B-č. Ljudevit Barić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 Lj. J. Ljudevit Jurak dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 Lj. J-e. Ljudevit Jonke, sveuč. asistent, Zagreb.
 Lj. K. Ljubo Karaman dr., upravitelj Konzervatorskog zavoda, Zagreb.
 Lj. M. Ljubomir Maraković dr., profesor VPŠ, Zagreb.
 M. A. Milan Anić dr., sveuč. docent, Zagreb.
 M. Ab-č. Mihovil Abramić dr., uprav. Arh. muz., Split.
 M. B. Milostislav Bartulica, nadz. Min. unut. poslova, Zagreb.
 M. B-a. Miho Barada dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 M. B-k. Mladen Bošnjak, tajnik Min. vanj. poslova, Zagreb.
 M. B-r. Mirko Breyer, književnik, Zagreb.
 M. B. S. Mira Balen-Sakač, čin. Drž. riznice, Zagreb.
 M. D-c. Milislav Demerec dr., profesor, rav. na Carnegie Inst., Goldspring Harbor.
 M. D-č. Mladen Deželić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 M. D-ić. Mirko Deanović dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 M. F-r. Milan Fišter dr., Zagreb.
 M. G. Mihovil Gračanin dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 M. G-i. Milovan Gavazzi dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 M. H. pok. Mehmed Handžić, knjižničar Gazi Husrev-begove džamije, Sarajevo.
 M. H-j. Muhamed Hadžijahić, čin. Drž. promič. ureda, Zagreb.
 M. H-t. Marijan Horvat dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 M. I. Milan Ivšić dr., profesor EKVŠ, Zagreb.
 M. J. D. Mihajlo J. Dinić dr., sveuč. profesor, Beograd.
 M. K. Marin Katalinić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 M. K-č. † Manes Karninčić, dominikanac, Zagreb.
 M. K-l. Mihovil Kombol dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 M. K-o. Milan Kovačević, profesor, observator Geofiz. zavoda, Zagreb.
 M. K. N. Mirko Kus-Nikolajev, književnik, Zagreb.
 M. L-č. Mihajlo Lanović dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 M. M. Marko Mohaček dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 M. Ma. Milan Marinović dr. ing., sveuč. profesor, Zagreb.
 M. Mi-č. Miroslav Mikuličić ing., satnik ratne morn., Zagreb.
 M. N. Marija Neorčić, profesor, Zagreb.
 M. P-a. Milan Pallua dr., prav. savj. Hrv. banke, Zagreb.
 M. P-č. Mladen Pozajić, profesor Hrvatskog državnog konzervatorija, Zagreb.
 M. Pl. Mladen Pliverić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 M. P-s. Marijan Petras dr., docent VPŠ, Zagreb.
 M. R. Matko Rojnić, knjižničar Hrv. nar. i sveuč. knjižnice, Zagreb.
 M. S-č. Mira Sabljic, kustos Hrv. drž. muzeja za umj. i obrt, Zagreb.
 M. St. Milan Stahuljak dr., profesor, Zagreb.
 M. Š. Milan Šenoa dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 M. Š-č. Marinko Šunjić ing., glavni tajnik Drž. vjerės. zavoda, Zagreb.
 M. T-r. Miroslav Tajder dr., kustos Mineral-petrograf. muzeja, Zagreb.
 M. V. Miroslav Vanino dr., D. I., prof. Viš. bog. uč., Sarajevo.
 M. VI. Milan Vladen ing., profesor Sred. tehn. škole, Zagreb.
 M. Vu. Marko Vunić, profesor, Zagreb.
 N. F. Nikolaj Fedorov, novinar, Zagreb.
 N. F-k. Nikola Fink dr., kustos Zool. muzeja, Zagreb.
 N. K. Nikola Kolarek dr., kanonik, Zagreb.
 N. K-č. Nadko Katičić dr., odvjetnik, Zagreb.
 N. N. Nikola Neidhardt dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 N. P. Nikola Peršić dr., profesor EKVŠ, Zagreb.
 N. Ž. Nikola Žic, profesor, Zagreb.
 O. F. Oton Frangeš dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 O. K. Oto Köster dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 P. B. † Pero Blašković, pukovnik, Zagreb.
 P. Cl. Paul Clavé, nastavnik Franc. instituta, Zagreb.
 P. G. Petar Grgec, upravitelj real. gimn., Zagreb.
 P. J. Petar Jurišić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 P. K. Pavao Kvakan dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 P. M-č. Petar Mardešić, kapetan fregate, Zagreb.
 P. S. Petar Skok dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 P. V-č. Pavle Vujević dr., sveuč. profesor, Beograd.
 R. B-s. Ramiro Bujas dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 R. C. Rudolf Cesarec dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 R. D. Radovan Damaška mr. ph., nadstojnik za ljekarničtvo kod Min. zdrav., Zagreb.
 R. F. Rudolf Filipović, profesor, Zagreb.
 R. G-r. Rudolf Ganslmayer dr., sveuč. prof., Zagreb.
 R. H. Rikard Hauptfeld dr., sveuč. docent, Zagreb.
 R. H-š. Rudolf Habeduš, književnik, Zagreb.
 R. L-č. Radoslav Lopašić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 R. M-r. Rudolf Maixner dr., publicist, Zagreb.
 R. P. Rikard Podhorsky ing., sveuč. asistent, Zagreb.
 R. P-č. Robert Pečić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 R. S. Rudolf Schütz dr., profesor Vis. bog. uč., Dakovo.
 S. A. Stjepan Antoljak dr., sveuč. docent, Zagreb.
 S. B. Slavko Batušić dr., književnik, Zagreb.
 S. B-n. Stjepan Bauerlein, vjeroučitelj, Dakovo.
 S. Bo-č. Srećko Bošnjaković dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 S. F-k. Stanko Frank dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 S. H-č. Stjepan Horvatić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 S. I. Stjepan Ivšić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 S. M. Stanko Miholić dr., upravitelj Zavoda za rud. i kov. iztraživanja, Zagreb.
 S. M. T-č. Seid M. Traljić, činovnik Drž. arhiva, Zagreb.
 S. O. Stanko Ožanić, poljoprivredni savjetnik, Split.
 S. P-č. Stjepan Pavičić, upravitelj gimnazije, Zagreb.
 S. P-i. Stjepan Pataki dr., sveuč. profesor, Zagreb.
 S. S. Sergije Saltykov dr., sveuč. profesor, Zagreb.

- S. S.-i. Stanko Stražnicki, prof. Hrvatskog drž. konzerv., Zagreb.
- S. S. N. Stjepan Szavits-Nossan ing., civilni inženjer, Zagreb.
- S. T. † Stjepan Tropsch dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- S. Ž. Slobodan Žarković, profesor, Zagreb.
- Sl. P.-ć. Slavko Pavičić dr., publicist, Zagreb.
- St. B. Stjepan Bakšić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- St. F. Stanko Filipović dr., profesor Trg. akademije, Zagreb.
- St. H. Stanko Hondl dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- St. Z. Stjepan Zimmermann dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- Š. S. Šaćir Sikirić dr., prof. Šeriat. akad., Sarajevo.
- T. C. Tudor Ciortea, kompozitor, Bukurešt.
- T. H. † Teofil Harapin dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- T. M. Tijas Mortigijja, profesor, Zagreb.
- T. M.-ć. Tomo Matić dr., predsjednik Hrvatske akademije, Zagreb.
- T. P.-r. Tomislav Pinter dr., sveuč. asistent, Zagreb.
- T. V. Teodor Varićak dr., sveuč. docent, Zagreb.
- U. Središnje uredništvo Hrvatske Enciklopedije.
- U. T. Uroš Tešanović, general, Beograd.
- V. B. Vladimir Bazala dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- V. B.-ić Vladislav Brusić, franjevac, Košljun.
- V. B.-r Vladimir Bayer dr., sveuč. docent, Zagreb.
- V. D. Vjekoslav Duančić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- V. F.-ć. Vladimir Filipović dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- V. F.-ić Vinko Foretić dr., profesor, Dubrovnik.
- V. H. Viktor Hoffiler dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- V. H.-t. Viktor Horvat ing., Zagreb.
- V. K.-h. Vilim Keillbach dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- V. K.-ć. Vatroslav Krčelić, učitelj plesa, Zagreb.
- V. Kr.-n. Vladimir Kristan ing., Zagreb.
- V. L. Valdemar Lunaček dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- V. L.-ć. Vatroslav Lopašić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- V. M. Vladimir Mirosavljević, sveuč. asistent, Zagreb.
- V. P.-ć. Vladimir Petković, sveuč. profesor, Beograd.
- V. P.-k. Vinko Proštenik, profesor, Zagreb.
- V. R. † Vladimir Rozov, sveuč. lektor, Zagreb.
- V. R.-r. Vilko Rieger dr. ing., profesor EKVŠ, Zagreb.
- V. Š. Vjekoslav Štefanić, profesor, Zagreb.
- V. Š.-ć. Vladimir Škorić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- V. Š.-l. Vladimir Šrepel ing., Zagreb.
- V. V. Vladimir Vrkljan dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- V. V.-ć. Vinko Vuletić dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- V. Ž. Viktor Živić, profesor, Zagreb.
- Z. A. † Zdravko Arnold dr. ing., sveuč. docent, Zagreb.
- Z. D. Zvonimir Doroghy, profesor, Zagreb.
- Z. D.-i. Zvonimir Dugački dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- Z. G. Zlatko Gašparović dr., čin. Drž. banke, Zagreb.
- Z. H. Zlatko Herkov dr., gradski senator, Zagreb.
- Z. K. Zvonimir Kopač dr., sveuč. docent, Zagreb.
- Z. L. Zdravko Lorković dr., sveuč. profesor, Zagreb.
- Z. M.-ć. Zdenka Marković dr., profesor, Zagreb.
- Z. M.-n. Zlatko Majtin dr., sveuč. docent, Zagreb.
- Z. P. Zvonimir Pavišić dr., liječnik, Zagreb.
- Z. R. Zlatan Ružić dr., docent EKVŠ, Zagreb.
- Z. S. Zvonimir Sušić dr., liječnik Bol. za duš. bol., Vrapče.
- Z. S. M. Zora Simić-Milovanović, pov. umjet., Beograd.
- Z. Š. Zdenko Škreb dr., sveuč. lektor, Zagreb.
- Z. Š.-a. Zdenko Šenoa, profesor, Zagreb.
- Z. V. Zdenko Vinski dr., profesor, Zagreb.
- Z. M. Željko Marković dr., sveuč. profesor, Zagreb.

GLAVNI UREDNIK: Dr. Mate Ujević.

KRATICE

AOP	= Analecta O. P., Rim	MH	= Matica Hrvatska
AslPh	= Archiv für slavische Philologie	MHSM	= Monumenta spectantia historiam Slavorum meridionalium
AU	= Austro-ugarska monarhija		= mille passuum
Bac	= Bacillus	m. p.	= Matica Slovenska
Bact	= Bacterium	MS	= Mjenični zakon od 1928
BL	= Buchberger, Lexicon für Theologie und Kirche	Mz	= Narodne Novine, Zagreb
		NN	= Narodna Prosvjeta, Zagreb, ili Narodna Prosveta, Beograd
BOP	= Bullarium Ordinis Fratrum Praedi- catorum I.—VIII., Rim 1729—40	NP	= Nastavni Vjestnik
CIA	= Corpus Inscriptionum Atticarum	N Vj	= Obći građanski zakonik od 1811 (u Hrvatskoj od 1852)
CIG	= Corpus Inscriptionum Graecarum	Ogz	= Patrologia graeca
CIL	= Corpus Inscriptionum Latinarum	PG	= Patrologia latina
CJC	= Codex Juris Canonici	PL	= Prilozi za književnost, jezik, istoriju i folklor, Beograd
Cod. dipl.	= Smičiklas, Codex Diplomaticus	Prilozi	= Pauly-Wissowa, Realencyclopaedie der classischen Altertumswissen- schaft, Stuttgart
Coulon	= Scriptores O. P. I.—VIII., Pariz 1910—14	PWR	= Quétif-Echard, Scriptores Ordinis Praedicatorum I.—II., Pariz 1719-21
ČZHP	= Časopis za hrvatsku poviest	QE	= Rad Hrvatske akademije, Zagreb
DHK	= Društvo hrvatskih književnika	Rad	= Sjever (sjeverni)
DSJ	= Društvo sv. Jeronima	S(s)	= sine anno, t. j. bez naznake godine
Geogr. Rav.	= Geographus Ravennas	s. a.	= Slovenski biografski leksikon
GHPD	= Glasnik hrvatskog prirodoslovnog društva	SBL	= Srpska kraljevska akademija
GIZM	= Glasnik hrvatskih zemaljskih mu- zeja, Sarajevo	SKA	= Srpski književni glasnik
Grada	= Grada za poviest književnosti hrvatske (izd. HA)	SKG	= Srpska književna zadruga
HA	= Hrvatska akademija	SKZ	= De Backer-. Sommervogel, Bi- bliothèque de la Compagnie de Jésus
HBL	= Haberling-Hübotter-Vierordt, Biographisches Lexikon	Sommervogel	= sub voce, t. j. pod riečju
HE	= Hrvatska Enciklopedija	s. v.	= Tabula Peutingeriana
HIBZ	= Hrvatski izdavački bibliografski zavod, Zagreb	Tab. Peut.	= Allgemeines Lexikon der bilden- den Künstler
HR	= Hrvatska revija	Thieme-Becker, ALBK	= Trgovački zakon
I. Kukuljević SUJ	= Slovník umjetnikah jugoslavenskih	Tz	= Udružene Države Sjeverne Amerike
I(i)	= Iztok (iztočni)	USA	= Vjestnik Hrvatskog arheološkog društva
It. Ant.	= Itinerarium Antonini	VHAD	= Zapad (zapadni)
J(j)	= Jug (južni)	Z(z)	= Zabavna biblioteka, Zagreb
Jl(ji)	= Jugoiztok (jugoiztočni)	ZB	= Zbornik za narodni život i običaje, HA, Zagreb
JIC	= Jugoslovenski istorijski časopis, Beograd	ZNZO	
J. Meyer AKL	= Allgemeines Künstlerlexikon		
KS	= Konjska sila		
LMS	= Letopis Matice Srpske		
Ljubić, Dizionario	= Š. Ljubić, Dizionario biografico, Zadar 1856		

Najobičnije kratice i takve, koje se mogu razabrati po smislu, ne donosimo u ovom popisu.

lazi i kod drugih životinja, primjerice na glavi pasa i preživaca te mošnji pasa. Liečenje je medikamentozno i operativno, osobito kauterizacijom (v.). O. K.

ELEFANTINA (arap. Džesiret Asvan »Asuanski otok«; staroegipat. Jebu »Zemlja slonova«), nilski otok izpod prvog katarakta kod Asuana u Gornjem Egiptu. Otok je dug 1365, a širok do 780 m, na njemu su dva seoca; posut je brojnim lugovima palma, lako navodnjavanje omogućuje poljodjelstvo. Kao granični otok između Egipta i Nubije bio je u antičko doba veoma važan, o čemu svjedoče bogati arheološki nalazi. Tu su ruševine grada, u kome su bili veliki hramovi posvećeni Ehnemu, bogu katarakta. Na i obali sačuvao se antički vodomer. Istraživanjem g. 1906—08 nađeni su u E-i brojni papirusi, iz kojih se vidi, da je na otoku u 6. i 5. st. pr. Kr. bila židovska vojna naselobina s hramom Jahveu. A. M. S.

ELEGIJA (grč. *ēleya*, od *ēleyos* »jecaj, tužaljka«), u grčkoj književnosti (od 7. st. pr. Kr.) pjesma u elegijskim distisima (→ distih), izprva bez obzira na njezin sadržaj. Kasnije (od 5. st. pr. Kr.) oba su se pojma spajala, kako ih na pr. vidimo združene u Ovidijevim elegijama *Ex Ponto*, pjesmama iz progonstva, u kojima žali za Rimom i za minulim sretnim danima. Prema tome dobila je e. značenje pjesme, koja izriče tihiu sjetu (ne duboku tugu) za nečim, što je izgubljeno ili što je u realnoj ili idealnoj daljini. Ovidijeve su e-e u elegijskim distisima, ali kasnije pojam e-e nije vezan o oblik distiha. U hrvatskom su pjesničtvu klasičkoga oblika Cirakijeve *Florentinske elegije*, dok su Kranjčevićeve *Uskočke elegije* i Hranilovićeve *Zumberačke elegije* u različitim stihovima. Inače se — u širem smislu — naziva elegijskim (nasuprot dionizijskom) pjesnik, kod kojega preteže melankolični osnovni ugođaj i čuvstvo sjetno, turobno. Lj. M.

ELEKTRA, kći mikenskoga kralja Agamemnona i žene mu Klytemnestre. Homeru i epskom pjesničtvu je nepoznata. O njoj govore istom lirici. U Stezihorovo je *Orestiji*, čini se, E. važna osoba. Svakako je zanimljivo, da su svi tri velika grčka tragičara obradila priču o E-i. U Eshilovoj *Orestiji* E. učvršćuje svoga brata Oresta u odluci, da ubije njihovu majku Klytemnestru i njezina muža Egista, jer su zajedno na podli način ubili E-ina i Orestova oca Agamemnona. Orest joj nalaže, da straži u kući, dok on ubije krivce. — Sofoklo u svojoj *Elektri* ide dalje: E. mrzi ubojice svoga oca. Ona je potajno poslala svoga malenog brata Oresta k Strofiju, vladaru u Krizi u Fokidi. Ondje je Orest odrastao zajedno s vladarevim sinom Piladom. Obojica dolaze u Mikenu. E. živo nagovara brata, da osveti otcovu smrt. Prigodom ubijanja majke ona ne pokazuje nikakva ganuća — pak iza toga izravno potiče Oresta, da ubije i Egista. — Kod Euripida u istoimenoj tragediji E. je nosilac čitave radnje: smišlja osnove o osveti i određuje potrebno, hrabri neodlučnoga brata i konačno sama pomaže kod ubojstva majke. — Prema priči, Elektra se kasnije udaje za Pilada. Z. D.

ELEKTRENKEFALOGRAF (Elektrenkefalografija), snimka (snimanje) bioelektričnih struja mozga. U svakom djelatnom živom tkivu, pa tako i u mozgu, nastaju električne promjene, koje se očituju u periodičkim promjenama električne napetosti. Te promjene možemo snimati izravno s mozgovne kore, ali i preko lubanjskih kostiju. U tu se svrhu upotrebljavaju elektrode, koje prislanjamo na mjesto trepanacije ili na kožu lubanje, zatim pojačala s elek-



na osjetljivom fotografskom električne napetosti mozga periodične, to na snimci (elektrenkefalogramu) vidimo niz valova, koji se među sobom razlikuju po amplitudi, učestalosti i pravilnosti. Elektrenkefalogram (EEG) pokazuje zbroj električnih promjena, što se zbivaju u dielu mozga, koji se nalazi među elektrodama. Kod čovjeka, koji je u stanju osjetnog i mentalnog mira, EEG sastoji se obično iz niza valova veoma pravilne učestalosti od kojih 10 valova na sekundu (Bergerov ritam). Periodične promjene napetosti te vrste zovu se α -valovima. Zbog različitih osjetnih podražaja ili kakve druge duševne aktivnosti redovno nestaje α -valova,

a mjesto njih se javljaju nepravilni β -valovi, koji su manje amplitude, a veće učestalosti (oko 25/sek.). Dok su α -valovi izraz relativnog mirovanja mozgovnih stanica, β -valovi su prema mišljenju većine istraživača rezultat pojačane djelatnosti nekih predjela mozgovne kore i popratni električki fenomeni živahnije duševne djelatnosti. Osim α -valova i β -valova u nekim patološkim slučajevima i u dubokom snu javljaju se na EEG-u veoma spori valovi učestalosti, između 0,3—4/sek, a relativno velike amplitude; ti se valovi zovu δ -valovi.

Pojavu, da u stanicama mozga nastaju neke promjene električke napetosti, otkrio je prvi 1875 englezki fiziolog R. Caton, koji je radio na mozgovima majmuna i kunića. Na čovjeka prvi je uspio snimati električke mozgovne promjene njemački neurofiziolog H. Berger (1924).

Proučavanje bioelektričkih struja mozga dovelo je do novih spoznaja o funkciji živčanog sustava; elektrenkefalografija s uspjehom se već danas primjenjuje u psihijatriji i neurologiji, a psihologiji koristi u tome, što omogućuje izravno proučavanje procesa, koji su najuže povezani uz duševni život.

LIT.: H. Berger, *Über das Elektroencephalogramm des Menschen*, Arch. f. Psychiat. u. Nervenkr. od 1929 dalje; A. E. Kornmüller, *Die bioelektrischen Erscheinungen der Hirnrindensfelder*, 1937; H. Jaspers, *Electrical signs of cortical activity*, Psychol. Bull., 1937; H. Davis, *The electroencephalogram*, Tab. Biol., 1938; A. Fessard, *Signes électriques de l'activité cérébrale chez l'homme*, Paris Medical, 1938; F. Bremer, *L'activité électrique de l'écorce cérébrale*, 1938; E. D. Adrian, *The localization of activity in the brain*, Proc. Roy. Soc. B., 1939; I. Bertrand, J. Delay i J. Guillemin, *L'électroencephalogramme normal et pathologique*, 1939; C. Trabattini, *Nuovi contributi all'elettroencefalografia*, Con. di lab. di Psicologia, 1941; H. Rohrer, *Die elektrischen Vorgänge im menschlichen Gehirn*, 1942. Z. B.-s.

ELEKTRET → Električka, Elektrostatika.

ELEKTRIKA (od *ἤλεκτρον* »jantar«), 1. nauka o pojavama elektriciteta i njegovoj primjeni; 2. kod jednog diela naših pisaca sinonim za elektricitet.

Clanci iz elektrike obrađeni su i podijeljeni u tri skupine: I. Električka u fizici i kemiji; II. Električka u medicini; III. Električka u tehnici (elektrotehnika).

I. ELEKTRIKA U FIZICI I KEMIJI: Elektricitet, 683. Elektricitet trenjem, 685. Električka glazba, 685. Električka struja, 685. Električke jedinice, 687. Električki elementi, 690. Električki titraji, 690. Električki valovi, 693. Elektroakustika, 693. Elektroanaliza, 695. Elektrode, 695. Elektrodinamika, 695. Elektrofor, 697. Elektroforeza, 698. Elektrokemija, 698. Elektrokinetički pojavi, 699. Elektrolitička disocijacija, 700. Elektrolitička polarizacija, 700. Elektroliza, 700. Elektroluminiscencija, 702. Elektromagnetizam, 702. Elektromagnetska indukcija, 704. Elektromagnetski valovi, 704. Elektrometri, 708. Elektromotorna sila, 708. Elektron, 708. Elektron negativni i pozitivni, 712. Elektron težki, 712. Elektroni i kemijska svojstva elemenata, 712. Elektronska optika, 713. Elektronske cijevi, 715. Elektronski mikroskop, 719. Elektronski udarac, 722. Elektronvolt, 723. Elektrooptika, 723. Elektroozmoza, 725. Elektroskopi, 725. Elektrostatika, 725. Elektrostatski strojevi, 727. Elektrostrikcija, 730.

Elektricitet (novolat. *electricitas*), fizikalni agens, koji prouzrokuje električke pojave. Znanstveno proučavanje fizikalnih pojava počinje s godinom 1600, kad je u Londonu izašlo djelo Gilberta »De magnetis magneticisque corporibus«, u kojemu je 2. poglavlje II, knjige posvećeno pojavama na jantaru i nizu drugih tvari, za koje je Gilbert našao da trenjem dobivaju kao i jantar svojstvo, da privlače laka tjelešca. Istina, to svojstvo jantara bilo je poznato već Talesu iz Mileta (oko 600 pr. Kr.), a Teofrast je 300 godina kasnije am pridodao i *linkurion* (vjerojatno turmalin). Međutim je to oskudno znanje do Gilbertova vremena prošireno samo tim, da je isto svojstvo nađeno i na ahatu; ali se nazadovalo u osnovi pojava, jer je uobće bilo sporno, treba li jantar trti, da bi dobio svojstvo privlačenja lakih tjelešaca, ili ga u tu svrhu treba ugrijati. Gilbert je svoja istraživanja izveo s pomoću verzorija, lakoga kovnog štapića duljine 3 do 4 engl. palca, gibljivo poduprtog, po uzoru na magnetsku iglu, u njegovu težištu u jednom šiljku. Tjele-



GILBERTOV VERZORIJ
(Iz: Gilbert, *De magnetibus*,
London 1600)

lesa, koja su trenjem dobila svojstvo, da privlače jedan kraj verzorija, kad ih je njemu primaknuo, nazvao je Gilbert (*corpora electrica* prema grčkom nazivu za jantar (*ἤλεκτρον*), a mehaničku silu privlačenja *vis electrica*.

Kroz prvih 150 godina poslije Gilberta vrlo sporo se napredovalo u upoznavanju najosnovnijih pojava elektriciteta. Neki su od njih opažani po više puta, ali su opet i opet pali u zaborav. Električnu influenciju, na kojoj se temeljio već verzorij, otkrili su djelomično najprije Guericke 1663 (1672) pa ponovno Hawksbee (1770), Gray (1729), spoznao ju je u celom obsegu istom J. Canton (1753), a Wilke ju je 1757 izpravno protumačio. Jedna spoznaja uvjetovala je drugu, nova spoznaja pridonijela je usavršavanju eksperimentalnih sredstava, a ovo je omogućivalo nova otkrića i nove spoznaje. Dok Gilbert zna samo za električno privlačenje, pa čak izričito izključuje mogućnost odbijanja (I, II, c. 39), Guericke je prvi opazio, da njegova sumporna kugla, natrta, odbija laka tjelešca, pošto ih je izprva privukla. Nakako u isto doba našao je to i Boyle; ali na to se zaboravilo. Istom Du Fay je 1734 otkrio, da postoje dvije vrste elektriciteta, koje je on skraćeno nazvao elektricitetom stakla i elektricitetom smole; za njih su se kasnije uobičajili Franklinovi nazivi (1747): pozitivan i negativan elektricitet. Tim je Du Fay našao i prvi kvalitativni zakon, da se istoimeni elektriciteti odbijaju, a raznoimeni privlače. Međutim je Gray četiri godine prije toga podijelio tjelesa u vodiče i nevodiče elektriciteta. Sve to omogućilo je konačno otkriće influencije po Cantonu i njezino objašnjenje po Wilkeu.

Posljednje godine prve polovine 18. st. doniele su prvi kvantitativni zakon elektriciteta postavljen od Watsona, a neposredno zatim od Franklina: da na tarilu i na natrtom tielu nastaju jednake množine suprotnih elektriciteta. Točan dokaz ovog zakona donio je tek Faraday. U isto doba pada otkriće lajdenske boce po Kleistu (listopad 1745) i Musschenbroeku (siečanj 1746). Druga polovina istog stoljeća donijela je prvi brži uzpon u spoznaji električkih pojava. Mnoga otkrića omogućena su izumom prvih elektroskopa i njihovim usavršavanjem (Canton, Henley, Volta, Bennet). Odmah u godinama 1750—52 dolaze Franklinova izraživanja o olujnom elektricitetu i njegov dokaz, da je munja električna iskra. Cassini je 1752 našao elektricitet u atmosferi i po liepom vremenu. Godine 1785 postavlja Coulomb drugi kvantitativni zakon elektriciteta za silu f , kojom uzajamno djeluju dvije točkaste množine elektriciteta e i e_1 u međusobnoj daljini r : sila je $f = \pm C \cdot e e_1 / r^2$. Tim je omogućen put matematičkoj analizi u područje nauke o elektricitetu; nju su amo uveli Laplace, Biot i Poisson. — U isto doba padaju zamašna električka izraživanja Cavendisha, od kojih je veći dio izašao na vidjelo istom, kad je Maxwell izdao Cavendishova djela (1879). Cavendish je uveo pojmove električkog potencijala i kapaciteta, izveo je prva mjerenja kapaciteta, otkrio je utjecaj okolnog medija na kapacitet vodiča, mjerio je električke vodljivosti čvrstih tjelesa i tekućina. On je dokazao, da se elektricitet nalazi samo na površini vodiča.

Konac 18. st. znači ujedno početak drugog razdoblja u razvoju spoznaje električkih pojava otkrićem najprije t. zv. kontaktnog elektriciteta (Volta, 1796), pa galvanskog članka i električne struje. Otkriće galvanskog članka vezano je uz ime Volte (1800); u stvari već od 1796 Ash, Humboldt, Ritter izvode primitivne pokuse elektrolize, gdje im kao izvor struje služe dvije kovine s vodom ili vlažnim tielom između njih. Otkrićem magnetskog polja električke struje (Oersted, 1820), magnetiziranja čelika u uzvojnici, kroz koju teče struja (Arago i Gay-Lussac, 1820), međusobnog djelovanja paralelnih i antiparalelnih struja (Ampère, 1820) utvrđena je veza između magnetizma i elektriciteta. Magnetizam je po Ampèrovoj teoriji magnetizma (1821, 1822) postao popratnim pojavom struje elektriciteta. Ova je unutrašnja veza između njih produbljena g. 1831 otkrićem induciranih struja po Faradayu. Od ove godine počinje treće razdoblje u razvoju nauke o elektricitetu, a od g. 1867, kad su Werner Siemens i Wheatstone istodobno otkrili t. zv. dinamo-električko načelo, nadošlo je doba veće tehničke primjene električke struje.

Gilbert je zamišljao, da elektrizirano tielo izpušta neki agens (*effluvia*), koji prouzrokuje privlačenje okolnih tjelešaca. Sredina 18. st. donijela je prve hipoteze o biti elektriciteta; to su hipoteze električkih fluida. Po starijoj, t. zv. unitarnoj teoriji, koju je postavio Watson, a do ugleda je došla pod Franklinovim imenom, svaka tvar sadržava u sebi neki imponderabilni agens, koji oni zovu električkim fluidom ili električkim eterom. Ako tvar sadržava

toliko tog fluida, koliko može da ga primi, a da se on ne nagomila na površini, tvar je u neelektričkom stanju. Ako je sadržaj na fluidu veći od te propisane količine, tvar je pozitivno električna, a negativno je električna, ako je sadržaj na fluidu manji. Da bi se protumačilo međusobno odbijanje negativno električkih tjelesa, sledilo bi iz ovoga, da tvar po sebi, t. j. tvar, kojoj bi posve bio oduzet električki fluid, odbija drugu tvar, kojoj je također oduzet električki fluid. Tu su vidjeli sukob unitarne teorije s osnovom Newtonove obće gravitacije i nisu nalazili način, kako bi se ova opreka izravnila.

Zbog ove poteškoće je R. Symmer postavio (1759) teoriju dvaju električkih fluida, kojoj začetak imamo već kod Du Faya. Po ovoj, t. zv. dualističkoj teoriji tvar u neutralnom stanju ne pokazuje električkih svojstava, jer sadržava jednake količine dvaju imponderabilnih električkih fluida, pozitivnog i negativnog. Jedno tielo je električki pozitivno ili negativno prema tome, da li je na njemu višak jednog ili drugog fluida. Unitarna teorija je jednostavnija. Ona razlikuje dva prabivstva: tvar i električki fluid; oboje zajedno sačinjavaju neutralnu tvar. Ipak je konačno prevladala dualistička teorija. Ona je dala svoj pečat elektrostatikoj terminologiji. Premda su pisci gotovo do kraja prošlog stoljeća kod prikazivanja električke struje mislili dualističkom teorijom, ipak pravila i zakoni električke struje i elektrodinamike, koji su postavljeni u prošlom stoljeću, više odgovaraju terminologiji unitarne teorije, ali ne kao izraz takva shvaćanja, nego više kao skraćeni način izražavanja. Pobjedi dualističke teorije uvelike su pridoniele neke eksperimentalne razlike u pojavama s pozitivnim i s negativnim elektricitetom, koje su bile otkrivene upravo u drugoj polovici 18. stoljeća, poimence: razlika pozitivne i negativne slike kod Lichtenbergovih figura, t. zv. Lullinov pokus, te razlike u svjetlostnim pojavama na šiljku s pozitivnim i na šiljku s negativnim e-om.

Teorije fluida bile su usmjerene samo na tumačenje elektrostatikih pojava, pa nije bilo potrebe zalaziti u hipoteze o biti tih fluida. Ipak nalazimo već kod Franklina misao, da se električki fluid sastoji od vrlo sitnih čestica. Aepinus (1759) čak govori u međusobnom privlačenju između čestica Franklinova električkog fluida i atoma tvari. Tu prvi put susrećemo misao o zrnatoj građi elektriciteta. Ova misao je još onda ostala neplodnom; ali je ponovno oživjela, kad je dobila snažan eksperimentalni oslon u Faradayevim izraživanjima elektrolize (1833), koja su pokazala, da svaki jednovalentni ion nosi jednaku množinu elektriciteta, te da je obćenito množina elektriciteta, koju nosi jedan ion, točno proporcionalna s njegovom valencijom. Ipak je u idućim godinama nastao zastoj u atomističkom shvaćanju elektriciteta, a uzrok je došao upravo od Faradaya. Jer po Faradayu bit električkih pojava je električko polje; ono se sastoji u deformacijama ili mehaničkim napetostima etera ili okolnog dielektričkog sredstva. Slobodni električki naboji javljaju se na površini vodiča, gdje izviru ili svršavaju električke silnice. Prema tome su pojavi na vodičima nešto sporedno. Tako bi shvaćanje elektriciteta kao substancije, uzporedljive s tvari, dolazilo u pitanje. Novu snagu dobilo je ovo Faradayevo shvaćanje u Maxwellovoj obradbi (1873), pogotovo kad je Maxwellova teorija ojačana Hertzovim pokusima (1888).

S druge strane je W. Weber upravo u to doba, najprije 1846, pa opet 1871, razvio posve atomističko shvaćanje elektriciteta. On govori o atomima elektriciteta, pozitivnog i negativnog, koji imaju masu, i ako vrlo malenu prema masi atoma tvari. Ti električki atomi mogu biti spojeni s atomima tvari i onda čine s njima cjelinu. Stoney je 1874 iznio shvaćanje, da se elektricitet sastoji od međusobno jednakih najmanjih množina e-a, pa je na osnovu elektrolize i kinetičke teorije plinova procenio tu najmanju električku množinu na $0,3 \cdot 10^{-10}$ elst-cgs-jedinica. Edlund (1877) govori o električkim molekulima u kovinama, a Helmholtz (1881) poput Stoneya iznosi zaključak, da su i pozitivni i negativni elektricitet razdijeljeni u elementarne množine, koje se vladaju kao atomi elektriciteta. Napokon po Lorentzu (1895) električka struja u kovinama sastoji se u progresivnom gibanju najmanjih jednakih čestica e-a.

Nazivi za ova zrnca elektriciteta, bez obzira na njihov predznak, bili su raznoliki: kod Lorentza to su ioni, kod W. Thomsona elektrioni, kod J. J. Thomsona električke korpuskule. Stoney je (1891) za njih, ne obazirući se na predznak, dao naziv elektron. J. J. Thomson i Kaufmann

su dokazali (1897), da su katodne zrake struja najmanjih čestica negativnog elektriciteta s masom odprilike hiljadu puta manjom od mase vodikova iona, a Fitzgerald je iste godine zaključio, da su to slobodni elektroni. Po Lorentzu su ti elektroni identični s nosiocima struje u kovinama.

Po našem današnjem znanju elektricitet se sastoji od elektrona, međusobno jednakih najmanjih množina negativnog elektriciteta. Oni sudjeluju u sastavu atoma tvari. Millikan (1912) je izmjerio metodom lebdećih kapljica množinu elektriciteta, koju ima elektron; našao je vrijednost: $4,77 \cdot 10^{-10}$ elst-cgs-jedinica. Po novijim mjerenjima bolje odgovara: $4,80 \cdot 10^{-10}$ elst-cgs-jedinica. Masa elektrona je okruglo 1850 puta manja od mase protona. Tolman i njegovi suradnici su u nizu pokusa od 1916 do 1926 pokazali, da su zaista elektroni nosioci struje u kovinama.

Čestice, koje bi bile najmanja zrnca pozitivnog elektriciteta, a inače bi u svemu odgovarale elektronu, dosada nisu poznate. U protonu, koji je jezgra vodikova atoma, množina je $4,80 \cdot 10^{-10}$ elst-cgs-jedinica pozitivnog elektriciteta vezana uz tvar. Pozitron, koji je masom jednak elektronu, a odgovara množini $4,80 \cdot 10^{-10}$ elst-cgs-jedinica pozitivnog elektriciteta, vrlo je nestalna i kratkovječna čestica, a nema ni podataka, koji bi upućivali na to, da bi on izravno sudjelovao u građi atoma tvari ($\rightarrow$ čestice elementarne).

M. K.

Elektricitet trenjem. Najstariji način dobivanja slobodnog e-a je elektriziranje trenjem ($\rightarrow$ elektricitet). U stvari radi se o odjeljivanju suprotnih e-a, jer se e. jednog predznaka javlja na natrtom tijelu, a suprotni e. u jednakoj množini javlja se na tarivu. Du Fay je otkrio (1734), da se i kovine daju elektrizirati trenjem pomoću zgodnog tariva, ako ih izoliramo. U školskim pokusima obično taramo stakleni štap Kienmayerovim amalgamom, razasutim na koži, ili ebonit taramo krznom. Kod toga staklo pokazuje pozitivan, a ebonit negativan elektricitet. Uostalom, predznak e-a na istom natrtom tijelu zavisi u prvom redu o vrsti tariva; osim toga on zavisi o stanju površine tijela i o temperaturi. Gladko staklo pri običnoj temperaturi, natrto kožom, Kienmayerovim amalgamom ili svilom, pokazuje pozitivan, a natrto vunom ili krznom, pokazuje većinom negativan elektricitet.

Ako dva tijela iz različitog materijala dovedemo jakim pritiskom u najuži dodir pa ih opet razmaknemo, oni pokazuju poslije razmicanja suprotne elektricitete. Ovo vrijedi i za dodir kovine s izolatorom; na pr. spustimo li sumpornu kuglu u čistu živu pa je izvučemo, sumpor pokazuje negativan, a živa pozitivan elektricitet. To je e. dodirom. Po Helmholtzu dobivanje e-a trenjem svodi se na e. dodirom; uloga trljanja je samo ta, da se na što više mjesta uzpostavi potreban najuži dodir između oba tijela. Za dodir dvaju različitih čvrstih dielektrika ili za dodir čvrstog dielektrika s tekućim vrlo obćenito vrijedi Coehnovo pravilo: nakon dodira dvaju dielektrika pokazuje pozitivan e. dielektrik s većom konstantom dielektričnosti (A. Coehn, 1898). Ako staklenu kuglu prevučemo šelakom ili parafinom pa je zaronimo u vodu i izvučemo, šelak ili parafin pokazuju negativan, a voda pozitivan e., jer je konstanta dielektričnosti vode daleko veća od konstante dielektričnosti šelaka ili parafina.

E. trenjem i e. dodirom posljedica su električkog dvosloja na površinama tijela. Po Lenardu takav dvosloj posljedica je molekularnih sila i njima izazvane orijentacije dipolnih molekula na površini, tako da je negativni kraj dipola na vanjskoj strani. Dovedu li se površine dvaju tijela pritiskanjem mjestimice na daljine molekularnih dimenzija, negativni električki naboji iz površinskog dvosloja na tijelu s većom konstantom dielektričnosti lako priđu na površinu tijela s manjom konstantom dielektričnosti, pa kad površine razmaknemo, prva pokazuje pozitivan, a druga negativan elektricitet.

M. K.

Električka glasba $\rightarrow$ Elektroakustika 4.

Električka struja je elektricitet u gibanju. Ovom definicijom nije obuhvaćena Maxwellova t. zv. pomaćna struja u praznom prostoru, koja se sastoji u vremenskim promjenama električkog polja, premda je i s njom spojena glavna značajka e-e s-e, magnetsko polje ($\rightarrow$ Maxwellova teorija). U dielektriku pomaćna je struja skopčana s polarizacijom dielektrika. Put, kojim teče energija e-e s-e, zovemo krugom struje. Pomaćna struja zatvara sve krugove e-e s-e u zatvorene krugove.

Pod e-om s-om u običnom govoru razumijevamo struju elektriciteta kroz kovne vodove. Dana definicija je šira, jer ona osim ove, t. zv. vodne, struje obuhvaća i konvektivnu struju. To je gibanje elektriciteta spojeno s gibanjem tvari kao nosioca električkih naboja. Ovamo idu: ionske struje u plinovima ($\rightarrow$ ionizacija), u disociranim tekućinama ($\rightarrow$ elektroliza), u čvrstim elektrolitima i struje u dielektričkim tekućinama; ove posljednje sastoje se djelom u strujama iona, djelom u strujanju električki nabijene prašine. Među konvektivne struje idu struja u Rowlandovu pokusu (H. A. Rowland, 1876) i struja u Röntgenovu pokusu (W. C. Röntgen, 1885). Električka iskra je kombinacija konvektivne i pomaćne struje.

Uzrok gibanju elektriciteta kod vodnih struja i kod ionskih struja — uključujući amo i struje električki nabijene prašine — razlika je potencijala ili napetosti. To je elektromotorna sila u najširem smislu, dok pod elektromotornom silom u užem smislu razumijevamo svaki uzrok, koji stvara ili teži da stvori nejednakost gustoće elektrona u vodičima. Taj uzrok mogu biti: razlika temperature na dodirnim mjestima dvaju različitih vodiča ili strma temperaturna nesimetrija na istom vodiču; zatim kemijsko djelovanje na dodirnim plohama dvaju različitih vodiča s elektrolitom, razlika koncentracije iste elektrolitičke raztopine, relativno gibanje vodiča prema magnetskom polju ili promjena magnetskog toka obuhvaćenog krugom vodiča.

Ionske struje sastoje se u gibanju suprotno elektriziranih čestica u suprotnim smjerovima. Gotovo do podkraj prošlog stoljeća slična je slika vladala i o struji u kovnim žicama: smatrali su je strujom suprotnih elektriciteta u suprotnim smjerovima. Uobičajeno označavanje smjera struje u žici od pozitivnog pola izvora napetosti k negativnom polu konvencionalni je način izražavanja. Po Lorentzovoj teoriji (1895, 1904) struja u kovnim žicama je progresivno gibanje elektrona, t. j. negativnog elektriciteta. To su vodni elektroni iz atomskih ljusaka atoma kovine; oni se gibaju nasuprot smjeru napetosti, kako je on konvencionalno definiran, t. j. elektroni se gibaju nasuprot smjeru struje. Zato kovne vodiče zovemo i elektronskim vodičima. Iztraživanja, što su ih izvršili R. C. Tolman i njegovi suradnici od 1916 do 1926, dokazala su, da nosioci struje u kovinama zaista imaju negativni elektricitet, a njihova su mjerenja pokazala s dovoljnom približnošću, da je specifički naboj tih nosilaca jednak specifičkom naboju elektrona. I normalni Hallov efekt upućuje na to, da nosioci struje u kovinama imaju samo negativan predznak. Katodne zrake i struje u visoko evakuiranim elektronskim cjevima također su struje slobodnih elektrona.

Jakost struje je množina elektriciteta, koja proteče kroz jedan presjek diela kruga struje u 1 sekundi. Mjerimo je amperima. Struja trajno istog smjera je istosmjerna struja; ako joj je uzto i jakost kroz veće vremenske razmake stalna, zovemo je stalnom strujom. Struja, kojoj se jakost i smjer periodički mjenjaju s vremenom, zove se izmjeničnom strujom. Promjenljiva struja, koja se daje razstaviti u stalnu i u izmjeničnu komponentu, zove se složenom strujom. Predmet ovog članka je poglavito stalna struja u kovnim vodičima.

Otkrivanje zakona e-e s-e bilo je omogućeno, kad su se znali uzpostaviti izvori električke napetosti, koji su kroz dulje vremenske razmake stalni. To su najprije bili termoelementi (v.), kojima su oba spojišta bila na stalnim temperaturama; tako je Ohm kod dokazivanja zakona e-e s-e, nazvanog njegovim imenom, upotrebljavao kao izvor napetosti termoelemente od bizmuta i bakra, kojima je jedno spojište bilo na temperaturi 0°C , a drugo spojište na temperaturi 100°C . Od 1836 (Daniellov članak) upotrebljavali su se u tu svrhu i stalni galvanski članci.

Osnovni zakon e-e s-e je Ohmov zakon (1827). Po tom je zakonu jakost struje (i) proporcionalna s elektromotornom silom u krugu ili napetošću na kraju žice (V), a obrnuto je proporcionalna s električkim otporom (r) u

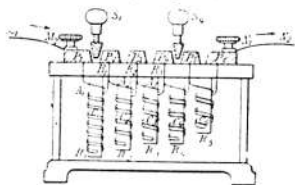
krugu, t. j. $i = \frac{V}{r}$. Taj zakon vrijedi i za dielove žice između točaka A i B; ako sa $V_A - V_B$ označimo napetost između A i B, a sa r_{AB} otpor diela žice između njih, onda je $i = \frac{V_A - V_B}{r_{AB}}$. Veličina r u nazivniku Ohmova zakona,

koju zovemo električkim otporom žice, ima u zadanom krugu struje pri stalnoj temperaturi žice stalnu vrijednost

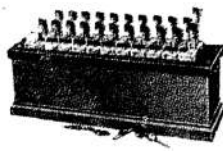
$r = \frac{V}{I}$. Za razliku od drugih veličina, koje u najobćenitijem slučaju ograničuju jakost izmjenične struje, zovemo ga i omskim otporom. Ohmov zakon vrijedi i za efektivnu jakost izmjenične struje tehničke frekvencije u krugu, koj. sadržava samo omski otpor, ako se u brojniku stavi efektivna napetost.

Omski otpor jedne žice stalnog presjeka q zadan je zakonom otpora: $r = \gamma \frac{l}{q}$, gdje je l dužina žice. Jedinica otpora je 1 om. Faktor γ je materialna konstanta tvari žice, t. zv. specifički električki otpor. To je otpor komada te tvari dužine 1 cm, presjeka 1 cm². Mjeri se jedinicom om.cm. Da bi se izbjegli maleni brojevi, u praksi se uzima kao specifički otpor 10⁴ puta veća vrijednost, t. j. otpor žice dužine 1 m, presjeka 1 mm². Najmanji specifički otpor imaju srebro (10⁴ γ = 0,016 om.cm) i bakra (10⁴ γ = 0,017 om.cm). Otpor se najpouzdanije mjeri metodom Wheatstoneova mosta (v.). Obrnuta vrijednost $\frac{1}{\gamma} = k$ zove se električkom vodljivošću; mjeri se jedinicom om⁻¹·cm⁻¹. Između električke vodljivosti i toplinske vodljivosti čistih kovina postoji jednostavan snošaj: one su međusobno proporcionalne (Wiedemannov i Franzov zakon, 1853). Specifička vodljivost najboljih izolatora je prosječno 10²³ puta manja od specifičke vodljivosti kovina.

Specifički električki otpor mjenja se s temperaturom žice: kod kovina raste s temperaturom, a kod ugljena (osim najčišćeg grafitu), silicija i još nekih tvari opada s porastom temperature. Zato redovito dajemo njegovu vrijednost za 18°C. U manjim temperaturnim razmacima dade se prikazati sa: $\gamma = \gamma_0 \cdot [1 + \beta(t - t_0)]$, gdje γ_0 i t_0 znače početni specifički otpor i početnu temperaturu; β je termički koeficijent otpora. Električka vodljivost elektrolita dana je stupnjem disocijacije; a kako disocijacija raste s temperaturom, β je kod elektrolita negativan. Kod kovina se električki otpor ponešto mjenja i s tlakom, te se, osim kod litija, bizmuta i antimona, obćenito umanjuje, kad tlak raste. Tlačni koeficijent otpora, t. j. promjena otpora kod povećanja tlaka za 1 at, jest 3000 do 4000 puta manji od termičkog koeficijenta. Otpor kovina se povećava u magnetskom polju; najviše se povećava otpor bizmuta. Otpor sive ili kovne modifikacije selena i otpor talijeva lako oksidiranog sulfida umanjuju se, ako na njih pada svjetlost. To je posljedica unutrašnjeg fotoelektričkog



Sl. 1a

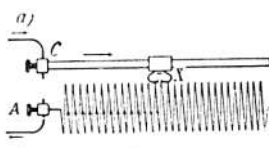


Sl. 1b

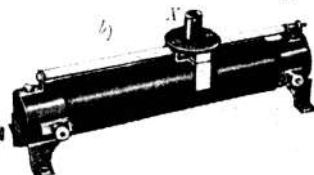
ODPORNİK S ČEPOVIMA

efekta (v.). Otpor nekih kovina, kovinskih slitina i spojeva kod najnižih temperatura naglo pada na nemjerljivo malu vrijednost ($\rightarrow$ supravodljivost).

Za reguliranje jakosti struje služe otpornici. Oni su ili otpornici s čepovima (sl. 1a i b) ili otpornici s pomicaljkom (sl. 2a i b) ili otpornici s ručkom (sl. 3). Svaki otpornik ima određenu maksimalnu jakost struje, do koje se smije upotrebiti. Otpornik s čepovima sastoji se od 1 ili 2 izprekidane debele mjedene pruge, koje su na mjestima prekida premoštene po jednom bifilarno namotanom uzvojniciom poznatog otpora u omima. Utisnemo li u rupicu na jednom prekidu pripadni točno izrađeni konični kovni čepić, otpor uzvojnice je izključen. Uzvojnice su od posebnih slitina s malenim termičkim koeficijentom otpora



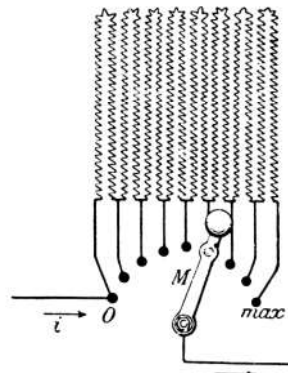
Sl. 2a



Sl. 2b

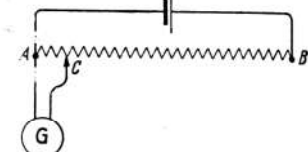
ODPORNİK S POMICALJKOM

(manganin, konstantan, argantan). Ovi se otpornici upotrebljavaju u strogo znanstvenim istraživanjima. Otporna žica je kod drugih otpornika, koji služe za obične potrebe, od jeftinijih slitina. Za stalne velike otpore uz malena opterećenja upotrebljava se silit, jedna smjesa silicija i silicijeva karbida s vrlo velikim specifičnim otporom (oko 18000 om.cm).



Sl. 3. SHEMA ODPORNİKA S RUČKOM

Među dvjema točkama kovnog vodiča, koji ne sadržava nikakva izvora elektromotorne sile, a kroz koji teče struja, napetost opada (Ohm, 1827). Pad napetosti je proporcionalan s otporom, i to je prema Ohmovu zakonu: $V = iR$. Dakle napetost jednoliko opada uzduž homogenog vodiča

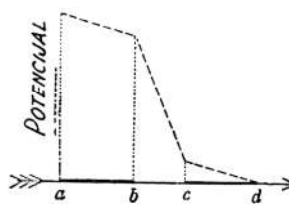


Sl. 4. POTENCIOMETARSKI SPOJ

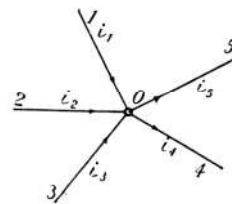
stalnog presjeka. Na tome se osniva potencijometrijski spoj, pomoću kojega iz dane napetosti možemo uzeti po volji malenu napetost. U sl. 4 struja iz izvora napetosti teče kroz otpornik AB s pomicaljkom. Onda kroz mjerilači instrument G, koji je spojen između kraja A i pomicaljke C, teče struja, kojoj jakost odgovara malenoj napetosti $V_A - V_C$.

Sl. 5 prikazuje način opadanja napetosti u nehomogenom vodiču, gdje je između dviju žica ab i cd s malenim otporom uklopljen komad žice bc s velikim otporom. Tako se u vodu s uklopljenom žaruljom praktički cijeli pad napetosti nalazi na niti žarulje.

Struja zagrijava žicu, kroz koju teče. Zakon o množini topline, razvijene strujom, našao je Joule eksperimentalnim putem (1841). Množina topline Q (»Jouleova toplotina«), razvijena u t sekunda u žici otpora r od struje jakosti i , iznosi: $Q = i^2 r t$ džaula = 0,24 $i^2 r t$ gcal. Pomoću Ohmova zakona možemo prvu jednačbu pisati i ovako: $Q = i V t$ džaula. Produkt $W = i V t$ džaula je ujedno energija struje, koja se dade pretvoriti i u druge oblike, na pr. u kemijsku energiju ili u mehaničku radnju. Produkt $N = \frac{W}{t} = i V$ vata je snaga struje.



Sl. 5.



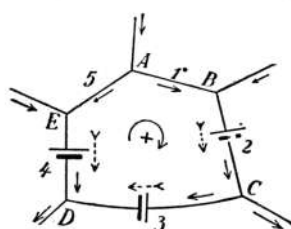
Sl. 6.

Kirchhoff je 1847 postavio zakone o struji u razgranjenim vodičima. Prvi Kirchhoffov zakon odnosi se na točku, u kojoj se struja razgranjuje (sl. 6). Dade li se strujama, koje teku prema čvorištu O, pozitivan, a suprotnim strujama negativan predznak, onda je: $i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_n = \sum_{j=1}^n i_j = 0$. Prema tome ni u jednom dielu kruga struje ne može doći ni do nagomilavanja ni do manjka elektriciteta.

Drugi Kirchhoffov zakon odnosi se na zatvorenu petlju vodiča s otporima $r_1, r_2, r_3, \dots$, koja može sadržavati i neke elektromotorne sile E_m ; u čvorištima A, B, C, ... neka struje bilo kako pritječu ili odtječu (sl. 7). Računajući struje i_n u petlji, koje teku smjerom kazala na uri pozitivno, a one protivnog smjera negativno, vrijedi onda: $\sum_{j=1}^n i_j r_j = \sum_{j=1}^m E_{mj}$. Ako u petlji nema elektromotornih sila,

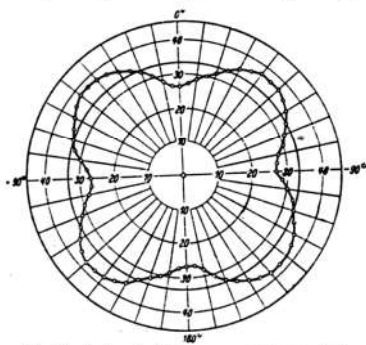
onda je: $\sum_{i=1}^n i_n r_n = 0$. Odatle izlazi za n otpora spojenih paralelno između dviju istih točaka: $i_1 r_1 = i_2 r_2 = i_3 r_3 = \dots$. Za ukupni otpor r sustava tako spojenih otpora izlazi odatle: $\frac{1}{r} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_n}$. Spojimo li paralelno sa spojka mjerjaćeg instrumenta jedan otpor, koji je k puta manji od otpora instrumenta, onda ovim možemo mjeriti struje $(k+1)$ puta jače od područja jakosti, za koje je on određen; kroz instrument teče tada jakost i , a kroz paralelni ogranak jakost ki .

S e-om s-om nerazdvojno je spojeno magnetsko polje struje ($\rightarrow$ elektromagnetizam). Brzina, kojom struja izgrađuje svoje magnetsko polje, zavisi o geometrijskom obliku i veličini kruga struje te o magnetskim svojstvima sredstva, u kome leži krug struje. Zato struja ne postigne svoju konačnu jakost, koja joj pripada po Ohmovu zakonu, trenutačno u času uklapanja, već proteče neko, redovito maleno vrijeme. U to potrošena energija je magnetskog oblika i zove se unutrašnjom energijom kruga struje. Isto tako magnetsko polje kruga struje ne izčezava trenutačno u času razklapa. Ako je L koeficijent samoindukcije (v.) kruga struje, mjeren u henrima, a jakost i struje je mjerena u amperima, onda je unutrašnja energija $W = \frac{1}{2} Li^2$ džaula.



Sl. 7.

Za mnoga pitanja dovoljno je kovnu žicu krupno predočiti kao posudu neprodušnih stiena izpunjenu slobodnim elektronima, koji su u živom gibanju podjednako usmjerenom u svim smjerovima. Stavimo li neku električku napetost između krajeva žice, u nesređenom gibanju elektrona pretegne komponenta gibanja protiv smjera napetosti.



Sl. 8. Polarni diagram promjene električkog otpora volframova jednokristala u zavisnosti o položaju magnetskog polja ($H=18100$ ersteda) prema glavnoj ravnini kristalne mreže kod $4,22^\circ\text{K}$ (E. Justi, 1941)

Brzine ovoga gibanja elektrona protiv smjera napetosti u žici vrlo su male; na pr. ako je na krajevima bakrene žice presjeka 1 mm^2 , a dužine 10 m , napetost 1 volt , izlazi za prosječnu brzinu elektrona $0,04\text{ cm/sec}$. Međutim se djelovanje struje širi brzinom svjetlosti. Djelovanje Coulombovih sila kovinskih iona na elektrone i srazovi ovih s njima očituju se kao električki otpor, a energija, izgubljena u tome, kao Jouleova toplina.

Kod ionskih struja u plinovima i u slabo vodljivim tekućinama Ohmov zakon vrijedi samo u jednom uzkom području nižih napetosti. Kod daljeg podizanja napetosti porast jakosti struje zaostaje za porastom napetosti, a kod nešto viših napetosti nastaje pojav zasićenosti, gdje jakost struje ostaje stalna i nezavisna o napetosti; to je onda, kad u svakom djeliću vremena svi raspoloživi ionski parovi stignu na elektrode. Zbog golemog mnoštva vodnih elektrona u 1 cm^3 kovine pojavi zasićenosti ne dađu se opaziti kod običnih gustoća vodne struje u žicama. Bridgman (1922) je na izvanredno tankim slojevima nekih kovina kod vrlo velikih gustoća struje $\frac{i}{q} = 5.10^6$ ampera/ cm^2 našao jakosti struje za prosječno 1% manje, nego bi trebale biti po Ohmovu zakonu.

Kroz posljednjih 15 godina iztraživane su promjene električkog otpora različitih kovina, osobito kovinskih jednokristala, u vrlo jakim magnetskim poljima kod vrlo niskih (tekući dušik) i kod najnižih temperatura (tekući helij). Uspoređivanje dobivenih rezultata s onima kod obične temperature pokazalo je, da kod obične temperature uvelike utječe na gibanje vodnih elektrona u kovinama

toplinsko titranje iona u kristalnoj mreži. Kod temperature tekućeg helija prestaje titranje kristalne mreže, pa promjene otpora u zavisnosti o pravcu magnetskog polja pokazuju, da se elektroni lakše gibaju u nekim ravninama kristalne mreže nego u drugim. To se očituje time, što je električki otpor jednokristala u jakome magnetskom polju manji u pravcu tih prvih ravnina nego u pravcu drugih ravnina (sl. 8; $\rightarrow$ električke jedinice). M. K.

Električke jedinice u širem smislu jedinice, kojima se mjere električke i magnetske veličine, kao jakost električke struje, električki napon, električki otpor, tok magnetske indukcije, permeabilnost i t. d. Za svaku od ovih veličina mogla bi se definirati samostalna jedinica. Uzmimo na pr., da jedinice za prve tri veličine odaberemo ovako: električka struja 1 raztvori u jednoj sekundi jedan miligram vode, električki napon 1 vlada među polovima olovnog akumulatora, električki otpor stupca žive dugog 10 cm i presjeka 1 mm^2 iznosi 1 . — Ohmov zakon, koji veže te tri veličine, uz taj izbor jedinica glasi: $Ri:U = k = 2,0$, gdje su R, i, U mjerni brojevi otpora, struje i napona. Budući da napisana veza vrijedi bez obzira, od čega je žica, kakav ima oblik i koju temperaturu, te kako je jaka struja, iznos broja k na desnoj strani ovisi samo o veličini odabranih jedinica za otpor, jakost struje i napon. Ovako napisan Ohmov zakon ima posebni, odabranim jedinicama prilagođeni oblik. — Takvo se razmatranje može nadovezati na bilo koju jednačbu, koja povezuje elektromagnetske (elmg) veličine. Ako je napisano tako, da je prilagođena nekom naročito izboru e-ih j-a, tad je to posebna elmg jednačba.

Teorija elektromagnetizma može se razviti bez obzira na jedinice, kojima se imaju mjeriti elmg veličine. U tom slučaju pišu se osnovne elmg jednačbe tako, da se u njima stavi brojčani faktor $k=1$. Te elmg jednačbe i iz njih izvedene zovu se obćima za razliku od posebnih. U nekim izvedenim obćim elmg jednačbama dolaze brojčani faktori, na pr. $\frac{1}{2}, 4\pi, \dots$, kao posljedica pri njihovom izvodu provedenih računskih operacija. Tako na pr. u obćem obliku pisan električki Coulombov zakon, koji daje silu F , kojom točkasti električki naboji e_1 i e_2 djeluju jedan na drugi,

$$F = \frac{e_1 e_2}{4\pi \epsilon r^2}$$

sadržava brojčani faktor 4π (r je razmak među nabojima, a ϵ dielektrička konstanta sredstva, kroz koje djeluju naboji). Za obće elmg jednačbe još se kaže da su racionalnog ili Lorentz-Heavisideova oblika.

E. j. čine sustav, ako su brojčani faktori, koje treba staviti u obće elmg jednačbe, da se prilagode tim jedinicama, malobrojni i jednostavni. Sustavi e-ih j-a mogu se prema povijesnom razvoju označiti kao absolutni, empirijski i moderni.

1. ABSOLUTNI SUSTAVI ELEKTRICKIH JEDINICA.

a) *Elektrostatski* (elst) cgs sustav uzima kao osnovne jedinice: za dužinu centimetar, za masu gram, za vrijeme sekundu i za dielektričku konstantu — dielektričku konstantu praznoga prostora, dakle: $\text{cm}, \text{g}, \text{sek}, K_e$, gdje smo s K_e obilježili odabranu jedinicu za dielektričku konstantu, jer nema posebnog imena. Sve ostale elst cgs jedinice izvede se iz ove četiri osnovne. Pritom se služimo elmg jednačbama t. zv. obćnog oblika, koje se od obćih (racionalnih) elmg jednačbi razlikuju u položaju brojčanog faktora 4π . (Ovo premještanje brojčanog faktora 4π iz jednih jednačbi u druge jest prilagođivanje obćih jednačbi odabranim jedinicama.)

Elst cgs jedinica električkog naboja definira se pomoću električkog Coulombova zakona napisanog u obćnom obliku:

$$F = \frac{e_1 e_2}{\epsilon r^2} \quad (1)$$

Naime silu F mjerimo cgs jedinicom za silu, din, razmak r centimetrom, dielektričku konstantu ϵ elst cgs jedinicom K_e . Elst cgs jedinica za električki naboj Q_e odabira se tako, da mjerni brojevi naboja e_1 i e_2 u toj jedinici i mjerni brojevi veličina F, r, ϵ , u spomenutim jedinicama, uvršteni u jednačbu (1) na mjesto odnosnih veličina, zadovolje tu jednačbu. Prema tome električki naboj $1 Q_e$ odbija isto

takav u daljini 1 cm kroz prazni prostor ($\epsilon = \epsilon_0 = 1K_e$) silom 1 din. Definiciju jedinice Q_e možemo simbolički pisati

$$\text{din} = \frac{Q_e \cdot Q_e}{K_e \cdot \text{cm}^2}.$$

Iz gornje definicije izlazi ova oznaka

$$Q_e = \text{cm}^{3/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{sek}^{-1} \cdot K_e^{1/2}$$

(→ dimenzije u fizici, → din).

Električna struja u žici ima jakost 1 elst cgs jedinicu (1 I_e), ako presjekom žice prođe u 1 sek električki naboj 1 Q_e . Dakle $I_e = Q_e \cdot \text{sek}^{-1}$.

Elst cgs jedinica za magnetski naboj (jakost magnetskog pola) definira se jednačom za silu F , kojom kružna električna struja jakosti i djeluje na magnetski naboj m u središtu kruga:

$$F = 2\pi \frac{i m}{r}, \quad (2)$$

gdje je r polumjer kružnice, kojom teče električna struja. Točkasti magnetski naboj iznosi 1 elst cgs jedinicu, ako u središtu kružnice polumjera 1 cm djeluje na njega sila 2π din, kad kružnicom (koja je od žice) teče struja jaka 1 I_e .

Točkasti magnetski naboji m_1 i m_2 djeluju jedan na drugi silom F , koja je dana magnetskim Coulombovim zakonom:

$$F = \frac{m_1 m_2}{\mu r^2}, \quad (3)$$

gdje je r razmak magnetskih naboja, a μ permeabilnost sredstva, koje te naboje okružuje. Tim je zakonom definirana elst cgs jedinica M_e , kojom se mjeri permeabilnost. Ono bi sredstvo imalo permeabilnost 1 M_e , u kojem bi dva jedinična magnetska naboja (u elst cgs mjeri), u razmaku 1 cm, djelovala jedan na drugi silom 1 din.

Sredstva s golemom permeabilnosti $\mu = 1 M_e$ nema. Po Maxwellovoj teoriji jest brzina elmg valova u izolatoru

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}, \quad (4)$$

gdje je ϵ dielektrična konstanta, a μ permeabilnost izolatora. Za prazni prostor tim je izrazom dana i brzina svjetlosti

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{1 K_e \cdot \mu_0}} = 2,998 \cdot 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{sek}} = a \frac{\text{cm}}{\text{sek}}.$$

Ovdje je μ_0 permeabilnost praznog prostora izražena jedinicom M_e , a mjerni broj brzine svjetlosti u cm/sek označen je s a , t. j. $a = 2,998 \cdot 10^{10}$. Iz posljednjeg izraza sledi

$$\mu_0 = \frac{1}{a^2} \text{cm}^{-2} \cdot \text{sek}^2 \cdot K_e^{-1} = \frac{1}{a^2} M_e.$$

Prema tome je mjerni broj permeabilnosti praznog prostora, izražen u M_e , vrlo sitan, jer je a golemo. Iz magnetskog Coulombova zakona (3) sledi, da bi u praznom prostoru magnetski naboj 1 elst cgs jedinica odbijao isto takav u daljini 1 cm silom $a^2 \text{din} \approx 9 \cdot 10^{20}$ din, a ta je sila nešto veća od težine tereta od 900 bilijuna kilograma.

Definicije ostalih elst cgs jedinica mogu se nadovezati na cgs jedinicu radnje erg. Napon 1 elst cgs jedinica (1 V_e) vlada između dva mjesta električkog polja, ako pri prenosu električkog naboja 1 Q_e s jednog mjesta na drugo dobijemo odnosno potrošimo radnju 1 erg. Dakle $V_e = \text{cm}^{1/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{sek}^{-1} \cdot K_e^{-1/2}$. Najpoznatija je elst cgs jedinica kapaciteta: C_e . Kondenzator ima kapacitet 1 C_e , ako se električki napon među njegovim pločama promieni za 1 V_e , kad prenesemo električki naboj 1 Q_e s jednog obloga na drugi. Odatle oznaka $C_e = \text{cm} \cdot K_e$.

b) *Elektromagnetski cgs sustav* uzima kao osnovne jedinice: za dužinu centimetar, za masu gram, za vrijeme sekundu i za permeabilnost — permeabilnost praznog prostora (M_m).

Sled definicija izvedenih jedinica obrnut je prema onome u elst cgs sustavu i počinje definicijom elmg cgs jedinice za magnetski naboj pomoću magnetskog Coulombova zakona (3). Iz (2) zatim sledi definicija elmg cgs jedinice I_m za jakost električke struje. Elmg cgs jedinica Q_m za električki naboj definira se kao naboj, što ga prenese električna struja jaka 1 I_m u 1 sek. Iz električkog Coulombova zakona (1) sledi definicija elmg cgs jedinice K_m za dielektričku konstantu.

Definicije ostalih elmg cgs jedinica mogu se nadovezati na cgs jedinicu radnje erg. Najpoznatije elmg cgs jedinice jesu: ersted za jakost magnetskog polja, gaus za magnetsku indukciju i maksvel za tok magnetske indukcije. — U središtu kruga, kojim teče električna struja jakosti 1 I_m , jakost je magnetskog polja 2π ersted, ako je polumjer kruga 1 cm, bez obzira, kakvim je jednoličnim sredstvom struja okružena. — U daljini 1 cm od točkastog magnetskog naboja 1 elmg cgs jedinica jest magnetska indukcija 1 gaus, bez obzira, kakvim je jednoličnim sredstvom taj naboj okružen. — Kroz površinu 1 cm^2 , okomitu na smjer magnetske indukcije veličine 1 gaus, tok je 1 maksvel.

Budući da opet vrijedi jednačba (4), koja daje brzinu elmg valova u izolatoru, to za brzinu svjetlosti c ovdje imamo

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot 1 M_m}} = a \frac{\text{cm}}{\text{sek}}.$$

Ovdje je ϵ_0 dielektrična konstanta praznog prostora izražena jedinicom K_m . Odatle sledi $\epsilon_0 = \frac{1}{a^2} \text{cm}^{-2} \cdot \text{sek}^2 \cdot M_m^{-1}$ = $\frac{1}{a^2} K_m$. Prema tome je mjerni broj dielektričke konstante praznog prostora, izražene u K_m , vrlo sitan. Iz električkog Coulombova zakona (1) sledi, da bi u praznom prostoru električki naboj 1 Q_m odbijao isto takav u daljini 1 cm golemom silom a^2 din.

Dielektrična konstanta praznog prostora ϵ_0 jest u elst cgs sustavu 1 K_e , a u elmg cgs sustavu $\frac{1}{a^2} K_m$. Dakle

$$1 K_e = \frac{1}{a^2} K_m, \text{ ili } K_m = a^2 K_e.$$

Prema tome možemo zamisliti, da elmg cgs sustav nastaje iz elst cgs sustava, ako jedinicu dielektričke konstante povećamo a^2 puta, a ostale osnovne jedinice (cm, g, sek) ostavimo nepromijenjene. Iz oznaka elst cgs jedinica, koje su jednako građene kao i dimenzijski izrazi, sledi neposredno

$$Q_m = a Q_e$$

$$I_m = a I_e$$

$$M_m = \frac{1}{a^2} M_e$$

$$V_m = \frac{1}{a} V_e$$

$$C_m = a^2 C_e, \text{ i t. d.}$$

Prema tome izmjeriti bilo koju električku ili magnetsku veličinu u elst cgs jedinicom i elmg cgs jedinicom jest isto, što i odrediti mjerni broj a brzine svjetlosti u praznome prostoru izražene jedinicom cm/sek (mjerjenja Webera i Kohlrauscha, 1856).

c) *Miešani sustav električkih cgs jedinica* jest onaj, u kojemu se sve električke veličine (dielektrična konstanta, električki naboj, jakost električke struje, otpor, kapacitet, ...) mjere elst cgs jedinicama, a magnetske veličine (permeabilnost, magnetski naboj, indukcioni koeficijent...) elmg cgs jedinicama. Mjerni broj brzine svjetlosti a jest brojčani faktor, kojim su elmg jednačbe među veličinama obiju vrsta prilagođene ovom izboru jedinica. Tako na pr. zakon inducirane elektromotorne sile ima ovdje ovaj oblik

$$U = \frac{1}{a} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t},$$

jer za U valja staviti mjerni broj inducirane elektromotorne sile mjerene elst cgs jedinicom za električki napon, dok se promjena toka magnetske indukcije $\Delta \Phi$ u vremenu Δt mjeri elmg cgs jedinicom maksvel/sek.

Miešani cgs sustav upotreбили su u svojim razpravama Helmholtz i Hertz. U teoretskoj fizici održao se do danas. Naziva se i Gausovim sustavom.

Služimo li se pri definiciji elst odnosno elmg cgs jedinica obćim elmg jednačbama, t. j. jednačbama racionalnog oblika, tad se tako dobivene e. j. razlikuju od obćinih, o kojima je bilo dosada govora. Miešani sustav racionalnih cgs jedinica upotrebio je Lorentz.

Redovito se još upotrebljavaju oznake izvedenih elst odnosno elmg cgs jedinica bez K_e odnosno bez M_m . Na pr. $Q_e = \text{cm}^{3/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{sek}^{-1}$, $C_e = \text{cm}$ i t. d.

d) *Absolutni praktični sustav* ima ove osnovne jedinice: za dužinu kvadrant = 10^9 cm, za masu jedinicu = 10^{-11} gram, za vrijeme sekundu i za permeabilnost — permeabilnost praznog prostora. Jedinica dužine kvadrant dobila je svoje ime odatle, što je malone točno jednaka četvrtini zemaljskog meridiana. Mnoge e. j. ovoga sustava imaju prikladnu veličinu za elektrotehničku praksu i dobile su naročita imena. Pomoću dimenzijskih izraza slijedi ovaj odnošaj između absolutnih praktičnih i elmg cgs jedinica:

za električki naboj	1 abs kulon	= 10^{-1} elmg cgs jedinica
„ električku struju	1 abs amper	= 10^{-1} „ „ „
„ električki napon	1 abs volt	= 10^8 „ „ „
„ električki otpor	1 abs om	= 10^9 „ „ „
„ kapacitet	1 abs farad	= 10^{-9} „ „ „
„ indukc. koeficient	1 abs henri	= 10^9 „ „ „
	1 abs džaul	= 10^7 erg

Ostale se praktične jedinice, izvedene pomoću elmg jednačbi, pisanih na običan način, ne upotrebljavaju.

2. EMPIRIČKI SUSTAVI ELEKTRIČNIH JEDINICA.

Definicije abs praktičnih jedinica smatrale su se odviše abstraktnima za praksu, za koju su bile zamišljene. Zato su međunarodnim dogovorom utvrđeni praksi pristupačniji propisi, kojima se imaju ostvariti praktične jedinice. Ovako definirane praktične jedinice zovu se, za razliku od absolutnih, međunarodnima (int).

Prvi su propisi dogovoreni na međunarodnom sastanku elektrotehničara u Chicagu (1893). — Jedinicu električkog otpora int om ima stupac žice dug 106,3 cm i jednoličnog presjeka 1 mm², pri temperaturi leda, koji se tali. — Jedinicu jakosti električke struje int amper ima stalna električka struja, koja iz vodene raztopine srebrnog nitrata izluči 1,118 mg srebra u sekundi. — Ti su brojevi odabrani tako, da se, prema ondašnjem stanju električkih mjerenja, postigne što bolje poklapanje int i abs praktičnih jedinica. Pošto je definirana jedinica električkog otpora i jedinica jakosti električke struje, to onda pomoću Ohmova zakona slijedi definicija jedinice električkog napona, u ovom slučaju int volt. Za praksu je međutim važno, da se i int volt ostvari neposredno naponom nekog normalnog galvanskog članka. Na sastanku u Chicagu uzet je Clarkov članak kao normalan, i dogovoreno je, kolikim će se smatrati njegov napon mjeren u int voltima. Domala se pokazalo, da je Clarkovim člankom određen volt osjetljivo veći od int volta određenog int omom i int amperom.

Na međunarodnom kongresu u Londonu (1908) zaključeno je, da se imaju smatrati int om i int amper kao osnovne međunarodne jedinice. Zatim su propisi za ostvarenje tih jedinica promijenjeni utoliko, što je u definiciji int oma broj 106,3 nadomješten brojem 106,300, a zahtjev, da površina presjeka stupca žive bude 1 mm², zahtjevom, da živa, sadržana u stupcu dužine 106,300 cm i jednoličnog presjeka, ima masu 14,4521 gram; u definiciji int ampera broj 1,118 nadomješten je brojem 1,11800. Ove su se promjene provele zato, jer su se preciznim mjeračim metodama mogle mjeriti električke veličine na više znamenaka, nego što su ih imali brojevi dogovoreni u Chicagu. Zatim je zaključeno, da će se Westonov članak (→ članak električki) upotrebljavati kao normalan, i, na osnovu ondašnjih mjerenja, njegov je napon pri 20°C ustanovljen sa 1,0184 int volt. Međutim god. 1910 ta je vrijednost popravljena na 1,0183 int volt.

Kasnijim se mjerenjima ustanovilo, da je int om nešto veći od abs oma, a int amper malo manji od abs ampera. Prema današnjem (1944) stanju mjerenja

$$\begin{aligned} 1 \text{ int om} &= 1.0005 \text{ abs om} \\ 1 \text{ int amp} &= (1 - 0.0001) \text{ abs amp.} \end{aligned}$$

Iz osnovnih međunarodnih jedinica int om i int amper izvode se int volt, int kulon, int farad, int henri, int vat, int džaul. Električki napon 1 int volt vlada među krajevima otpora 1 int om, kad njime teče stalna električka struja, jaka 1 int amper. — Električki naboj 1 int kulon prođe u 1 sekundi presjekom žice, kad njome teče stalna električka struja, jaka 1 int amper. — Kondenzator ima kapacitet 1 int farad, ako se električki napon među njegovim oblozima promijeni za 1 int volt, kad naboj 1 int kulon priđe s jednog obloga na drugi. — Samoindukciju 1 int henri ima vodič, u kojem se inducira elektromotorna sila 1 int volt, kad se struja u vodiču mjenja brzinom 1 int amp/sek. — U vodiču se troši električka snaga 1 int vat, kad vodičem teče stalna električka struja, jaka 1 int amper, a među njegovim kra-

jevima vlada napon 1 int volt; tad se izvrši u 1 sekundi radnja 1 int džaul.

Stariji elektrotehnički sustav e-ih j-a služi se netom navedenim praktičnim jedinicama, a uz ove upotrebljava i ove abs elmg cgs jedinice: M_m za permeabilnost, crsted za jakost magnetskog polja, gaus za magnetsku indukciju i maksvel za tok magnetske indukcije; dielektrička konstanta se mjeri abs. elst cgs jedinicom. Prema tome je ovaj sustav miešan. Elmg jednačbe, prilagođene ovom izboru jedinica, pišu se s takvim brojčanim faktorima, kao da se int praktične jedinice podudaraju s abs praktičnima, jer je prije navedena razlika za praksu beznačajna. Tako na pr. zakon inducirane elektromotorne sile ima ovdje ovaj oblik

$$U = 10^{-8} \frac{\Delta \phi}{\Delta t},$$

jer za U valja staviti mjerni broj inducirane elektromotorne sile mjerene u voltima, dok za kvocijent nadesno mjerni broj brzine, kojom se mjenja tok magnetske indukcije mjerene elmg cgs jedinicom maksvel/sek.

Noviji elektrotehnički sustav uzima kao osnovne jedinice int om, int amper, sekundu i za dužinu centimetar ili metar. Pri definiciji izvedenih jedinica služi se obćim (racionalnim) elmg jednačbama, a zahtijeva se, da u ove ne pridode nikakav novi brojčani faktor. Tako se na pr. jedinica jakosti magnetskog polja definira izrazom, koji daje jakost magnetskog polja H u dugoj, jednolično namotanjoj uzvojnici

$$H = \frac{n}{l},$$

gdje je i jakost struje u uzvojnici, n broj zavoja, a l dužina uzvojnice. Budući da ovdje i mjerimo amperom, l centimetrom odnosno metrom, to onda slijedi, da H valja mjeriti jedinicom amp/cm odnosno amp/met (ili amp. zavoj/cm odnosno ampzavoj/met). U ovom je sustavu jedinica mase izvedena jedinica. Može se izvesti na pr. iz izraza, koji daje snagu stalne električke struje. Ako je cm jedinica dužine, tad je elektrotehnička jedinica mase

$$1 \frac{\text{int om} \cdot \text{int amp}^2 \cdot \text{sek}^3}{\text{cm}^2} = 10003 \text{ kg},$$

dakle malo veća od 10 tona.

U praksi se upotrebljavaju i jedinice izvan sustava. Tako se snaga motora mjeri u kilovatima (1 kilovat = 1000 vat), a električka energija prodaje se na kilovatsate (kilovat-sat jest radnja, što je izvrši motor, kad radi snagom 1 kilovat u 1 satu). Slabe se struje mjere u miliamperima i mikroamperima, a visoki naponi u kilovoltima, kapaciteti u mikrofaramima i pikofaramima; naboj, koji prođe elek. člankom, u ampersatima (naboj 1 ampersat prođe presjekom vodiča u 1 sat, ako njim teče stalna elek. struja 1 amper).

Napomena. Izvršni organ međunarodne metarske konvencije Glavni savjet za mjere i uteze zaključio je g. 1933 na prijedlog njemu podređenog Odbora za mjere i uteze, da se imaju uvesti namjesto međunarodnih praktičnih jedinica absolutne praktične. Istodobno je ovlastio spomenuti odbor, da odredi dan, kad ima ta promjena nastupiti. Taj je zaključak obavezan za sve države, koje su pristupile metarskoj konvenciji. Odbor za mjere i uteze zaključio je g. 1935, da se 1. siječnja 1940 ima prići na absolutne jedinice. U tom se smislu trebalo promijeniti zakone o e-im j-ama izdane u državama metarske konvencije. Nastali rat spriječio je, da se provede ta promjena, pak su još i danas (1945) u krepsti međunarodne praktične jedinice. Međutim, s obzirom na dobro poklapanje međunarodnih praktičnih jedinica s absolutnima ta bi promjena bila za obična električka mjerenja bez ikakvih posljedica. Razlike bi se opazile tek kod mjeračih metoda s pogrješkom manjom od 1‰.

Za praksu međutim treba ostvariti te jedinice zgodnim normalama. Prema današnjem stanju mjerenja ima stupac žive, dug 106,250 cm, mase 14,4453 gram, i jednoličnog presjeka, pri 0°C otpor 1 abs om. Abs amper izluči u sekundi 1,11815 mg srebra. Westonov članak ima napon 1,01865 abs volt. — Nije toliko znatna razlika u veličini tih brojeva prema onima, kojima su definirane int praktične jedinice, koliko u njihovu značaju. Stari su brojevi dio definicije, pa zato nepromjenljivi, a ovi rezultati mjerenja, i popravljat će se, kako bude napredovala tehnika mjerenja.

3. MODERNI SUSTAVI JEDINICA.

Ovi su sustavi zamišljeni tako, da im pripadaju praktične električne jedinice, a mehaničke (za silu, masu, ...) imaju zgodnu veličinu. Pri definiciji izvedenih e-ih j-a služe se obćim (racionalnim) elmg jednačbama.

a) *Giorgijev sustav* ima osnovne jedinice: metar, kilogram, sekunda, om. Načelno bi se veličina osnovne e-e je mogla uzeti po volji. Odaberemo li abs om, tad u ovaj sustav ulaze abs praktične jedinice: amper, volt, kulon, farad, henri. Uzmemo li naprotiv kao jedinicu otpora int om, tad se farad i henri u Giorgijevu sustavu podudaraju s int faradom odnosno int henrijem; no amper, volt i kulon nisu ni int ni abs, nego t. zv. semiabsolutni, jer se za njihovu definiciju služimo abs vatom (jedinica snage u Giorgijevu sustavu) i int omom. Vat je naime produkt volta i ampera, a om omjer.

Uzmemo li, da se jedinica električkog otpora Giorgijeva sustava podudara s abs omom, tad su sve jedinice novijeg elektrotehničkog sustava, nakon prielaza na abs praktične jedinice (a metar je jedinica dužine), jednake e-im j-ama Giorgijeva sustava.

b) *Sustav Kalantaroffa* obuhvaća poput Giorgijeva i mehaniku i elektricitetu, a po veličini se jedinice ovog sustava podudaraju s jedinicama Giorgijeva, ali se u mehanici uzimaju kao osnovne jedinice: metar, sekunda i jedinica djelovanja (predlaže se ime plank); a u elektriciteti osnovne jedinice: metar, sekunda, kulon i jedinica za magnetski naboj (predlaže se ime veber).

Jedinicu djelovanja plank treba odabrati tako, da se u tom sustavu izvedena jedinica za masu podudara s kilogramom. Tad u taj sustav idu džaul = plank/sek, zatim vat = plank/sek². Budući da se pri definiciji e-ih j-a služimo elmg jednačbama racionalnog oblika, to se magnetski naboj i tok magnetske indukcije mjere istom jedinicom: umnožkom jedinice električkog napona i sekunde. S druge strane električki se naboj mjeri umnožkom jedinice za jakost električke struje i sekunde. Prema tome je produkt jedinica za električki odnosno magnetski naboj jednak jedinici djelovanja, jer je jedinica snage jednaka umnožku jedinica za električku struju i električki napon. U sustavu Kalantaroffa plank je umnožak dviju e-ih j-a: za električki odnosno magnetski naboj. Odaberemo li jednu od njih, tad je druga ovom određena. Ako je jedinica električkog naboja abs kulon, tad se sve e. j. podudaraju s jedinicama Giorgijeva sustava.

U sustavu Kalantaroffa vrlo je zgodna oznaka izvedenih e-ih j-a, jer je građena od met, sek, kulon, veber, budući da se svagdje u elektriciteti osnovna mehanička jedinica plank nadomješta umnožkom veber.kulon. Prema tome se u sustavu Kalantaroffa ciepa pri prielazu na područje elektriciteta osnovna mehanička jedinica plank u dvie električke.

Napomena. Vrlo je pregledna oznaka izvedenih e-ih j-a, koja se služi jedinicama amper, volt, sek, met. Tako je na pr. jedinica jakosti električkog polja volt/met. Takvo polje vlada među pločama širokog ravnog kondenzatora, kad je napon među pločama 1 volt, a razmak ploča 1 metar. Ova se oznaka može upotrebljavati jednako i u sustavu Giorgija i u sustavu Kalantaroffa.

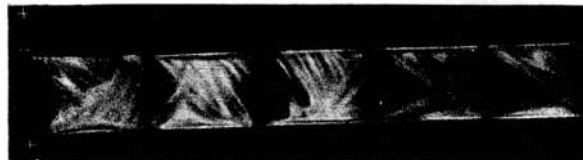
LIT.: J. Wallot, *Dimensionen, Einheiten, Maßsysteme*, Handbuch der Physik II., 1926; W. Jäger, *Absolute Maße und Einheiten*, Handbuch der Elektrizität und Magnetismus (Graetz) II., 1921; W. Wilson, *Theoretical Physics* II., 1933; J. Fischer, *Einführung in die klassische Elektrodynamik*, 1936; G. Oberdorfer, *Lehrbuch der Elektrotechnik* I., 1944.

Električki elementi → Članak.

Električki titraji (električke oscilacije) fizikalni su pojavi, kod kojih se periodski mjenja električko stanje u vodiču i u dielektrikumu. Izraz titraj potječe iz područja mehanike. U prenesenom smislu upotrebljava se i ondje, gdje se ne radi o gibanju, već o periodskom mienjanju fizikalnih veličina, kao što su električka struja, napetost, električko i magnetsko polje.

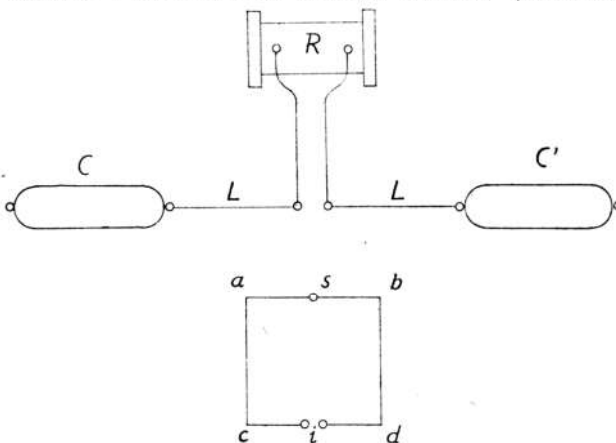
1. Prvi pojavi električkog titranja pronađeni su kod proučavanja električke iskre. G. 1824 opazio je Savary, da se izbijanjem lajdenske boce kroz uzvojnici može čelična igla magnetizirati »anomalno«, t. j. tako, da smjer magnetiziranja nije u skladu sa smjerom struje, koju bi dalo jednosmjerno izjednačenje električkih naboja na oblozima boce. Na temelju toga Savary je zaključio, da ne mora uvijek vriediti Ampèreov zakon. Ponovno je iztra-

živao i držeći se Franklinove teorije nastojao protumačiti ovaj pojav američki fizičar J. Henry (Washington 1842). On je uzeo, da iza prvog glavnog izbijanja lajdenske boce sledi niz sve slabijih »refleksnih« izbijanja u izmjeničnim smjerovima. Drugom eksperimentalnom metodom otkrio je električke titraje W. Feddersen (1857). Promatrajući u zrcalu, koje se okreće, sliku iskre lajdenske boce našao je, da se ta slika sastoji od više dijelova (sl. 1). Iz fotografija ove slike mogao je odrediti trajanje ili vrieme titraja. Najviše frekvencije, s kojima je Feddersen radio, iznose oko milijun u sek. Helmholtz je na temelju fizioloških učinaka zaključio, da nastaju električki titraji, ako se polovi induksijskog aparata nadovežu na obloge lajdenske boce (1866).



Sl. 1. FOTOGRAFSKA SNIMKA ELEKTRICKE ISKRE (po Feddersenu)

2. U području električkih titraja osobito su važna Hertzova eksperimentalna izraživanja (1887—89). Hertz je pokazao, da se pomoću iskre mogu proizvesti električki titraji u ravnom vodiču (dipolu), a u drugom odijeljenom vodiču pobuđuju se titraji, koji su najjači u slučaju resonancije. Eksperimentalni uređaj, oscilator i resonator, nacrtao je u sl. 2. Hertzov otvoreni oscilator (»radiator«)



Sl. 2. HERTZOV OSCILATOR I RESONATOR

čine 2 štapa L, L vezana na konduktore C, C' , koji mogu biti kovne ploče, valjci, kugle. Kapacitet oscilatora je usredotočen u konduktorima, a samoindukcija u štapovima. Titraji se uzbuđuju Ruhmkorffovim induktorom R . Svaku iskrnu induktora prati nekoliko visokofrekventnih titraja. Resonator (sekundarni krug) je pravokutnik od žice određene veličine ($abcd$) s iskrištem i . U slučaju resonancije, na koju utječe i veličina iskre induktora, inducira se u sekundarnom krugu tolika napetost, da se na mjestu i pojave iskre. Maksimalna dužina ovih iskara je mjera za jačinu titraja u sekundarnom krugu. Razmicanjem konduktora C, C' po štapovima dobivao je Hertz različite dužine iskara i . Iz takvih pokusa izveo je krivulju resonancije s izrazitim maksimumom.

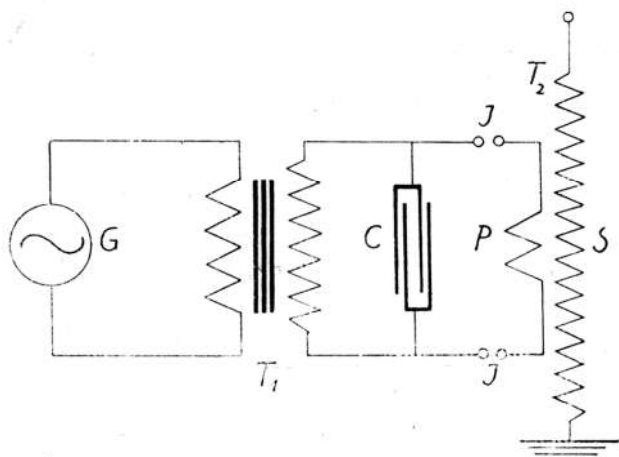
Hertz je pokazao, da su na krajevima žice $abcd$ trbusi, a na srednjem mjestu s čvor električne napetosti. Kod spajanja nekog mjesta žice sa zemljom umanjivala se ili je posve izčezla iskra i , dok takav spoj točke s nije nimalo na iskrnu utjecao. U žici Hertzova resonatora nastaju stojni električki valovi, koji se mogu razviti refleksijom titraja (periodskih električkih poremetnja) na krajevima. Klasičnim Hertzovim pokusima, kojima je Helmholtz dao poticaj, bila je svrha, da se iztraži, vriedi li za širenje električkih poremetnja starija elektrodinamska teorija, koju su razvili W. Thomson i Kirchhoff, ili novija Maxwelllova. Na temelju obiju teorija moglo se očekivati, da se električki titraji šire po ravnom vodiču konačnom

brzinom, koja je jednaka brzini svjetlosti. Obje su teorije uzimale, da u polju oscilatora nastaju inducirane elektromotorne sile, koje mogu izazvati električke titraje u krugu odijeljenog resonatora. No dok bi prema elektrodinamskoj teoriji pojavi indukcije morali slijediti momentano, prema Maxwelllovoj teoriji širila bi se indukcija kroz prostor jednakom konačnom brzinom kao električki titraji ravnom žicom. Važno ovo pitanje rješavao je Hertz pokusom, koji je H. Poincaré nazvao pokus razkršća (experimentum crucis). Usporedno s pločom Hertza oscilatora (sl. 2) stoji druga ploča, na kojoj je učvršćena 60 m duga žica s izoliranim slobodnim krajem. Pomicanjem udešenog resonatora duž ove žice određivao je Hertz mjesta najkraće i najduže iskre, t. j. čvorove i trbuhe stojnih električkih valova, koji su se na žici razvili. Našao je, da na valnu dužinu ne utječe tvar vodiča. Bakrena i željezna žica davale su jednako duge valove kao ciev napunjena razrijeđenom sumpornom kiselinom. Pomoću formula za kapacitet i samoindukciju izračunano je za Hertza oscilator vrijeme titraja $T = 2 \cdot 10^{-8}$ sek, dok je mjerenje davalo $\frac{\lambda}{2} = 2,8$ m. Za brzinu širenja električkih valova u žici

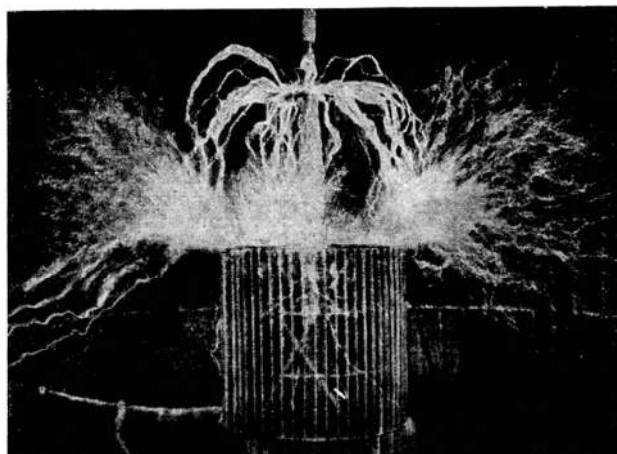
izlazi $c = \frac{\lambda}{T} = 280\,000$ km/sek. Radi jedne pogreške u izračunavanju kapaciteta izašla je Hertzu vrijednost $c = 200\,000$ km/sek, i on je neslaganje s teoretskom vrijednošću ($c = 300\,000$ km/sek) pripisivao nepoznatom uzroku. Na pogrešku Hertza račun upozorio je H. Poincaré (1891). Kasnija mjerenja Lechera (1890), Blondlota (1891), Drudea (1902) i dr., izvedena s kraćim električkim valovima, pokazala su sklad s teorijom.

U drugom nizu pokusa iztraživao je Hertz, kako na resonatorski krug utječu progresivni prostorni električki valovi zajedno s progresivnim valovima na žici, koji se mogu razviti, ako je slobodan kraj žice odveden u zemlju. Ako bi se oba valna niza širila različitim brzinama, mijenjala bi se fazna razlika, s kojom oni interferiraju, periodski, a to bi se opazalo kod udaljivanja resonatora. U slučaju, da su brzine širenja jednake, valni bi nizovi, radi stalne faze razlike, u svim daljinama na isti način interferirali. Radi mnogih smetnji i poteškoća, koje su nastajale zbog dugih valova ($\lambda = 5$ do 6 m) i nedovoljno velike prostorije eksperimentiranja, nisu Hertzovi eksperimenti ove vrste davali jasne rezultate. Naknadni Hertzovi pokusi sa stojnim električkim valovima (1893) slagali su se sa zahtjevima Maxwelllove teorije.

Služeći se kraćim električkim valovima ($\lambda \sim 60$ cm) izveo je Hertz niz pokusa, kakvi se izvode s valovima svjetlosti i zvuka. Kao oscilator za kratke valove upotrebljavao je Hertz 26 cm dugi, 3 cm široki mjedeni štap s iskrištem u sredini, namješten u žarišnoj crti paraboličnog zrcala. Pomoću linearnog resonatora mogao je slijediti tečaj valova kroz daljinu 16 m. S tim valovima, koje je Hertz zvao zrakama električke sile, izvodio je on eksperimente o refleksiji na kovnom zrcalu, o lomu u prizmi od izolatora, o ogibu, interferenciji i polarizaciji. Znamenit Hertzov rad na području električkih titraja nastavili su brojni iztra-



Sl. 3. UREDAJ ZA VISOKU FREKVENCIJU (po Tesli)

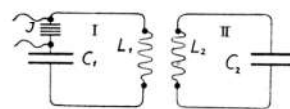


Sl. 4. IZBIJANJE TESLINA TRANSFORMATORA

živači, eksperimentatori i teoretičari, među kojima se izižu imena Lodge, Righi, Poincaré, M. Abraham, J. J. Thomson, M. Wien, Marconi.

3. *Teslini titraji.* Poslije Hertzovih pokusa izvodio je Tesla poznate eksperimente s visokofrekventnim titrajima (*»Tesline struje«* visoke napetosti i visoke frekvencije, 1890–93). Jedan Teslin uređaj pokazuje sl. 3, u kojoj je sa G označen generator jednofazne struje, T_1 transformator za nisku frekvenciju, C kondenzator (Teslin oblik), $I-I$ iskrišta, T_2 Teslin transformator. Transformacijom uvećana napetost generatora dolazi na obloge kondenzatora, koji se izbija kroz iskrišta i primarni svitak P Teslina transformatora. U sekundarnoj uzvojnici S s vrlo mnogo zavoja, koje vlastiti titraji meraju biti u resonanciji s titrajima primarnog kruga, nastaju indukcijom visokofrekventni titraji velike napetosti. Primarni krug s iskrištem vrši ulogu transformatora za visoku frekvenciju. Pomoću Teslina transformatora bez željezne jezgre, s uljem u svrhu izolacije, postizava se metodom resonancije mnogo puta veća napetost, nego što bi je dao obični transformator. Tesla je izgradio vrlo snažne aparature s turbinama prekidacima, koje su kod frekvencije od više stotina hiljada u sek. davale napetost od nekoliko milijuna volta i više metara duge iskre (sl. 4). Teslin su transformator upotrebljavali u početnim sustavima radiotelegrafije (Braun, Marconi od 1898 dalje). Marconi se služio Teslinom aparaturom, kad mu je uspjela prva prekooceanska brzoputna veza između Evrope i Amerike (1901). Tesla se služio i složenim iskrištem te postigao *»gašene titraje«* s malenim prigušenjem. Radi neznatnih elektrolitičkih učinaka visoka napetost Teslinih titraja nije opasna za ljudsko tijelo. Malene Tesline aparature služe u svrhe diatermije i električke masaže. Teoriju Teslina transformatora obradio je Drude (1903). Školske Tesline aparature konstruirali su Himstedt, Grimsehl, Elster i Geitel. U svrhe atomske fizike upotreбили su Teslin transformator američki iztraživači Lawrence, Sloane, Tuve i dr. (1930).

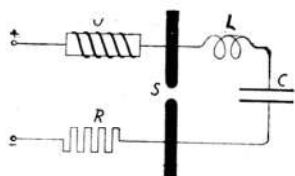
4. *Metoda gašenih iskara* (uzbuđenje udarima). Jaki električki titraji mogu se uzбудiti u zatvorenom krugu II (sl. 5) tako, da se on induktivno veže s krugom oscilatora I, koji je uzbuđen iskrama. Ako krugovi I i II imaju približno jednake frekvencije, nastaje *»pojava udara«*. U jednoj vremenskoj periodi prelazi električka energija iz kruga I u II, a u sljedećoj se vraća u krug I. Takav se proces mnogo puta ponavlja. Ovdje postoje slične prilike kao kod dva njihala, koja su vezana elastičnom spiralom (Oberbeckov pokus). U krugu II uzbuđena energija može se vratiti u primarni krug, ako se u zgodnom času iskra naglo uguši, t. j. ako je krug I prekinut. Uvjet za brzo gašenje iskre izpunjava Wienovo složeno iskrište sastavljeno od većeg broja uzporednih, posrebnih bakrenih ploča u malenim razmacima. Iskre se brzo gasu radi naglog prestanka ionizacije. Gusti niz kratkih iskara daje visoki ton (tönende Löschfunken, spark quen-



Sl. 5. INDUKTIVNO VEZANI KRUGOVI TITRANJA

ched, étincelles étouffées). Prije uvođenja elektronske ciev sustav je gašenih iskara vrlo dobro služio u svrhe radio-telefografije na velike daljine (M. Wien, 1906/7).

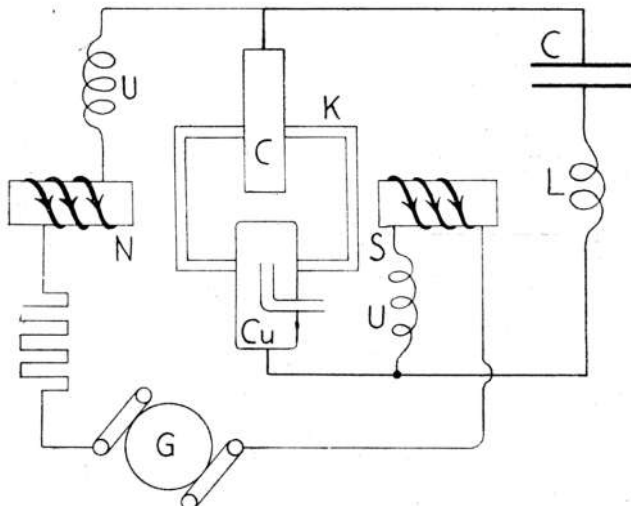
5. *Nepriгуšeni titraji lučnog plamena.* W. Duddell je pokazao, da se nepriгуšeni električki titraji mogu načiniti pomoću lučnog električkog plamena (1900). Na sl. 6 je nacrtan Duddellov spoj. Preko



Sl. 6. LUCNI PLAMEN KAO GENERATOR ELEKTR. TITRAJA (po Duddellu)

odpornika R i uгуšivača U spojeni su polovi lučne lampe s izvorom stalne napetosti (200 volta). S druge su strane na lučni plamen S priključeni samoinduktivni svitak L i kondenzator C . Uz povoljne uvjete uzbude se u krugu (LC) nepriгуšeni titraji s periodom $T = 2\pi \sqrt{LC}$. Zvučne se frekvencije ovdje lakše postizavaju nego visoke. Radi promjenljive struje lučnog plamena ugrijava se čas jače, čas slabije okolni uzduh. Time nastaju zvučni titraji, koje uho zamjećuje kao ton (zviždeci lučni plamen).

Duddellovu metodu usavršio je W. Poulsen (1903). Sl. 7 pokazuje shemu Poulsenove lučne lampe s krugom titranja (LC). Anoda je bakren valjak, hlađen vodom, a katoda homogeni ugljen. Obje se elektrode okreću. Jednoliko gorjenje plamena postizava se kapanjem žeste u komoricu K . Time se stvara atmosfera vodika. Magnetsko polje među

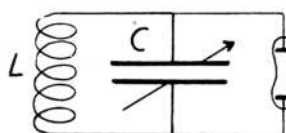


Sl. 7. GENERATOR S LUCNIM PLAMENOM (po Poulsenu)

polovima N, S ima svrhu, da iz plamena iztjera ione. Ugušivači UU priče prielaz titraja u generator G . Poulsenove generatore za duge električke valove (do 24.000 m) upotrebljavale su velike svjetske radio-postaje do novijeg vremena.

6. Elektronska ciev kao generator električkih titraja → elektronska ciev.

7. Za mjerenje frekvencije krugova titranja služi na resonanciji osnovan mjerac frekvencije (Dönitz, 1903). Glavni dieľovi aparata jesu kondenzator »na vrtnju« i nekoliko uzvojnica za različna područja frekvencije. Kondenzator i uzvojnica čine zatvoren krug titranja (sl. 8), koji se induktivno veže s krugom, kojega frekvenciju određujemo. Kapacitet kondenzatora se mienja, dok ne nastupi resonancija, koju pokazuje na kondenzator priključena Geisslerova cjevčica ili telefonska slušalica s kristalnim detektorom (ili s tikkrom) ili osjetljivi vatmetar s tankom žicom. Ako je skala kondenzatora baždarena u valnim dužinama, aparat se zove valomjer (Wellenmesser, ondomètre, wavemeter).



Sl. 8. SHEMA MJERAČA FREKVENCIE S GEISSLEROVOM CIEVI

tar s tankom žicom. Ako je skala kondenzatora baždarena u valnim dužinama, aparat se zove valomjer (Wellenmesser, ondomètre, wavemeter).

Postoji nekoliko metoda za baždarenje mjerača frekvencije. Kod jedne metode izračunavaju se pojedine frekvencije iz poznatih vrijednosti samoindukcije (L) i kapaciteta (C). Ove vrijednosti se dobivaju iz formula za L i C , u kojima dolaze dimenzije kondenzatora i samoinduktivnog svitka. Za vrlo točno baždarenje služi piezo-električki kvarc.

8. *Teorija električkih titraja.* Prije spomenutih Feddersenovih pokusa došao je W. Thomson teoretskim izražavanjima do spoznaje, da je izbijanje kondenzatora oscilatoran pojav. U Thomsonovu krugu titranja, koji je sastavljen od kondenzatora s kapacitetom C i stalne samoindukcije L , označit ćemo s q momentani naboj, s V momentanu napetost kondenzatora, s i momentanu struju, s r otpor samoinduktivnog svitka. Da je krug bez odpora, ostao bi zbroj elektrostatske energije ($\frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$) i magnetske

energije ($\frac{1}{2} Li^2$) stalan (zakon energije). Radi otpora r prelazi u vremenu dt dio ciele energije u Jouleovu toplinu $i^2 r dt$. Iz

$$-d\left(\frac{1}{2} \frac{q^2}{C} + \frac{1}{2} Li^2\right) = i^2 r dt$$

izvodi Thomson diferencialnu jednačbu električkog titraja

$$\frac{dq}{dt} + \frac{r}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0 \quad (1)$$

i dolazi do rješenja

$$q = K_1 e^{-\alpha_1 t} + K_2 e^{-\alpha_2 t}, \text{ gdje je } \alpha_{1,2} = \frac{r}{2L} \pm \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$$

U sličnim jednačbama mjesto q dolazi V odnosno i .

Ako je izraz pod znakom koriena ≥ 0 , izlaze za α_1, α_2 realne vrijednosti. U tom je slučaju izbijanje kondenzatora aperiodsko (bez titraja). Ako je $\frac{r^2}{4L^2} < \frac{1}{LC}$, rješenje

se svodi na oblik $q = Q e^{-kt} \sin(\omega t + \varphi)$, u kojem je

$$k = \frac{r}{2L}, \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2}}, \varphi = \text{faza titraja.}$$

Slične formule vriede za napetost i struju. Između struje i napetosti postoji razlika faze $\pi/2$.

Označimo li sa τ vrijeme titraja, radi relacije $\omega\tau = 2\pi$,

$$\text{sliedi } \tau = \frac{2\pi^2}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2}}} \quad (\text{Thomsonova formula za prigušene sinus-titraje, 1853}). \quad (3)$$

Smije li se r^2 zanemariti prema $\frac{4L}{C}$, izlazi $\tau = 2\pi \sqrt{LC}$.

U Thomsonovoj teoriji nije uzet u račun gubitak energije emisijom električkih valova u prostor.

Iz formule (2) sliedi, da je omjer amplituda istog smjera za dvie susjedne periode jednak

$$\frac{Q}{Q_0} = e^{\frac{2\pi k}{\omega}} = e^{k\tau}.$$

Kao mjera za prigušenje titraja (Dämpfung, ammortissement, damping) odabrana je veličina

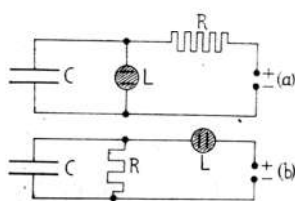
$$\vartheta = \log \text{nat} \frac{Q}{Q_0} = k\tau \quad (\text{logaritamski dekrement titraja}).$$

Obzirom na formulu (3) izlazi

$$\vartheta = \pi r \sqrt{\frac{C}{L}}, \tau = 2\pi \sqrt{LC \left(1 + \frac{r^2}{4\pi^2}\right)}.$$

9. *Preskočni titraji.* U novijoj tehnici važnu ulogu ima osobita vrst električkih titraja, koji se zovu preskočni titraji (Kippschwingungen, Relaxationsschwingungen, kippvibration). Obćenito se može reći, da preskočni titraji nastaju, ako električka energija, preko labilne točke, preskakuje između dva stabilna stanja. Prema načinu dobivanja i tehničkoj primjeni razlikujemo slobodne i sinhronizirane (prisilne) preskočne titraje.

U sl. 9a nacrtan je jednostavan spoj za dobivanje slobodnih preskočnih titraja pomoću lampe tinjalice (spoj sa bljescima, Glimmlampenblinkschaltung, Schröter, 1919). Na polove stalne napetosti stavlja se preko velikog otpora R kondenzator C (na pr. 1 μf) i s njim uzporedno lampa-tinjala-



SL. 9. SPOJEVI ZA DOBIVANJE SLOBODNIH PRESKOČNIH TITRAJA (po Schröteru)

do vrijednosti V_p , kondenzator počne izbijati kroz maleni unutarnji otpor tinjalice. Ovo izbijanje traje, dok se napetost snizi do vrijednosti V_g . U tom času lampa-tinjalica utrne, a kondenzator se ponovno nabija do napetosti V_p .

Na osnovi sheme u sl. 9a dobivao je preskočne titraje već Hittorf (1859). Služio se kod toga Geisslerovom cieví.

Sl. 9b pokazuje nešto izmijenjeni spoj. Vremena nabijanja i izbijanja kondenzatora za spoj 9a jednaka su vremenima izbijanja i nabijanja za spoj 9b. Perioda preskočnog titraja ista je za oba slučaja.

U sl. 10 promjene napetosti grafički su prikazane. U točki a počinje pravilan pojav preskočnih titraja. Radi zubčastog oblika krivulje $V = f(t)$ dobili su ovakvi titraji ime zubčasti titraji (Sägezahn-schwingungen). Početnom dielu Oa krivulje napetosti pripada jednačba

$$V_c = V \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right),$$

u kojoj je V zadana stalna napetost, V_c napetost kondenzatora, $\frac{1}{RC}$ vremenska

konstanta. Za frekvenciju preskočnih titraja (Kippfrequenz, preskočna frekvencija) vrijedi približno formula

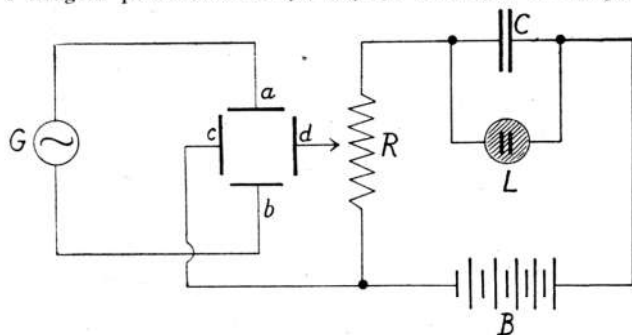
$$f = \frac{1}{RC \log \frac{V - V_g}{V - V_p}}$$

Recipročna vrijednost $\frac{1}{f} = t$ nazvana je preskočnom periodom.

Od tehničkih primjena slobodnih preskočnih titraja spominjemo napravu za bljeskanje (Blinkgerät), zujalo s lampom tinjalicom i glasbeni instrument trauttonij (→ elektroakustika 4).

Pomoću izmjenične napetosti mogu se procesom interferencije preskočni titraji sinhronizirati. To se postizava time, da se za R i C odaberu vrijednosti, za koje je preskočna frekvencija bliza frekvenciji napetosti, koja se izpituje.

Pojav sinhroniziranih preskočnih titraja primjenjuje se kod katodnog oscilografa. Na sl. 11 nacrtan je jednostavan uređaj (preskočna sprava, Kippgerät) za tu svrhu. (a, b) i (c, d) parovi su uzporednih ploča, koji odklanjaju katodnu zraku. Polovi izmjenične napetosti G , koja se oscilografski izpituje, vezani su na pločice a, b. Pločice c, d drugog para u vezi su preko potencijometra R s baterijom B i s krugom preskočnih titraja, koji je sastavljen od lampe



SL. 11. SHEMA ZA PRESKOČNI UREĐAJ KATODNOG OSCILOGRAFA

tinjalice L i kondenzatora C . Ovdje se iskorišćuje pojav, da se za vrijeme nabijanja kondenzatora napetost $V_R = V - V_C$ na krajevima otpornika R jednoliko umanjuje, a kad lampa tinjalica zasvietli, V_R naraste. Radi toga su pomaci oscilografske mrlje u horizontalnom smjeru (vremenska abscisa) proporcionalni s vremenom. U obzir dolazi samo početni pravčasti dio eksponencialne krivulje za napetost V_R . Preskočna perioda t udešava se prema periodi napetosti G tako, da oscilografska slika miruje.

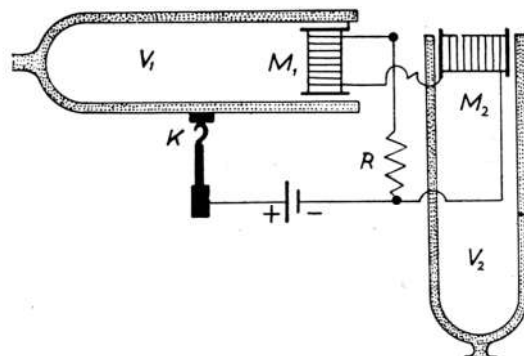
Postoje mehanički pojavi, koji se mogu uzeti kao analogija za preskočne električne titraje. Takvi su pojavi periodski udarci vode u cieví hidrauličkog ovna, zujanje žica brzog voda djelovanjem vjetrova, sviranje vodovoda. Prema van der Polu i van der Marku svode se na mehaničke preskočne titraje neki biološki procesi, koji vode do srđane kapi.

LIT.: Hertz, *Gesammelte Werke* II., 1892; W. Thomson, *Mathematical a. phys. papers* I., 1882; Richter, *Elektr. Kippschwingungen*, 1940. D. P.-č.

Električki valovi → Elektromagnetski valovi.

Elektroakustika je novija grana primijenjene (tehničke) akustike. Razvila se u posljednje vrijeme u vezi s tehnikom visoke frekvencije. U širem smislu rieči obuhvaća e. sva iztraživanja o zvučnim titrajima izvedena električkim pomagalicama.

1. Najstarije elektroakustičke sprave jesu viljuške, žice, membrane s električkim pogonom. Na sl. 1 nacrtan je aparat za jake tonove s 2 elektromagnetske viljuške (Dvořák, 1884). Titraji obiju viljušaka (V_1 , V_2), koje su udešene na isti ton, uzbuđuju se i uzdržavaju pomoću dva elektromagneta M_1 , M_2 , kroz koja teče ista struja magnetiziranja izprekidana kontaktom K . Pomoću velikog otpora R , koji trajno spaja uzvojnice obaju elektromagneta, ugušuje se iskra, kad je struja prekinuta. Radi resonancije između impulsa struje magnetiziranja i titraja viljuške V_2 ,



SL. 1. VILJUSKE ZA JAKE TONOVE (po Dvořáku)

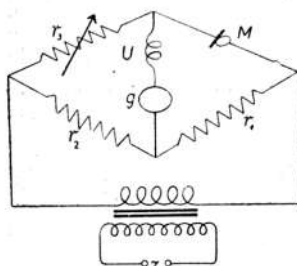
daje ova viljuška, koja počiva na kutiji-resonatoru, glasan ton. U novije vrijeme upotreblili su za pogon elektromagnetske viljuške generator s elektronskom cieví. Takva viljuška od čelika invara, smještena u termostat, daje ton s konstantnošću 10^{-7} do 10^{-8} pa može služiti kao normala zvučne frekvencije (D. W. Dye, 1923).

Najrazširenije elektroakustičke sprave jesu elektromagnetski telefon (Bell, 1874) i mikrofoni s promjenljivim otporom (Hughes, 1878). Na njihovu usavršenju radili su stručnjaci kroz decenije. Edison u USA i Siemens u Njemačkoj načinili su prve telefone za glasni govor, koji odgovaraju današnjim elektromagnetskim zvučnicima. U Parizu su 1881 priredili prienos glasbe žicom za 20 slušača. Služeći se telefonima za glasni govor Edison je 1891 u New-Yorku priredio pokus, kod kojeg je oko 1000 ljudi slušalo prienos iz gradske opere. Pomoću većeg broja telefona postizavala se plastična reprodukcija. Ovakvi se pokusi mogu smatrati predtečama današnje radiofonije. Elektroakustička iztraživanja toga vremena ubrajali su u tehniku slabe struje.

2. S izumom elektronske cieví počeo je novi razvoj e-e. Ova je ciev služila najprije kao zvučno pojačalo kod običnog telefonskog saobraćaja. Najveća je njezina vrijednost, što u oscilatorskim spojevima proizvodi visokofrekventne električne titraje i valove, koji služe kao nosioci zvučnih titraja i omogućuju prienos govora i glasbe radiofonijom. Starije konstrukcije telefona i mikrofona nisu zadovolja-

vale zahtjevima radiofonije. Da se postigne vjerna reprodukcija zvuka, trebalo je starije sprave preuđavati i nove konstruirati.

3. *Analiza zvuka.* Između mnogih zadataka, koje novija e. obraduje iziće se analiza zvuka. Ovdje se određuje amplituda i frekvencija komponenata (parcialnih tonova), od kojih se sastoji neki složeni ton (zvek) ili zamršeniji zvučni titraj. Za subjektivnu analizu zvuka upotrebljavali su najprije Helmholtzove resonatore. Sljedila je Fourierova analiza, koja iz oscilograma (krivulje titraja) nakon dugog računanja daje frekvencije i amplitude parcialnih tonova. Velik napredak u ovom području postignut je automat-



Sl. 2. SHEMA ZA AUTOMATSKU ANALIZU ZVUKA (po E. Meyeru)

skim električkim metodama. U sl. 2 skicirana je najjednostavnija takva metoda po E. Meyeru (1928). U jednoj grani spoja za Wheatstoneov most nalazi se mikrofonski zrcica od ugljena (M), a u ostalim granama otpori r_1 , r_2 , r_3 . Kroz grane mosta prolazi transformirana izmjenična struja $I \sin 2\pi ft$ iz zujala z ($\rightarrow$ batić-prekidač). Zujalo daje ton, kojemu se frekvencija f može mijenjati. Otpori r_1 , r_2 , r_3 tako su odabrani, da u mostu nema struje. Radi jednostavnosti uzet ćemo sada, da na mikrofonski dolaze zvučni valovi jedne frekvencije p , koju pomoću skupine frekvencija f treba odrediti. U mikrofonsku interferiraju obje frekvencije p , f . Označit ćemo sa I amplitudu struje, koja teče mikrofonom, sa R stalni dio njegova otpora, sa $\Delta R \sin 2\pi pt$ promjenljivi dio. Za napetost, pod kojom se nalazi mikrofonski, vrijedi formula

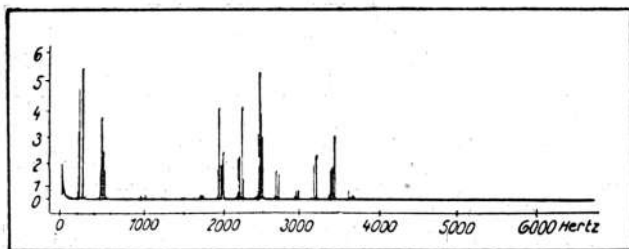
$$V = (R + \Delta R \sin 2\pi pt) I \sin 2\pi ft.$$

Ovaj se izraz može svesti na oblik

$$V = IR \sin 2\pi ft + \frac{I \Delta R}{2} \cos(p-f)t - \frac{I \Delta R}{2} \cos(p+f)t,$$

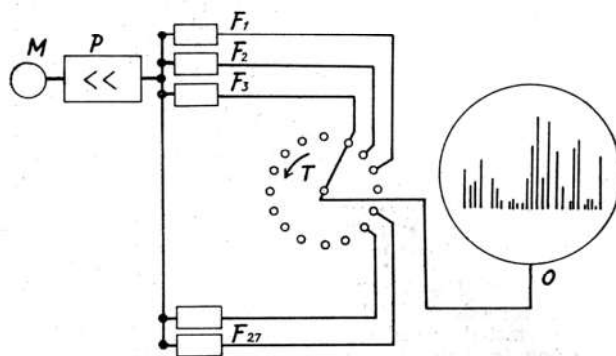
u kojem dolazi frekvencija tona diferencije $(p-f)$ i frekvencija tona sume $(p+f)$. Postupak kod analize je ovaj. Puštamo, da mikrofonom teku redom izmjenične struje cijele skupine frekvencija f . U most uvršten instrument g , udešen za usko područje niskih frekvencija, može mjeriti samo amplitudu vrlo dubokog tona diferencije $f-p$. Ova je amplituda razmjerna sa ΔR , a približno i s amplitudom tona p , tako da g mjeri amplitudu toga tona. Dolaze li na mikrofonski valovi složenog tona, određuju se na jednaki način, prelazeći cijelu skupinu frekvencija zujala, amplitude i frekvencije pojedinih parcialnih tonova. Kao mjeraci instrument g služi na torziji osnovan galvanometar s niti, u seriji s ugušivačem U . Ova se metoda ne može upotrebiti za analizu glasova i šumova, gdje dolazi mnoštvo blizih parcialnih tonova.

Za analizu vokala upotrebljava se automatska metoda po M. Grützacheru. I ovdje dolazi do interferencije sastavnih komponenata složenog tona, koji analiziramo, i kontinuiranog skupa frekvencija f (od 16 do 10 000 u sek). U aparatu ugrađen električki filter (Tiefpassfilter) propušta u napravu za registriranje samo vrlo duboke tonove



Sl. 3. ZVUČNI SPEKTAR VOKALA »I«

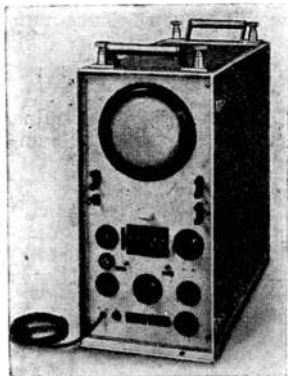
diferencije (na pr. $f = 20/\text{sek}$). Sl. 3 pokazuje zvučni spektar pjevanog vokala »I«. Na horizontalnu os nanese su frekvencije, a vertikalni potezi znače jakosti parcialnih tonova. Dvije odijeljene skupine parcialnih tonova, u okolini



Sl. 4. SHEMA ZVUČNOG SPEKTROMETRA

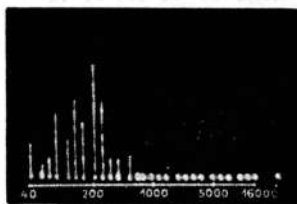
$f = 300$ i $f = 2500$ pripadaju sporednom i glavnom formantu vokala »I«.

Najnoviji aparat za analizu zvuka, nazvan »zvučni spektrometar« (Freystedt, 1935; tt Siemens), prikazan je shematski u sl. 4. Dijelovi aparata jesu: mikrofonski pojačalo P, 27 električkih filtera F, kontakti sa zajedničkom tipkom T, katodni oscilograf O. Svaki pojedini filter propušta trećinu oktave. Propustljivost sviju filtera zajedno obuhvaća frekvencije od 36 do 18 000 u sek. Tipka T, koja 20 puta u sekundi prelazi preko kontakata, spaja redom pojedine filtre s oscilografskom cievju. U svakom je času vertikalni odklon svjetle mrljice oscilografa razmjernan s jakosti one komponente, koju filter propušta. Mirne slike se dobivaju sinhronizacijom okretanja tipke i horizontalnog odklona mrljice. Na sl. 5 vidimo ovakvu aparaturu, koja služi i za analizu štopota i šumova. Sl. 6a pokazuje Siemensovim aparatom snimljeni spektar štopota stroja za pisanje, a sl. 6b spektar aeroplanske buke ($\rightarrow$ buka). Na toj se slici vidi, kako je grupa niskih frekvencija, koje pripadaju motoru, odijeljena od viših frekvencija, koje potječu od zračnog vijka.

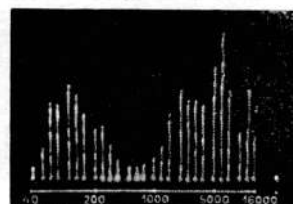


Sl. 5. ZVUČNI SPEKTROMETAR TT. SIEMENS

Sl. 6a. SPEKTAR ŠTOPOTA STROJA ZA PISANJE. Sl. 6b. SPEKTAR BUKA, ŠTO JE IZVODI AEROPLAN. Two frequency spectrum graphs. Sl. 6a shows the spectrum of a typewriter, with a prominent peak at low frequencies (around 1000 Hz) and a series of smaller peaks at higher frequencies. Sl. 6b shows the spectrum of airplane noise, with a broad, continuous band of energy across the frequency range from 1000 to 6000 Hz.

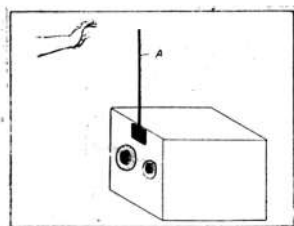


Sl. 6a. SPEKTAR ŠTOPOTA STROJA ZA PISANJE



Sl. 6b. SPEKTAR BUKA, ŠTO JE IZVODI AEROPLAN

4. *Električna glasba.* U posljednja 2 decenija sagrađeni su glasbeni instrumenti, kod kojih se tonovi proizvode električkom aparaturom. U takvim električkim glasbalima možemo razlikovati 4 sastavna dijela: 1. generator električkih titraja, kojim ravna igrač; 2. pojačalo; 3. uređaj za namještenje boje tona; 4. zvučnik. Najpoznatije električko glasbalo načinio je ruski tehničar L. S. Theremin (njem. patent S. Goldberg u. Söhne [Theremin] 1924). Glasbeni tonovi nastaju interferencijom dvaju visokofrekventnih električkih titraja, koje daju oscilatori s elektronskim cievima. Kako je naznačeno u sl. 7, iz kutije, u kojoj se nalaze elektronske cieve, krugovi titranja i dr., izlazi kovni vertikalni štup A, nazvan antena. Kad se takvoj anteni dlan ruke približuje i kad se od nje udaljuje, mijenja se kontinuirano visina tona radi promjene kapaciteta krugova titranja. Micanjem ruke kroz daljinu 1 m dobivaju se 3 oktave tonova, što je dovoljno za izvedbu



Sl. 7. SHEMA ZA ELEKTRICKO GLASBALO OD TEREMINA

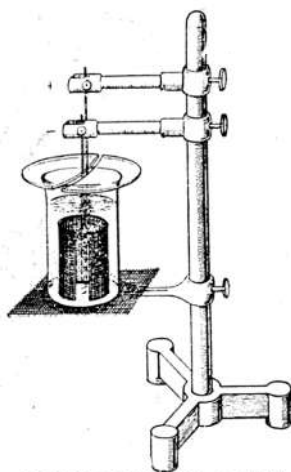
sa zvučnikom. Radi toga, što igrač traži tonove rukom u prostoru (»eteru«), nazvana je ovakva sprava glasbalo s valovima etera. Ovakav aparat načinjen je i kao dodatak radioaparatu. Tehnika igre s Tereminovim aparatom bez tipaka dosta je teška.



Sl. 8. IGRAČ S TEREMINOVIM GLASBALOM

LIT.: A. H. Davis, *Modern Acoustics*, London 1934; F. Trendelenburg, *Fortschritte d. physikalischen u. technischen Akustik*, 2. izd., 1934; P. Lertes, *Elektrische Musik*, 1933; *Revue d'Acoustique* (osn. 1931); *Akustische Zeitschrift* (osn. 1936). D. P.-ć.

Elektroanaliza je postupak kvantitativnog određivanja kovina s pomoću elektrolize (v.) tokom kemijske analize. Kovina se izluči iz svoje otopine s pomoću električne struje na izvagnutoj negativnoj elektrodi te nakon pranja i sušenja odredi ponovnim vaganjem elektrode. Kao negativna elektroda (katoda) obično služi platinska elektroda u obliku mreže, ili



ELEKTROANALIZA S MREŽASTOM KATODOM I ŽICANOM ANODOM

LIT.: Classen-Daneel, *Quantitative Analyse durch Elektrolyse*, 7. izd., Berlin 1927; Berl-Lunge, *Chemisch-technische Untersuchungsmethoden*, sv. II/2., 8. izd., Berlin 1932. I. F.-ć.

jednostavnijega glasbenog komada. Jakost tona se udešava pomoću otpornika, koji se nalazi u krugu zvučnika na ulazu u pojačalo. Takav otpornik sastoji se od 2 kovne ploče, među kojima se nalazi prah od ugljena. Preko pedala pritište igrač jednom nogom na takav otpornik (v. sl. 8). Nagle prielaze tonova izvodi igrač tako, da lijevom rukom pritisne na tipku i tim na kratak čas prekida vezu

Drugi, dosta popularan glasbeni instrument, trautonij, konstruirao je F. Trautwein (1930). Glasbene tonove daju električki preskočni titraji (→ električki titraji 9), koji se izvode pomoću lampe tinjalice ili pomoću ionske ciev s užarenom katodom (vrsta tiratron-cievi). Aparat radi s nizom tipaka. Više ovakvih sprava načinili su Amerikanci, no praktički uspjeh se postigao samo s nekoliko električkih glasbala.

Iza klasičnih radova Rayleigha i Helmholtza nastao je zastoj u obrađivanju problema obće akustike. Naglim razvojem elektroakustike prošireno je naše znanje u svim područjima nauke o zvuku. Iza klasičnih radova Rayleigha i Helmholtza nastao je zastoj u obrađivanju problema obće akustike. Naglim razvojem elektroakustike prošireno je naše znanje u svim područjima nauke o zvuku.

Elektrode. Ploče ili štapići od kovine ili ugljena, koji služe za dovod električke struje u tekući elektrolit ili u stupac plina, zovu se elektrode (= putovi elektriciteta). Elektroda, kroz koju (pozitivna) struja ulazi, zove se anoda. Druga elektroda, koja se priključuje na negativni pol napetosti, zove se katoda (Faradayeva terminologija). I ploče galvanskog članka nazvane su elektrodama.

Elektrode vakuum-cievi načinjene su velikim dielom od aluminija, jer se ova kovina električkim izbijanjem najmanje razpršuje. U nutrašnjosti cievi na svaku od ovih elektroda nadovezan je komadić žice od platine ili molibdena, koji je u staklo utaljen i vodi do vanjske kovne kapiće, na koju se priključuje napetost. Uzimaju se ove kovine, jer imaju jednak koeficijent raztezanja kao staklo. Načinjene su i vakuum-cievi (Geisslerove cievi) s elektrodnim oblozima na vanjskim stranama staklene stiene.

Material elektroda utječe na pad katodne napetosti. Radi toga izrađuju se elektrode neonske lampe-tinjalice od željeza. Neke aparature imaju različite uređaje za hlađenje elektroda (Röntgenove cievi, lampe sa živinim parama i dr.). Prema broju i vrsti elektroda dobile su elektronske cievi s užarenom katodom imena: dioda, duodioda, trioda, tetroda, binoda, pentoda, heksoda, oktoda. D. P.-ć.

Elektrodinamika je dio nauke o elektricitetu. Obrađuje ponderomotoričke pojave izazvane djelovanjem magnetskog toka na električku struju ili djelovanjem električke struje na feromagnetičko sredstvo ili djelovanjem dviju struja jedne na drugu. Područje joj nije oštro omeđeno; kod nekih pisaca ona obuhvaća i elektromagnetizam i inducirane struje sa svim pojavama, koji se na to nadovezuju. Ampère (1822) je elektrodinamskim pojavama nazvao djelovanje struje na struju. Ovo prvobitno ograničenje sačuvalo se danas djelomično u nomenklaturi sprava za mjerenje, jer se u elektrodinamske sprave u užem smislu ubrajaju one, koje se temelje na uzajamnom djelovanju struja.

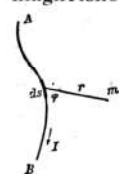
1. *Djelovanje struje na t. zv. magnetski pol.* Biot i Savart su 1820 odmah poslije Oerstedova otkrića magnetnog polja električne struje eksperimentalno našli izraz za silu F , kojom struja jakosti i u bezkonačno dugoj ravnoj žici djeluje na magnetski pol jakosti m u daljini

r . Ta je sila: $F = C \frac{2im}{r}$, gdje je C konstanta proporcionalnosti, kojoj vrijednost zavisi o sustavu jedinica.

Laplace je na temelju toga izračunao silu f , kojom na magnetski pol djeluje elemenat struje, okomit na spojnici r magnetskog pola sa sredinom elementa, a Biot je Laplaceov izraz posveobćio za bilo koji elemenat

struje. Ta Biot-Laplaceova formula glasi: $f = C \frac{im \cdot ds}{r^2} \cdot \sin \varphi$,

gdje je φ kut, koji spojnica iz sredine elementa ds do magnetskog pola m zatvara s elementom ds (sl. 1). U



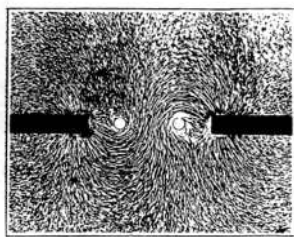
Sl. 1.

Isto tako se integracijom dobiva iz elementarnog zakona jakost polja u jednoj točki na osi kruga kružne struje. Ako je r polumjer kruga, a sve se veličine izraze u jedinicama elektromagnetskog cgs sustava, onda je jakost magnetskog polja u točki, koja leži na osi u daljini a od središta:

$H = 2\pi i \cdot \frac{r^2}{(r^2 + a^2)^{3/2}}$ ersteda, a jakost polja u samom središtu

kruga je $H = \frac{2\pi i}{r}$ ersteda. Odatle se, pomoću kruga s polumjerom 1 cm, definira elektromagnetska cgs-jedinica jakosti struje (= 10 ampera) kao jakost struje, koja u središtu tog kruga proizvodi magnetsko polje jakosti 2π ersteda. Pravac polja je os kruga, a njegov smjer dan je ovim pravilom: ako za gledaoca struja teče u krugu smjerom kazala na uri, na strani, okrenutoj gledaocu, magnetske silnice ulaze u krug. Prema tome krug struje vlada se kao bezkonačno kratak magnet; to je t. zv. magnetski list. To

okretni momenat od vanjskog magnetskog toka obuhvaćenog vanjskom dovodnom žicom, koja ide iz c do žive u žliebu; ovaj subtrahend dakako otpada u uređaju, gdje struja izravno ulazi u jedan uzak pojas na plaštu magneta kroz vodljivu tekućinu. Φ je unutrašnji magnetski tok, obuhvaćen bilo kakvom čunjastom plohom između jedne točke na osi kao vrha plohe i horizontalnog obsega magneta kroz ulaz struje kod c . Smjer okretnog momenta isti je za smjerove struje nc ili sc , a odgovara Flemingovu pravilu, primijenjenu na unutrašnji magnetski tok i na struju u horizontalnom presjeku magneta položenom kroz c . Isto toliko (bez subtrahenda) iznosi okretni momenat u Faradayevu pokusu iz sl. 8, ako tu Φ znači vanjski magnetski tok magneta obuhvaćen pomičnom žicom između njezina objesišta i dodirne točke sa živom u jednom okretu, a oba su okretna momenta istosmjerna za jednaki smjer struje u žici i u magnetu prema osi magneta.



Sl. 11. Magnetske silnice stalne kružne struje među suprotnim magnetskim polovima.

Zbog zavisnosti smjera sile, kojom magnetsko polje djeluje na struju, o smjeru struje kružni vodič pod stal-silnica takva kruga u magnetskom polju okretni momenat. Na to upućuje i oblik silnica takva kruga u magnetskom polju među polovima magneta (sl. 11). Na tome se temelje galvanometar s pokretnim okvirom i oscilograf s petljom.

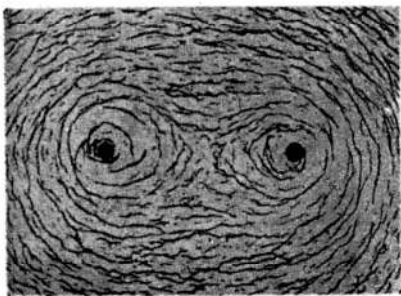
3. Uzajamno djelovanje dviju struja. Zakon o međusobnom djelovanju paralelnih i antiparalelnih struja

našao je Ampère (1820): paralelne se struje privlače, a antiparalelne se odbijaju. Dvije godine kasnije on je obradio ovo djelovanje teoretski, pa je postavio svoj elementarni zakon za silu f , kojom uzajamno djeluju dva elementa ds i ds' struje; taj zakon je kadkada nazivan Ampèreovim temeljnim zakonom elektrodinamike. Ampèreova formula glasi:

$$f = -C \cdot \frac{ii' \cdot ds \cdot ds'}{r^2} \cdot (\cos \varepsilon - \frac{3}{2} \cos \theta \cdot \cos \theta).$$

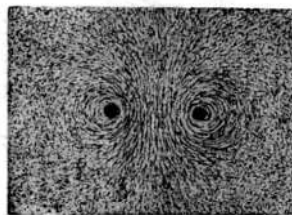
Ovdje su: i , i' jakosti struje u elementima ds i ds' , r je spojica sredine elemenata, θ i θ' su kutovi, koje ds i ds' zatvaraju sa spojnicom r , a ε je kut, koji ds i ds' zatvaraju međusobno, ako jedan paralelno projiciramo na drugi. Konstanta $C = 1$, ako se i i i' izraze u Ampèreovoj elektrodinamskoj jedinici jakosti struje, koja je $\sqrt{2}$ puta manja od elektromagnetske cgs-jedinice jakosti. Ovaj Ampèreov zakon kao i drugi elementarni zakoni, koji su kasnije postavljeni (Grassmann, Clausius, W. Weber), imaju danas samo povijesnu vrijednost. Stefan je pokazao (1869), da se dade postaviti bezbroj elementarnih zakona, koji za zatvorene struje daju iste rezultate.

Uzajamno privlačenje i odbijanje paralelnih i antiparalelnih struja pokazuje se na Ampèreovu staklu, ako jednoj stranici okvira ($\rightarrow$ Ampèreov stalak, sl. 1) primaknemo žicu, ili stranicu jedne okvirne uzvojnice, u paralelnom, dotično u antiparalelnom smjeru struja. Privlačenje paralelnih struja dade se pokazati i pomoću dviju dugih gibkih žičnih pletenica u međusobnom razmaku oko 1 cm, kroz koje na kratko vrijeme pustimo struju od 10 do 20 ampera. Isto tako, duga i uska petlja od takve gibke pletenice, koja visi poput uskog slova U, razširi se pod djelovanjem suprotnih struja u krakovima. U tome se očituje jedno obće svojstvo zatvorenih ravnih krivulja struje, da one nastoje obuhvatiti najveći mogući magnetski tok u što



Sl. 12.

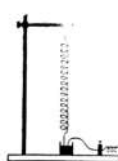
homogenijoj gustoći, tako da bi konačni oblik deformirane krivulje bio krug. Kod kruga su ove odbojne sile upravljene radialno.



Sl. 13.

I slika magnetskih silnica dvostrukog paralelnog voda upućuje na međusobno privlačenje paralelnih struja (sl. 12); isto tako slika magnetskih silnica antiparalelnih struja upućuje na njihovo međusobno odbijanje (sl. 13). Na međusobnom privlačenju paralelnih struja osniva se stezanje Rogetove uzvojnice (Roget, 1835; sl. 14).

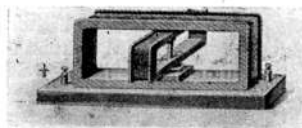
U čašici izpod uzvojnice je živa. Kad proteče struja, uzvojnica se stegne, pa njezin donji kraj izađe iz žive. Tim se struja prekine, uzvojnica se produži i uzpostavi spoj sa živom; tako ona dolazi u titranje i može se upotrebiti kao prekidač za slabije struje.



Sl. 14. Rogetova uzvojnica

Privlačenje paralelnih struja postoji i kod trakova iste struje u elektronskom vodiču: plitak sloj žive u žliebu od izolatora suzi se, ili se čak prekine, kod gustoća struje od nekoliko stotina ampera/cm² (Northrupov pokus, 1907). Na sličan način međusobno elektrodinamsko privlačenje elektrona u brzom paralelnom gibanju jedan je od uzroka, da se elektroni u mlazu katodnih zraka iz ravne katode ne razilaze uzprkos međusobnom elektrostatičkom odbijanju.

Dva pomična vodiča pod strujom, koji zatvaraju međusobno neki kut, teže da se namjesto tako, da struje u njima imaju isti smjer. Zato se krivudava gibka žična pletenica pod jakom strujom izpravlja. Ta se težnja napose očituje kod dviju kružnih struja, od kojih je jedna pomična, a koje su u malenom razmaku jedna od druge ili su jedna u drugoj. One nastoje namjestiti se paralelno tako, da njihova magnetska polja imaju isti smjer. Pri mjerenom načela multiplikacije to se najbolje pokazuje



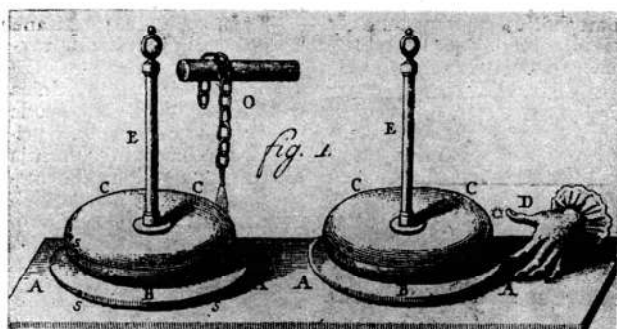
Sl. 15.

ukrštenim uzvojnicaama od Ritchiea (1834) prikazanim u sl. 15 u varijanti od Garthea. Unutrašnja uzvojnica lako je okretljiva oko vertikalne osi; njezin spoj sa strujom ide kroz dvije plitke polukružne čašice sa živom odijeljene nizkom drvenom pregradom. Pod strujom unutrašnja se uzvojnica okrene tako, da struje u njoj teku istim smjerom kao u vanjskoj uzvojnici. To je prauzor elektrodinamskih mjerača sprava. Nizka drvena pregrada među čašicama sa živom leži paralelno s ravninom vanjske uzvojnice; ako se unutrašnja uzvojnica zakrene s dovoljno zamaha, da svojom uztrajnošću svlada trenje kontakta u prielazu iznad gornjih rubova pregrade i zaleti se preko paralelnog položaja, kontakti uzpostave kroz živu obrnuti smjer struje u njoj, pa ona dođe u trajnu vrtnju. Tako je Ritchieov aparat najstariji model elektromotora.

Ovakvo paralelno namještanje kružnih struja bilo je podlogom Ampèreovoj teoriji magnetizma ($\rightarrow$ elektromagnetizam). — Valja pripomenuti, da se svi ovi pokusi o međusobnom djelovanju struja mogu izvesti i pomoću izmjenične struje.

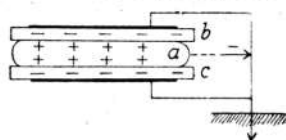
M. K.

Elektrofor je sprava za dobivanje veće množine električnog naboja. Sastavni dijelovi: 1. kolač (Kuchen, gâteau, cake), t. j. ploča od izolatora na kovnoj podlozi ili armaturi; 2. poklopac ili štit s držkom od izolatora. Kolač je okrugla izgladana ploča od ebonita ili od šelaka, kojem je, da ne izpuca, dodano voska, terpentina i kolofonija. Poklopac je šuplje kovno tielo sa zaobljenim rubom. Kao armatura služi ravni limeni tanjur ili drvena ploča obložena staniolom ili limom. Udaramo li lisičjim repom po kolaču, postaje on negativno električan. Ako se sad na nj stavi poklopac, nastaje radi influencije na donjoj strani pozitivan, a na gornjoj negativan naboj. Taj se naboj prstom odvodi u zemlju. Dignemo li zatim poklopac, možemo njegov pozitivni naboj predati nekom tielu, na pr. lajdenskoj boci. Postupak se može mnogo puta ponoviti bez ponovnog elektriziranja kolača.



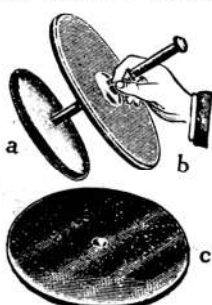
SL. 1. VOLTIN ELEKTROFOR (izvorna slika).

Energija naboja, koji daje elektrofor, ekvivalentna je mehaničkoj radnji, koja se vrši svladavanjem privlačne električne sile, kada dižemo poklopac. Povoljno utječe i kovna podloga, jer svojim pozitivnim nabojem priči izbijanje kolača u zrak, kad je poklopac dignut. Promjer ploča elektrofora iznosi obično 30 do 50 cm. Gradili su velike elektrofore s promjerom od 2 m. Za dizanje poklopca upotreбили su kolotur. U suhom uzduhu zadržava elektrofor svoj naboj mjesecima.



SL. 2. SHEMA ZA SLOZENI ELEKTROFOR

(1923). Njegova sprava (sl. 2) sastoji se od kovne ploče a i dviju ebonitnih ploča b, c. Njihove armature spojene su žicom i vezane sa zemljom. Kod eksperimentiranja treba najprije ebonitne ploče trenjem elektrizirati, među njih dovesti ploču a i njezin slobodni naboj odvesti.



SL. 3. SLOZENI ELEKTROFOR

Ako se sad razstave dijelovi elektrofora, naboj kovne ploče je tolik, da stavlja u pogon malen elektrostatski motor. Aparat s pločama, širokim 15 cm, daje napetost 50 000 volta (iskre od 6 cm). Tehničku izvedbu Wommelsdorfova aparata pokazuje sl. 3. Ebonitna ploča b učvršćena je na ciev, koja se može sklizati po dršku od izolatora. Na donjem kraju drška učvršćena je metalna ploča a.

LIT.: Le Opere di A. Volta, Milan 1926. D. P.-ć.

Elektroforeza → Elektrokinetički pojavi.

Elektrokemija je nauka, koja se bavi proučavanjem onih kemijskih procesa, koji se vrše utjecajem električne struje, odnosno, kod kojih se kemijska energija pretvara u električnu. Elektrokemijski procesi dijele se dakle u dvije grupe: kod jednih se električna energija pretvara u kemijsku, to je t. zv. *elektroliza* (v.), a kod drugih se kemijskom reakcijom stvara *galvanski elektricitet* (v.). Od vremena L. Galvanija, koji je slučajno otkrio galvanski elektricitet (g. 1790), pa do danas razvila se e. kao znanost i primijenjena je u veleobrtu od takvih razmjera, da je postala jedna od osnovnih nauka o poznavanju materije (→ atom) i jedna od važnih veleobrtnih grana kao t. zv. *tehnička elektrokemija*.

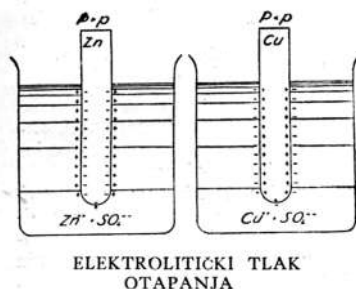
Temelje e-e kao znanosti udario je talijanski fizičar A. Volta (g. 1794) pronalazkom, da doticajem dviju različitih kovina nastaje električna struja. Na temelju toga napravio je svoj prvi galvanski element (v.). Tek time je omogućeno izražavanje kemijskog djelovanja električne struje tako, da su u početku 19. st. proveli Ritter i Davy prvu elektrolizu vode, a nešto kasnije (g. 1807) dobio je Davy elektrolizom raztaljenih alkalijskih klorida kovine natrij i kalij. U isto doba proučava Berzelius utjecaj električne struje na otopine anorganskih tvari te na temelju tih izražavanja postavlja prvu *elektrokemijsku teoriju valencije atoma*: atomi i atomske skupine imaju dva pola, kao i

magnet, od kojih je jedan nabijen pozitivnim, a drugi negativnim elektricitetom; jedan je od polova uvijek jači, te je atom sam nabijen pozitivno ili negativno; od veličine tog naboja zavisi reaktivnost i valencija elementa. Novija izražavanja potvrdila su, da valenciju atoma daje broj prisutnih elektrona u atomu, odnosno onih, koji nisu prisutni.

To prvo doba e-e izpunjeno je kvalitativnim izražavanjima. Nagli razvitak e-e počinje s Faradayem, koji g. 1833 postavlja svoj *kvantitativni zakon elektrolize* i *elektrokemijsku nomenklaturu*, koja je i danas u upotrebi (→ elektrolitička disocijacija): ioni (kationi i anioni), elektrolit, elektroda (katoda i anoda). O samoj biti iona bila su podijeljena mišljenja (Grotthuss, Clausius), dok to pitanje nije riješio g. 1887 S. Arrhenius. Na temelju radova J. H. van't Hoffa o primjeni plinskih zakona na otopine postavlja Arrhenius *teoriju elektrolitičke disocijacije*, prema kojoj se jedan dio molekula u otopini razpada sam, bez utjecaja električne struje, na ione, t. j. pozitivnim i negativnim elektricitetom nabijene atome, odnosno atomske skupine. Tu su teoriju za jake elektrolite upodpunili Debye i Hückel.

Kvantitativni odnos pretvorbe kemijske energije u električnu i obratno dali su Gibbs (g. 1878) i v. Helmholtz (g. 1882) poznatom formulom: $E = Q/n \cdot 23063 + T dE/dT$, t. j. iz reakcione topline (Q) i temperaturnog koeficijenta (dE/dT) može se izračunati elektromotorna sila nekoga galvanskog članka poznavajući kemijsku reakciju, koja se u dotičnom članku vrši. U Daniellovu galvanskom članku na pr. stvara se električna energija kemijskom reakcijom otapanja cinka, odnosno izlučivanja bakra: $\text{CuSO}_4 + \text{Zn} = \text{ZnSO}_4 + \text{Cu}$. Dobivena električna energija mora biti jednaka kemijskoj energiji. Kako je elektroliza reverzibilni proces stvaranja galvanskog elektriciteta, može se iz ove formule izračunati i ona najmanja napetost na elektrodama, koja je potrebna, da uobće dođe do izlučivanja tvari.

Sam mehanizam uzajamnog odnosa kemijskih i električnih pojava raztumačen je tek fundamentalnom *teorijom elektrolitičkog tlaka otapanja* od W. Nernsta (g. 1889). Prema toj teoriji nastoji svaki metal slati svoje atome kao ione u otopinu. Silu, kojom kovina šalje ione u otopinu, nazvao je Nernst *elektrolitičkim tlakom otapanja*. Taj je *tlak* za svaki metal značajan. Uroni li se na pr. komad cinka u otopinu cinkova sulfata, slat će cink svoje atome kao pozitivno nabijene ione cinka u otopinu (v. sl.). Na taj se način nabije kovina cink negativno. Radi elektrostatskog privlačenja negativno nabijenog cinka ne mogu pozitivno nabijeni cinkovi ioni difundirati u otopinu, već se stvori oko kovine na graničnoj površini metala i otopine dvostruki električni sloj. Količina iona, koje šalje metal u granični sloj, bit će to veća, što je primarno manje iona u otopini, t. j. što je manji ozmotski tlak otopine. Ozmotski tlak djeluje dakle nasuprot elektrolitičkom tlaku otapanja. Električni naboj metala (E) ovisit će dakle o veličini elektrolitičkog tlaka otapanja (P) i ozmotskog tlaka iona kovine u otopini (p) prema *Nernstovoj formuli*: $E = RT/nF \cdot \ln P/p$. Ako je elektrolitički tlak otapanja kovine veći od ozmotskog tlaka iona u otopini ($P > p$), a to je kod t. zv. neplemenitih kovina (na pr. aluminij, cink, olovo), onda se kovina nabije negativno. Ako je obrnuti slučaj ($P < p$), kao kod plemenitih kovina (na pr. bakar, srebro, zlato), onda se pozitivno nabijeni ioni iz otopine talože na kovini i nabiju je pozitivno. Kako je ozmotski tlak iona u otopini (p) proporcionalan njihovoj koncentraciji (c), t. j. $E = RT/nF \cdot \ln P/k \cdot c$, to je potencial metala i prema otopini svojih iona koncentracije *«c»* jedna konstantna vrijednost, t. zv. *normalni potencial* (E_0): $E_0 = \pm RT/nF \cdot \ln P$, gdje predznak — dolazi, ako se stvaraju pozitivni ioni, a predznak +, ako se stvaraju negativni ioni. Potential elektrode prema otopini iona koncentracije *«c»*, t. zv. *pojedinačni potencial*, dakle je: $E_p = E_0 \pm RT/nF \cdot \ln c$, gdje predznak + dolazi, ako elektroda šalje u otopinu pozitivne ione, a — negativne. Elektroda, uronjena u otopinu svojih iona molarne koncentracije, zove se *normalna elektroda* (*«vodikova elektroda»*, *«živina ili kalomel-elektroda»* i t. d.). Poredaju li se normalni potenciali metala s obzirom na vodikovu elektrodu kao jedinicu, dobiva se poznati *elektrokemijski red napetosti*: K, Ca, Al, Mn, Zn, Fe, Cd, Co, Ni, Sn, Pb, H₂, Cu,



Hg, Ag, Au. Što je kovina više nalijevo, to je elektropozitivnija, t. j. to će se na katodi (negativnom polu) teže izlučiti, odnosno, trebat će to viša napetost. Minimalna napetost, potrebna da dođe do raztvaranja tvari elektrolizom, naziva se u e-i *napetošću raztvaranja* (Le Blanc, 1891) i može se izračunati iz gornje

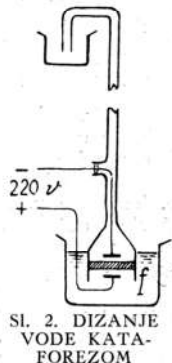
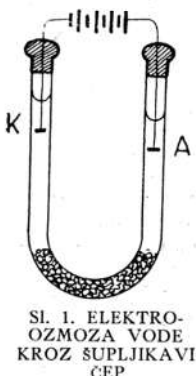
Nernstove formule, što je od velike važnosti za elektrolizu. Napetost raztvaranja jednaka je naime razlici pojedinačnih potencijala tvari, koje stvaraju katione i anione.

Pretvaranje dakle električke energije u kemijsku (elektroliza) i obratno (galvanski elektricitet) vezano je na postojanje iona. To su dva reverzibilna procesa: jedinica količine struje (1 farad = 96500 kulona) izlučuje iz otopine jedan gram-ekvivalent iona, a isto tako prijelazom jednog gram-ekvivalenta tvari u ionsko stanje nastaje ista količina elektriciteta. Prema tome je osnova cijele elektrokemije promjena stanja električkog naboja atoma, iona, odnosno atomskih skupina.

Primjena elektrokemijskih procesa u tehnici vrlo je velika, a omogućena je pronalazkom dinamo-stroja od Grammea (g. 1872) kao jeftinog izvora velike količine električne energije. Od tog doba počeo je nagli razvoj *tehničke elektrokemije* (→ elektroliza).

LIT.: M. Le Blanc, *Lehrbuch der Elektrochemie*, 12. izd., Leipzig 1925; F. Foerster, *Elektrochemie*, 4. izd., Leipzig 1923; G. Grube, *Grundzüge der Elektrochemie*, 2. izd., Dresden-Leipzig 1930. I. F.-G.

Elektrokinetički pojavi očituju se u tom, da električka struja izvodi mehanička gibanja na granici tekućine i čvrstog tijela (odnosno tekućine i plina) kao i u tom, da ovakvo gibanje daje električku struju. Možemo razlikovati 3 skupine ovakvih pojava: 1. električka struja pokreće tekućinu među čvrstim stijenama; 2. električka struja pokreće u mirnoj tekućini suspendirane krute, tekuće i plinovite čestice od dielektrikuma ili od vodiča; 3. gibanjem tekućine među čvrstim stijenama ili gibanjem stranih čestica u tekućini nastaje elektromotorna sila. Ne postoji jedinstvena terminologija ovih pojava. Pojav (1), koji podsjeća na ozmozu, zove se obično elektroozmoza ili elektroendozmoza, a pojav (2) kataforeza. U novije vrijeme uvodi se za pojave (1) i (2) zajedničko ime elektroforeza. Prema tome, da li tekućina ili suspendirane čestice putuju prema katodi ili prema anodi, zove se onda pojav kataforeza odnosno anaforeza. Za pojav (3) postoje nazivi struja strujanja, kataforetska struja. Izraz elektrokinetika dolazi i u posve drugčijem značenju, gdje se radi o elektrodinamskim i nekim elektromagnetskim učincima električke struje.



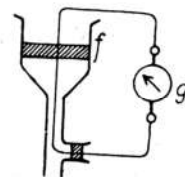
1. Sl. 1 pokazuje jednostavan pokus o elektroozmozi. U sredini U-cievi, koja je napunjena vodom, nalazi se šupljikavi čep, na pr. od vate. Ako se na elektrode A, K stavi električka napetost, opaža se dizanje vode na strani katode. Pojav je u skladu s Coehnovim zakonom: ako se dotiču dva dielektrička sred-

stva (dvie »faze«), onda sredstvo s većom dielektričkom konstantom na mjestu doticaja dobiva pozitivan, a drugo sredstvo negativan naboj. Čestice vode, koja ima veću dielektričku konstantu nego čep, putuju prema katodi. Djelovanjem kataforeze može se voda kroz jenski stakleni filter (f) dići više metara visoko (sl. 2), ako se na elektrode stavi napetost, na pr. 220 volta.

U svinutoj staklenoj cievi, koja je napunjena vodom, neka se nalazi nešto prašine od stakla ili gline. Ako se na elektrode stavi električka napetost, prašina će putovati prema anodi (anaforeza).

Jedan pokus za struju strujanja pokazuje sl. 3. Ako se na jenski filter (f) odozgo tlači voda, a odozdo siše zrak, na elektrode priključen galvanometar (g) pokazuje struju, koja ima isti smjer kao struja tekućine.

Elektrokinetički pojavi zavise o sredstvima, koja se dotiču. Ako se mjesto vode upotrebi terpentinsko ulje, benzol, CS₂, u sl. 2, 3 naznačeni pojavi, koji nastaju doticajem stakla i tekućine, teku protivnim smjerom. Bilo je više prijedloga, da se elektrokinetički pojavi praktički iskoriste. Pokusi sa sušenjem treseta nisu dali očekivana uspjeha, jer primiješana voda previše vodi električku struju. Bolje služi ova metoda kod sušenja gline i kaolina u svrhe keramike te kod dobivanja kaučuka iz mliječnog soka kaučukovca.



SI. 3. POKUS ZA STRUJE STRUJANJA

elektromotorna sila je razmjerna izvršenom tlaku, a nezavisna o površini i debljini diafragme.

3. Tumačenje elektrokinetičkih pojava potječe od Quinckea. On je prvi pretpostavio, da se na granici čvrstog tijela i tekućine nalazi električki dvostruki sloj, koji ima na jednoj strani pozitivan, na drugoj negativan oblog. Na pr. staklenu stienу cievi dotiče čvrst negativan, a vodu gibljiv pozitivan oblog sloja. Djeluje li na sloj vanjska električka sila, pomiče se gibljiv dio sloja i povlači trenjem tekućinu. To daje pojav elektroozmoze. Ako se pak kroz staklenu ciev tjera tekućina, dovodi se jednoj elektrodi pozitivan, a drugoj preostaje negativan naboj.

Teoriju ovih pojava formulirao je matematički najprije Helmholtz (1879). Polazeći od hidrodinamskih jednačbi, uz pretpostavku, da su crte strujanja uzporedne s osi kapilarne cievi, izveo je H. za brzinu tekućine formulu

$$v = v_0 + \frac{\epsilon \sigma}{4\pi \eta} (\varphi - \varphi')$$

U toj formuli znači v_0 brzinu, koju bi dao sam prirast hidrostatskog tlaka (bez električkog polja), i jakost električke struje, σ specifički električki otpor tekućine, ϵ dielektričku konstantu tekućine, η nutrašnje trenje tekućine, $\varphi - \varphi'$ potencijalnu razliku među oblozima dvostrukog sloja (elektrokinetički potencijal).

Pomoću mnogih teorija nastojali su protumačiti prirodu dvostrukog sloja. Coehn i Raydt su našli, da spomenuti Coehnov zakon vrijedi i kvantitativno. Visina dizanja tekućine je uvijek razmjerna razlici dielektričkih konstanta sredstava, koja su u doticaju.

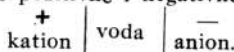
Ako se dielektrička tekućina načini slabim elektrolitom, elektrokinetički pojavi postaju zamršeniji. Električka vodljivost se superponira na dielektrička svojstva tekućine. Dodatkom neznatne količine elektrolita može dvostruki sloj izmijeniti polaritet. Prema ozmotskoj teoriji bio bi elektrokinetički potencijal identičan s elektromotornom silom, koja nastaje radi Nernstove napetosti otapanja (Lösungstension). Eksperimentalni rezultati ne slažu se s ovom teorijom. Nernstov skok potencijala iznosi ciele volte ili nekoliko desetinski volta, dok se kod elektrokinetičkih pojava radi o napetostima od nekoliko stotinaka volta. Freundlich tumači ove pojave teorijom adsorpcije (1909), a Gony i Chapman difuzijom. Ove teorije rade s dva sloja. Jedan sloj je vrlo tanka kožica tekućine, koja se čvrsto drži stiene, a drugi susjedni sloj seže dublje u tekućinu. Dolazi do superpozicije dvaju elektrokinetičkih potencijala. Sa sličnim pretpostavkama rade i novije teorije, koje su razvili O. Stern (1924), Debye i Hückel (1924).

LIT.: Graetz, *Hdb. d. Elektrizität u. d. Magnetismus* II., 1921; Geiger u. Scheel, *Hdb. d. Physik* XIII., 1928; Müller-Pouillet, *Lehrbuch d. Physik*, 11. izd., IV., 1934. D. P.-č.

Elektrolitička disocijacija je razpadanje molekula u vodi otopljene tvari na ione, t. j. na pozitivnim ili negativnim elektricitetom nabijene atome odn. na atomske skupine. Od količine električkog naboja ovisi valencija iona. Tako se na pr. razpada (disociira) natrijev klorid (NaCl) otapanjem u vodi na pozitivne natrijeve ione (Na^+) i negativne klorove ione (Cl^-); sumporna kiselina (H_2SO_4) daje u vodenoj otopini dva jednovalentna vodikova iona (H^+) i jedan dvovalentni sulfat-ion (SO_4^{--}); aluminijev klorid daje trovalentni aluminijev ion i tri klorova iona, što se grafički prikazuje ovako: $\text{AlCl}_3 \rightarrow \text{Al}^{+++} + 3\text{Cl}^-$. Tvari, koje daju ione, zovu se elektroliti (soli, kiseline i baze), jer njihove vodene otopine vode električku struju ($\rightarrow$ elektroliza). Transport struje vrše ioni ($\rightarrow$ »putujućci«), i to pozitivno nabijeni ioni, kationi, kreću se prema negativnoj elektrodi (katodi), a negativni ioni, anioni, prema pozitivnoj elektrodi (anodi).

Prema S. Arrheniusu, koji je postavio teoriju e-e d-e (g. 1887), disociira se samo jedan dio molekula u ione, te prema jakosti disocijacije razlikujemo jake (NaCl , KNO_3 , H_2SO_4 , KOH i t. d.) i slabe elektrolite (H_3BO_3 , H_2CO_3 , NH_4OH , HgCl_2 i t. d.). Razrjeđenjem otopine raste disocijacija. Omjer disociiranih i nedisociiranih molekula je *stupanj disocijacije* (α), koji je dakle proporcionalan osmotskom tlaku i električkoj vodljivosti (λ) otopine elektrolita. Za jednu stanovitu koncentraciju elektrolita (c) je disocijacija konstantna i izražava se *konstantom disocijacije*, $K_c = c \cdot \alpha^2 / (1 - \alpha)$, ili $K_c = c \cdot \lambda^2 / \lambda_\infty (\lambda_\infty - \lambda)$ (Ostwaldov zakon razrjeđenja, gdje je λ_∞ vodljivost kod neizmjerne razrjeđenja). Ispitivanjima je utvrđeno, da se kod jakih elektrolita ne dobivaju konstantne vrijednosti za konstantu disocijacije. Za razjašnjenje tih i drugih anomalija kod jakih elektrolita upodunili su Debye, Hückel (1923) i Onsager (1927) Arrheniusovu teoriju time, što su postavili, da su jaki elektroliti potpuno disociirani. Radi velikog broja suprotno nabijenih iona dolazi do međusobnog elektrostatskog privlačenja, do izvjestnog vezanja negativnih iona na pozitivne, tako da se jedan stanoviti pozitivni ion nalazi bliže nekom negativnom nego drugom pozitivnom ionu. Posljedica toga je opadanje pokretnosti (brzine) iona s povećanjem koncentracije elektrolita, a time i električke vodljivosti, što se prije pripisivalo smanjenju disocijacije. Radi tih međuionskih sila aktivna količina nekog iona, *aktivitet* (a), nije identična s koncentracijom (c), već manja i izražava se sa: $a = f \cdot c$, gdje je f *koefficient aktiviteta*, koji se s povećanjem razrjeđenja približuje vrijednosti 1.

Sposobnost vode, da raztvora elektrolite u ione, jest u tome, što je voda izvanredno jaki dielektrikum (v., DK = 81), t. j. smanjuje elektrostatska privlačenja elektropozitivnih i elektronegativnih dijelova molekula stvarajući tako slobodne pozitivne i negativne ione:

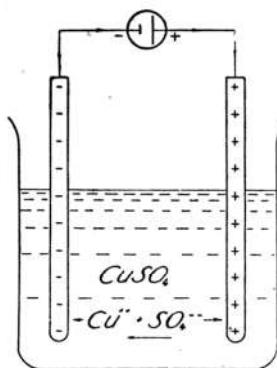


LIT.: H. Falkenhagen, *Elektrolyte*, Leipzig 1932; W. Kuhn, *Physikalische Chemie*, Leipzig 1942. I. F.-č.

Elektrolitička polarizacija $\rightarrow$ Elektroliza.

Elektroliza je raztvoravanje ili obćenito kemijsko mienjanje neke tvari pomoću električke struje. Tvar, koje otopina ili taljevina vodi električku struju, a kod toga se kemijski mienja, zove se *elektrolit*. Polovi, kojima se dovodi električka struja, jesu *elektrode*, i to negativni je pol *katoda*, a pozitivni *anoda*. Čestice tvari, atomi, odnosno atomske skupine, koje tokom e-e putuju k elektrodama, zovu se *ioni*, i to k negativnom polu kreću se pozitivno nabijeni *kationi*, a k pozitivnom negativno nabijeni *anioni* ($\rightarrow$ elektrolitička disocijacija). Najvažniji elektroliti jesu kiseline (HCl , H_2SO_4 i dr.), lužine (NaOH , KOH , i t. d.) i soli (KCl , NaCl , NH_4NO_3 , CuSO_4 , AgNO_3 , Na_2CO_3 i t. d.). Pozitivno nabijeni ioni, kationi, jesu svi ioni kovina, vodikov i amonijev ion (H^+ , NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Ag^+ , Mg^{++} , Cu^{++} , Al^{+++} i t. d.), dok su negativno nabijeni, anioni, kiseliniski ostatci (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{--} , CO_3^{--} i t. d.) i hidroksilna skupina (OH^-).

Elektrolizira li se između dvie platinske elektrode otopina bakrenog sulfata —CuSO_4 (sl. 1), izlučit će se na



Sl. 1. ELEKTROLIZA CuSO_4

negativnom polu (katodi) bakar, a na pozitivnom polu (anodi) kisik, radi sljedećih procesa na elektrodama.

1. *Procesi na katodi* vrše se utjecajem negativnog naboja elektrode u smislu izbijanja pozitivno nabijenih kationa i njihova pretvaranja u neutralne atome, odnosno molekule. To neutraliziranje pozitivnih naboja kationa na katodi vrše elementarni negativni dijelci električke struje ($\rightarrow$ elektroni). Gornji primjer izlučivanja bakra može se prikazati dakle ovako: $\text{Cu}^{++} + 2 \text{ elektrona} = \text{Cu}$. Procesi

na katodi jesu primanje elektrona od pozitivno nabijenih iona, koje može biti takvo, da dovodi do potpune ili samo djelomične neutralizacije pozitivnih iona. Kako je oduzimanje pozitivnih naboja ionima redukcija, to su i elektrolitički procesi na katodi *redukциони procesi*: izlučivanje kovina, pretvaranje viševalentnih kationa u niževalentne i redukciono djelovanje na katodi razvijenog atomarnog vodika.

2. *Procesi na anodi* suprotni su onima na katodi: anioni gube elektrone, t. j. negativni naboji aniona izbijaju potpuno ili samo djelomično na pozitivno nabijenoj elektrodi. Na anodi vrše se dakle *oksidacioni procesi*. Kod gornje elektrolize bakrenog sulfata vrši se dakle na anodi ovaj proces: $\text{SO}_4^{--} \rightarrow 2 \text{ elektrona} = \text{SO}_4$. Kako SO_4 -skupina ne može sama postojati, to se spaja s prisutnom vodom dajući sumpornu kiselinu, a na elektrodi se oslobađa kisik: $2\text{SO}_4^{--} + 2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{O}_2$. Ovakvi *sekundarni procesi* dosta su česti kod e-e. Ako se mjesto platinskih elektroda uzmu bakrene, ostat će proces na katodi, t. j. taloženje kovine, isti, ali na anodi se ne će razvijati kisik, već će se *anoda otapati*, t. j. kovni bakar prelazić će gubitkom elektrona kao pozitivno nabijeni bakreni ioni u otopinu: $\text{Cu} \rightarrow 2 \text{ elektrona} = \text{Cu}^{++}$. *Topljive anode* jesu na pr. iz bakra, srebra, cinka, olova, kositra i t. d., a *netopljive* iz platine, grafita, ugljena i raztaljenog magnetita. Na anodno topljivim elektrodama dolazi više puta do iznenadnog zastoja u otapanju, t. zv. *pasivnog stanja*. Razlog pasivnosti može biti mehaničke (stvaranje netopljivog sloja) ili kemijske prirode (smanjenje brzine stvaranja iona).

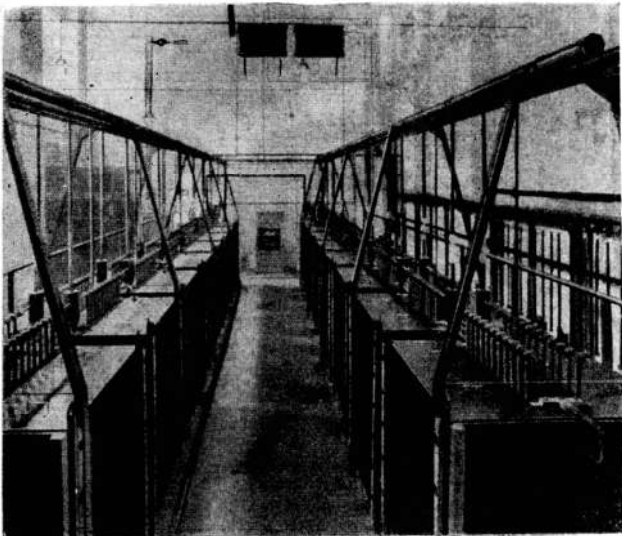
Da uobće može doći do e-e, potrebna je na elektrodama minimalna napetost, t. zv. *napetost raztvoravanja* ($\rightarrow$ elektrokemija), koja je značajna za svaki elektrolit. Da i prije te napetosti ne dolazi do raztvoravanja elektrolita, razlog je u t. zv. *polarizacionoj napetosti*, koja djeluje nasuprot napetosti na elektrodama. Ta *elektrolitička polarizacija*, koja djeluje nasuprot e-i, nije dakle ništa drugo nego nastojanje izlučenih tvari, da ponovno priđu u otopinu, a to se očituje suprotnom elektromotornom silom. Uzroci polarizacije mogu biti i u nekim drugim pojavama na elektrodama: oksidacija, promjena koncentracije elektrolita na elektrodama i dr. Neki plinovi, kao vodik, kisik i klor, ne izlučuju se e-om uvijek kod iste napetosti izlučivanja, već kod stanovite *više napetosti* (*»prenapetost«*, njem. Überspannung, engl. Overvoltage), koja ovisi od prirode elektrode. Tako se vodik izlučuje (iz 5%-tne H_2SO_4) na platinskoj elektrodi kod 0,1 volta, na olovnoj el. kod 0,5 volta, a na živinoj el. čak kod 0,8 volta. To svojstvo vodika osobito je važno za tehničku e-u.

Kvantitativni odnos između e-om izlučenih tvari i utrošene električke energije daje *Faradayev zakon*: za izlučivanje jednog gram-ekvivalenta (= atomska, odnosno molekularna težina u gramima podijeljena s valencijom) neke tvari potrebna je količina električke struje od 96.500 coulomba = 96.500 amper-sekunda = 26,8 amper-sati. Dakle, količinom struje od 26,8 amper-sati izlučit će se na katodi, odnosno otapati na anodi: $107,88/1 = 107,88$ g srebra, $63,57/2 = 31,78$ g bakra, $26,97/3 = 8,99$ g aluminija; isto tako izlučit će se na anodi: $35,46/1 = 35,46$ g klora, $16,00/2 = 8,00$ g kisika i t. d. Količina tvari, kojoj je za izlučivanje ili otapanje potrebna količina struje od jedne

amper-sekunde, naziva se *elektrokemijski ekvivalenat*: $107,88/96500 = 1,118$ mg srebra, $0,3294$ mg bakra, $0,3675$ mg klora i t. d. U praksi se riedko dobivaju te teoretske količine, već manje, a odnos dobivene količine i teoretske količine jest *izkoristivost struje*, koja je kod e-e vodenih otopina 75–100%, a kod taljevina i manja.

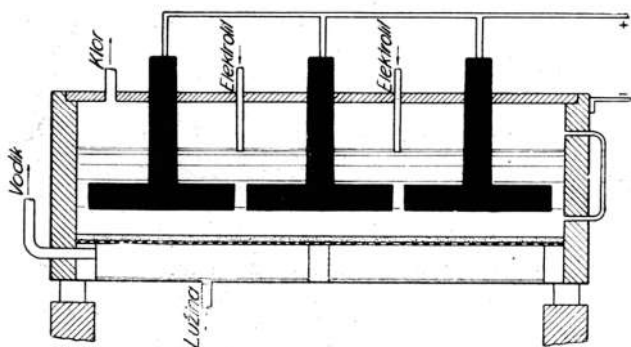
Količina na e-u *potrošene električne energije* jest produkt od napetosti na elektrodama, jakosti struje, što prolazi kroz elektrolitičku stanicu, i vremena trajanja e-e.

Primjena elektrolize u tehnici: elektrolitičko dobivanje i rafiniranje kovina iz otopina ($\rightarrow$ bakar, cink, nikal i t. d.) i taljevina ($\rightarrow$ aluminij, magnezij, natrij, kalij i t. d.), $\rightarrow$ galvanostegija i $\rightarrow$ galvanoplastika, e. vode i alkalijskih klorida, elektrolitička oksidacija i redukcija anorganskih i organskih tvari i t. d.



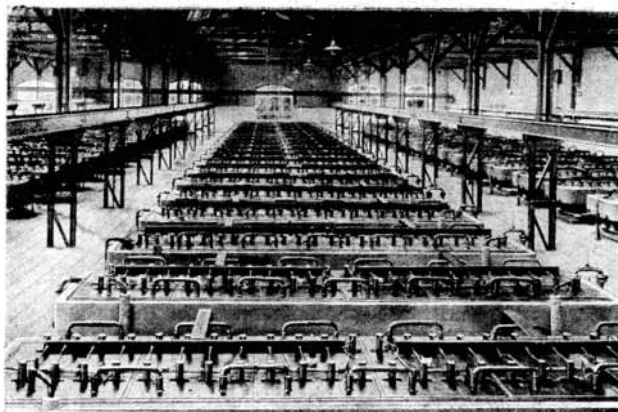
Sl. 2. NAPRAVE ZA ELEKTROLIZU VODE (Siemens)

Elektroliza vode. Raztvranje vode na vodik i kisik osniva se na izbijanju vodikovih iona na katodi: $2H^+ + 2\text{elektrona} = H_2$ i hidroksilnih iona na anodi: $2OH^- \rightarrow 2\text{elektrona} = H_2O + O$. Kako sama voda praktički ne vodi električku struju, dodaje joj se elektrolita, obično kalijске ili natrijske lužine (20 do 25%). Za 1 m^3 vodika potrebno je praktički 4,5–5 kilovat-sati. Dobiven elektrolitski vodik ima čistoću 99,9%, a kisik 99,6–99,8%.



Sl. 3. SIEMENS-BILLITEROVA STANICA S DIAFRAGMOM

Vodik služi za sintezu amoniaka, hidriranje masti i drugih tehničkih produkata i t. d. Sama e. vode vrši se s dvije vrste elektrolitičkih stanica: unipolarne (Fausser, Holmboe, Electrolabs Comp., Kent, Steward i dr.) i bipolarne (Bamag-Zdansky, Pechkranz, Siemens, Egasco i dr.). Najviše se radi s bipolarnim stanicama, u kojima anoda jedne stanice služi ujedno kao katoda sljedeće (sl. 2). Elektroda je iz željeznog lima poniklovana s anodne strane. Da ne dode do mješanja razvijenih plinova, odijeljen je anodni od katodnog prostora diafragmom, obično iz azbesta. Najveći stroj za e-u vode nalazi se u Norvežkoj, a radi po sistemu Pechkranz sa 100.000 KW.



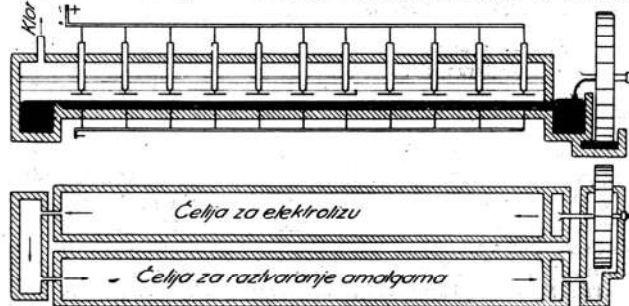
Sl. 4. NAPRAVE ZA ELEKTROLIZU OTOPINE ALKALIJSKIH KLORIDA (Siemens-Billiter)

Velike količine klora i alkalijskih hidroksida, potrebne za kemijske veleobrt, dobivaju se danas isključivo *elektrolizom vodene otopine alkalijskih klorida*. Na anodi razvija se iz vodene otopine na pr. natrijeva klorida ($H_2O + NaCl$) klor (Cl), a na katodi vodik (H), dok preostali ioni natrija (Na^+) i hidroksilni ioni (OH^-) daju natrijevu lužinu ($NaOH$): anoda $\leftarrow Cl^- + Na^+ + OH^- + H^+ \rightarrow$ katoda. Proizvodi e-e jesu dakle: lužina, klor i vodik. Napetost je raztvranja alkalijskih klorida visoka i iznosi 3,5–5 volta. Za 1 kg natrijeve lužine potrebno je oko 3 kilovat-sata. Da ne dode do reakcije stvorenog hidroksida s klorom, odijeljen je katodni prostor od anodnog, te prema načinu odjeljivanja razlikujemo 3 postupka: postupak s diafragmom, postupak sa zvonom i živin postupak. Najviše se radi po postupku s diafragmom, a zatim sa živom. Svjetska potrošnja električne energije za e-u alkalijskih klorida cieni se na koje 3 milijarde kilovat-sati.

Kod *postupka s diafragmom* odijeljen je anodni prostor od katodnog poroznom stienom iz cementa ili azbesta (sl. 3). Anoda, gdje se razvija klor, iz grafita je ili raztaljenog magnetita. Katoda je željezna mreža ili iz željeznih štapova poput roštilja. Od mnogih ovakvih stanica najrazširenija je Siemens-Billiter-stanica (sl. 4) s horizontalnom diafragmom, za razliku od nekih američanskih stanica (Nelson, Gibbs-Vorce) s vertikalnom diafragmom.

Postupak sa živom radi bez diafragme. Ovdje služi kao katoda živa. Radi velike »prenapetosti« vodik na živinoj katodi ne dolazi do njegova izlučivanja, već do izlučivanja alkalijske kovine, koja stvara sa živom amalgam. Zato se amalgam automatski prenosi u drugi dio stanice, gdje se s vodom raztvra u alkalijski hidroksid i vodik, a čista živa ponovno odlazi u anodni prostor kao katoda. Anoda je iz platine ili grafita. Prema načinu prijenosa žive i prema konstrukciji postoji više stanica (Castner, Kellner, Solvay, Wildermann, Whiting i t. d.), od kojih je dosta razširena Solvayeva (sl. 5), koja je izgrađena i do kapaciteta od 15.000 ampera. Prijenos amalgama iz prostora za elektrolizu u prostor za raztvranje vrši se na taj način, što je stanica nagnuta. Čista se živa ponovno diže u prostor za e-u s pomoću izvijačeg kotača. Kod nas u tvornici u Jajcu radi se e. otopine natrijeva klorida po Kellnerovu postupku.

Postupak sa zvonom osniva se na činjenici, da je katodna otopina lužine specifički teža od anodne. Tako ne dolazi



Sl. 5. SOLVAYEVA STANICA SA ŽIVOM

do mješanja katodnih i anodnih proizvoda, te je nepotreba upotreba diafragme. Jedina je još u pogonu stanica ove vrste u Aussigu.

Ako se e. otopine alkalijskih klorida vrši bez diafragme, tako da dolazi do mješanja razvijenog klorida i lužine, nastaje otopina hipoklorita, koja služi u veleobrtu za bielenje. E-om pak kod temperature od 75°C nastaju klorati i perklorati, potrebni u veleobrtu eksploziva.

Veliko je područje primijenjene e-e elektrolitičke redukcije, kojom se dobivaju mnogi anorganski i organski spojevi: natrijev hiposulfit, hidroksilamin, benzidin, bijeli indigo i t. d.

Nasuprot redukciji na katodi mogu se na anodi izvršiti najrazličitije elektrolitičke oksidacije: vodikov peroksid, kalijev permanganat, kalijev fericianid, perklorati, perborati i perkarbonati (sastojci prašaka za pranje, kao na pr. »Persil«), regeneriranje iztrošene otopine kromne kiseline, jodoform, octena kiselina, mnogi aromatski spojevi i t. d. Vrlo je važna primjena elektrolitičke oksidacije kod t. zv. elokiranja. To je prevlačenje površine aluminijske i njegovih legura sa slojem aluminijske oksida s pomoću elektrolitičke oksidacije. Na taj način postaje površina kovine otporna prema kemijskim i atmosferskim utjecajima, stalna protiv vatre i lako se može bojadirati. Od mnogobrojnih postupaka (Eloxal, Scheppard, Bough-Stuart, Alumilite, Alcoa, Seo i t. d.) najpoznatiji je Eloxal-postupak: aluminij i njegove legure ukapčuju se u krug električne struje kao anoda; kao elektrolit služi otopina, koja sadržava 3–10% oksalne kiseline i 0,1% kromne kiseline. Može se upotrijebiti istosmjerna i izmjenična struja od 60–100 volta.

LIT.: R. Müller, *Elektrometallurgie*, Beč 1932; R. Müller, *Elektrochemie nichtmetallischer Stoffe*, Beč 1937; Ullmann, *Enzyklopädie der technischen Chemie*, sv. III., 12. izd., Berlin—Beč 1929. I. F.č.

Elektroluminiscencija je pojav luminiscentne (hladne, fluorescentne) svjetlosti izazvan katodnim, kanalnim i Röntgenovim zrakama. Katodna luminiscencija se opaža na onim dijelovima katodne cijevi, na koje udaraju katodne zrake. Kod toga različita stakla fluoresciraju bojama od modre do žuto-zelene. Katodne zrake s malenim brzinama mogu uzбудiti crvenu fluorescenciju stakla. Pojav e-e pokazuje velik broj krutih i tekućih tvari, od kojih spominjemo Balmajnovu boju (CaS), kalcijev volframat, ZnS, od ruda sfalerit, dolomit, magnezit, korund (sl. 1), a od tekućina petrolej.

Za spektralno ispitivanje katodne luminiscencije nije uvijek potrebno, da se tvar nalazi u samoj katodnoj cijevi. Za takve svrhe služi i cjev s Lenardovim prozorčićem (sl. 2). Kroz tanki kovni listić takva prozorčica mogu katodne zrake prolaziti i uzbuditi luminiscentnu svjetlost na preparatu izvan cijevi s uređajem za grijanje. Kod viših temperatura nastaju novi dijelovi vrpčastog luminiscentnog spektra.

Američki iztraživači Coolidge (1925) i Vollrath (1931) našli su, da i zrak obične gustoće intenzivno fluorescira, ako kroza nj prolaze brze katodne zrake. Ako se za pogon cijevi, koja ima velik broj vrlo blizih Lenardovih prozorčica, upotrebi visoka napetost (na pr. 500 000 volta), fluorescira vanjski zrak kroz daljinu od 1 m.

Bilo je pokušaja, da se katodna luminiscencija upotrebi u svrhu električne rasvjetle. Kod Ebertove luminiscentne lampice svjetli je izvor puce od azbesta obasjano katodnim zrakama.

Goldstein je pokazao, da i kanalne zrake, poput katodnih, pobuđuju luminiscenciju stakla i drugih tvari (1902). Među pojave elektroluminiscencije ubraja se i svjetlost Geisslerovih cijevi, Teslina svjetlost i svjetlost Mac Farlan Moorea. Na velikom broju tvari iztraživali su ove pojave J. Becquerel, Lenard, Tomaschek, Urbain i dr.

LIT.: M. Curie, *Luminiscence de corps solides*, Pariz 1934; N. Riehl, *Physik u. technische Anwendungen d. Luminiszenz*, Berlin 1941.

LIT.: M. Curie, *Luminiscence de corps solides*, Pariz 1934; N. Riehl, *Physik u. technische Anwendungen d. Luminiszenz*, Berlin 1941.

Elektromagnetizam u užem, običnijem smislu bavi se magnetskim poljem električne struje i njegovom primjenom za dobivanje jakih magnetskih tokova i polja. Kod nekih pisaca e. obuhvaća čitavo područje sveze između električne struje i magnetizma, pa obrađuje cijeli magnetizam, elektrodinamiku i inducirane struje.

Ako iznad mirne deklinacione magnetske igle stavimo ravnu žicu pod stalnom strujom odprilike u pravcu zemaljskog magnetskog meridiana, magnetska igla se odklanja tako, da se njezin sjeverni kraj skrene prema iztoku ili prema zapadu. Smjer odklona zavisi o smjeru struje. Ako žica u jednakim prilikama prolazi izpod magnetske igle, odkloni su suprotni. To su osnovna opažanja, koja je objavio 21. VII. 1820 Oersted u Kopenhagenu. Tim je on otkrio magnetsko polje električne struje. Ampère je malo mjeseci kasnije za smjer odklona magnetske igle dao t. zv. pravilo plivača (→ Ampèreovo pravilo). Ovo se pravilo može zamijeniti pravilom desne ruke: položimo izpruženu desnu ruku na žicu tako, da su prsti u smjeru struje, a dlan da je okrenut prema magnetskoj igli, onda se sjeverni kraj igle odklanja prema palcu (sl. 1).

Malo je bilo otkrića u fizici, koja bi se mogla uzporediti s ovim Oerstedovim otkrićem ne samo po važnosti, nego i po brzini, kojom su se iza njega nizale nove spoznaje i nova otkrića. Već u nekoliko mjeseci iza toga bile su otkrivene podloge elektrodinamike i elektromagnetizma. Gotovo su isto tako bile plodne i iduće dvije godine. Ovo je razdoblje bilo okrunjeno 11 godina kasnije otkrićem induciranih struja (Faraday, 1831).

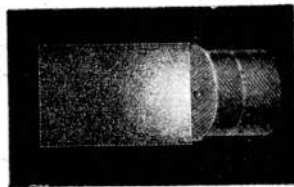
Arago i Gay-Lussac su u rujnu 1820 pokazali, da se čelična igla u uzvojnici, kroz koju teče struja, trajno magnetizira. Schweigger je početkom istog mjeseca objavio svoje načelo multiplikacije magnetskog djelovanja struje time, da se struja vodi oko magnetske igle u više uzvoja. Od polovine rujna do početka studenoga nije bilo gotovo ni jedne sjednice Francuske akademije znanosti, na kojoj ne bi Ampère prikazao nove pokuse. Osim svojih zakona o djelovanju struje na struju (→ elektrodinamika 3) on je u to doba objavio i svoj nalaz, da se uzvojnica pod strujom vlada kao magnet, pa je na temelju toga dao i osnovnu misao svoje teorije magnetizma. Ovu je potanjanje obradio idućih dviju godina. Arago i nezavisno od njega Yelin objavili su u studenom 1820 magnetiziranje čelične igle pomoću električne iskre iz lajdenske boce, kad su žicu od vanjskog obloga prema unutrašnjem savili u uzvojnici i u ovu stavili iglu. Davy je istog mjeseca javio Wollastoneu, da je pomoću iskre iz jake lajdenske baterije magnetizirao kratke čelične igle, koje su ležale poprieko izpod spojne žice, te da se željezna piljevina na kartonu izpod te žice namješta okomito na pravac žice. Tim je bila utvrđena za ono doba nova važna veza između statičkog elektriciteta i galvanske struje. Sturgeon je 1825 izradio prvi podkovasti elektromagnet, a već 1828 je Moll u Utrechtu sagradio elektromagnet, težak 5 funti, koji je nosio težinu od 75 funti. Henry je u Americi za namatanje jakih elektromagneta uveo izoliranu žicu i namatanje u više slojeva (1831). Elektromagnet, koji je iste godine sagradio za Yale College, nosio je težinu od 3000 funti. Te je iste godine on u Albanyju prikazao prvi elektromagnetski brzojav. Razmjerno kasno počelo se



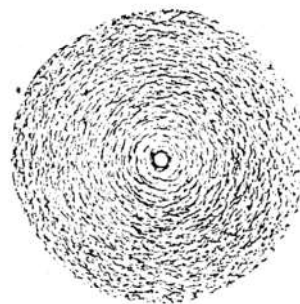
Sl. 1.



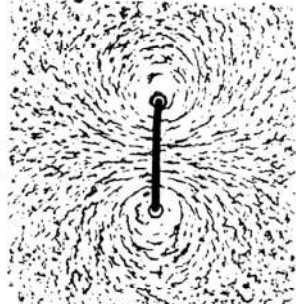
Sl. 1.
Katodna cjev s rudama, koje fluoresciraju.



Sl. 2. Katodna luminiscencija na preparatu izvan cijevi.



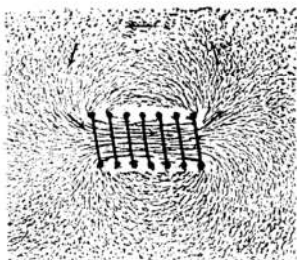
Sl. 2. MAGNETSKE SILNICE STALNE PRAVCASTE STRUJE



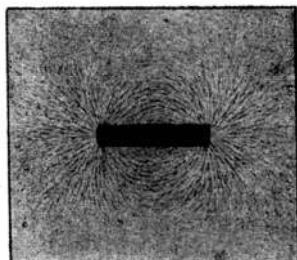
Sl. 3. MAGNETSKE SILNICE MAGNETSKOG LISTA

pitanje nosivosti elektromagneta obradivati kvantitativno; Joule (1839) je našao, da se magnetski moment ravnog elektromagneta s porastom jakosti struje približava nekom maksimumu.

Ako kroz sredinu horizontalnog komada kartona, posutog sitnozrnim željeznom piljevinom, vertikalno provedemo dugu ravnu žicu i kroz ovu pustimo jaku stalnu struju, piljevina se uz lako kuckanje po kartonu poreda u koncentrične krugove (sl. 2). Magnetske silnice pravčaste struje su krugovi, koncentrični sa žicom, koji leže u ravnini, okomitoj na žicu; to izlazi iz Biot-Savartove formule za bezkonačno dug pravčast vodič ($\rightarrow$ elektrodinamika 1). Iz Ampèreova pravila plivača izlazi za smjer magnetskih silnica struje pravilo: ako gledamo u smjeru struje, smjer silnica je u smjeru gibanja kazala na uri. Odatle se izvodi smjer magnetskog polja za magnetski list ($\rightarrow$ elektrodinamika 1). U slici 3 prikazano je polje magnetskih silnica magnetskog lista u ravnini, položenog kroz njegovu os. Slika 4 prikazuje

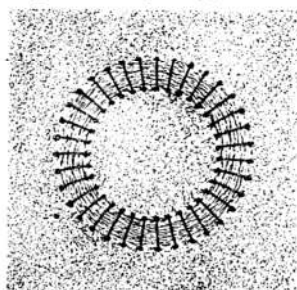


Sl. 4. MAGNETSKE SILNICE
KRATKE RAVNE UZVOJNICE



Sl. 5.

magnetske silnice jedne kratke ravne uzvojnice, a slika 5 magnetske silnice za dugu gustu pravčastu uzvojnici. Na svakom kraju uzvojnice silnice se razilaze i savijaju k drugom njezinu kraju; u sl. 5 polje silnica već posve nalikuje polju silnica magnetskog štapa. Zbog ovog razilaženja ili razipanja silnica u blizini se krajeva najjače očituje vanjsko mehaničko djelovanje magnetskog



Sl. 6. MAGNETSKE SILNICE
PRSTENASTE UZVOJNICE

polja uzvojnice; zato i ovdje krajeve često nazivaju »polovima« uzvojnice. Kod zatvorene prstenaste uzvojnice daleko pretežni dio silnica prolazi kroz nju u približno konstantnoj gustoći (sl. 6); ona nema »polova«, već čini zatvoreni magnetski krug. Magnetske silnice su u svim slučajevima zatvorene krivulje.

Ravna uzvojnica (»solenoid«), zgodno obješena, na pr. na Ampèreovu stalku (v.), namješta se pod strujom u magnetski meridian. Za polaritet njezinih krajeva vrijedi isto pravilo kao za magnetski list ($\rightarrow$ elektrodinamika 1). Primaknemo li njezinu kraju, u koji ulaze magnetske silnice, južni kraj magneta, oni se odbijaju.

Jakost magnetskog polja u osi ravne, jednolike namotane cilindričke uzvojnice, koja je u poredbi s njezinim promjerom vrlo duga, jest: $H = 4\pi ni$ ersteda, gdje je n broj uzvoja na 1 cm dužine uzvojnice, dok je i jakost struje u elektromagnetskim egs-jedinicama. Na samim krajevima jakost polja je polovica ovog iznosa. Područje homogenosti polja je u radialnom smjeru to šire, što je manji omjer polumjera uzvojnice prema njezinoj dužini, pa se za vrlo dugu gustu uzvojnici može uzeti, da je polje u njoj, osim neposredne blizine krajeva, homogeno. Ova formula vrijedi s dobrom približnošću i za prstenastu uzvojnici, ako je polumjer prstena dosta velik prema polumjeru uzvoja, a n brojimo po sredini debljine prstena. Strogo homogeno magnetsko polje dobiva se u unutrašnjosti gusto namotane elipsoidalne uzvojnice, t. j. takve, koja je namotana na jednom rotacionom elipsoidu, ako na 1 cm dužine rotacione osi dolazi točno jednak broj uzvoja.

Na temelju činjenice, da je kružna struja ekvivalentna s vrlo kratkim magnetom, Ampère je postavio molekularnu teoriju magnetizma (1821, 1822), kojom je dopunio stariju teoriju elementarnih magneta. Njom je uklonjen magnetizam kao neki zaseban agens i sveden na svojstvo električke struje. Po Ampèreovoj teoriji oko molekula jedne feromagnetičke kovine vječno kruže električke struje. To su t. zv. molekularne ili elementarne struje. Dok je takva kovina u nemagnetičnom stanju, ravni molekularnih struja leže bez reda u svim mogućim položajima, i među njima su podjednako zastupana oba smjera kruženja. Magnetiziranje kovine sastoji se u tom, da se djelovanjem vanjskog magnetskog polja veći ili manji broj ovih struja zakrene tako, da im ravni dodu okomito na smjer polja i u isti smjer kruženja. Ova naoko tako jednostavna teorija uključivala je u sebi velike poteškoće. Osobita poteškoća bila je u predočbi struja, koje bi vječno tekle bez slabljenja zbog otpora. Nije lako bilo ni sa zamisli, koju je prvi uveo Richarz (1890), da se Ampèreove struje sastoje u kruženju Helmholtzovih elementarnih množina elektriciteta, dotično Stoneyevih elektrona. Snažnu kvalitativnu podporu dao joj je pokus, koji je zamislio i uzalud kušao izvesti Richardson (1908), a izveli su ga 1915 Einstein i de Haas ($\rightarrow$ Einstein-de Haas-efekt). I obrnuti pokus: željezni štapić u brzini vrtnji trebao bi se zbog same vrtnje slabo magnetizirati u pravcu osi vrtnje. To su zaista pokazali pokusi, koje je izveo Barnett (1914) ($\rightarrow$ giromagnetički pojavi). Zbog kvantitativnih razlika rezultata ovih dvaju pokusa prema onima, kakve bi trebalo očekivati po jednostavnoj teoriji, danas se uzima, da Ampèreove elementarne struje u feromagnetičkim kovinama ne stoje u kruženju elektrona, nego u vrtnji elektronskog vrtloga oko vlastite osi.

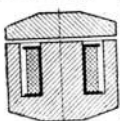
Elektromagnet. Stavimo li u uzvojnici, kroz koju teče stalna struja, jezgru od mekog željeza, magnetizam uzvojnice se silno pojača, jer se i željezo magnetizira, pa se njegov magnetizam superponira na magnetsko polje uzvojnice. Magnetsko polje pred glavom ravne uzvojnice sa željeznom jezgrom nekoliko je stotina puta jače od magnetskog polja iste uzvojnice bez željezne jezgre kod iste jakosti struje. To je elektromagnet, u ovom primjeru ravan. Njegov magnetizam gotovo sasvim nestaje, čim prekinemo struju u uzvojnici. Na ovim svojstvima temelje se njegove mnogobrojne znanstvene i tehničke primjene. Prvi elektromagneti bili su ravni; izradio ih je po svoj prilici već Arago u početku 1821.

Osobito velika pojačanja prvobitnog magnetskog toka uzvojnice dobivaju se, ako željezna jezgra čini zatvoren magnetski krug (prstenasti elektromagnet ili toroid). To je elektromagnet bez polova, jer u njemu praktički sve magnetske silnice prolaze kroz željezo, dok ih se vrlo neznatan dio razsiplje u zračni prostor. To razsipanje zavisi o permeabilnosti željeza, a i o obliku magnetskog kruga. Zato se za gradnju osobito jakih elektromagneta upotrebljavaju meka željeza s vrlo velikom permeabilnošću; osim toga traži se od takva željeza, da ima što manji remanentni magnetizam. U novije se vrijeme pojedini važniji dijelovi velikih elektromagneta grade od slitine željeza sa 34% kobalta, jer ima veću permeabilnost od najboljega mekoga željeza.

Način namatanja uzvojnice raznolik je, i to prema obliku i zadaći elektromagneta. Kod ravnih elektromagneta uzvojnica pokriva gotovo cijelu dužinu željezne jezgre, a namotana je u više slojeva. Kod podkovastih elektromagneta uzvojnica je namotana oko krakova, rjeđe i oko spojnog diela (jarma), a kod prstenastih oko celog prstena ili oko dva diela, koji simetrično leže. Kako je mjerdanov produkt broja uzvoja s jakošću struje, izbor broja uzvoja načelno zavisi s jedne strane o jakosti razpoložive struje, da bi se željezo magnetiziralo blizu do zasićenosti, a s druge strane o gornjoj granici zagrijavanja uzvojnice Jouleovom toplinom. Kod vrlo jakih elektromagneta, kakvi se upotrebljavaju u znanstvene svrhe, uzvojnica se sastoji od razmjerno malenog broja uzvoja šuplje bakrene ciev, kroz koju teče voda za hlađenje, uz veliku gustoću struje. Tim se umanjuje razsipanje magnetnih silnica.

Zadatak je vrlo jakih elektromagneta drugčiji u tehnici nego u znanstvenim zavodima. Zato je i njihova izvedba različita, iako je u oba slučaja osnovna težnja približavanje zatvorenome magnetskom krugu. Od jakih elektromagneta traži se u tehnici velika nosivost (za dizala).

Najrazšireniji oblik takva elektromagneta je t. zv. lončasti elektromagnet, koji su nekako u isto doba (oko 1850) opisali Romershausen, Guillemin i Fabre. Taj je oblik shematski prikazan u sl. 7 (presjek). Nadesno crtkana ploha je željezna jezgra, dvostruko crtkana



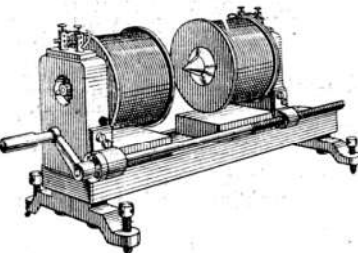
Sl. 7.
LONČASTI
ELEKTRO-
MAGNET

jaka kotva (donja, naliavo crtkana ploha) od iste vrsti željeza, kojoj je gornji rub također točno ravno izbrušen. Jezgra i kotva imaju kvake za vješanje. Jezgra se magnetizira tako, da njezin srednji dio ima jedan, a vanjski zvonoliki obvoj drugi polaritet. Kad je kotva prionula uz jezgru, može se reći, da sve silnice prolaze kroz željezo; tragova razsipanja ima samo na neznatnom zračnom sloju između kotve i jezgre. Odatle dolazi neka poteškoća u rukovanju, jer zbog gotovo potpuno zatvorenog magnetskog kruga ostaje jak ostatni magnetizam,

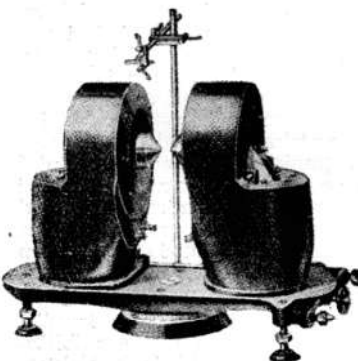


Sl. 8.

kad struju u uzvojnici prekinemo. U dizalima za željezne tere upotrebljavaju i t. zv. otvoreni oblik lončastog elektromagneta, gdje ulogu kotve ima željezni teret, koji se nahvata između srednjeg dijela jezgre i zvonolikog obvoja (sl. 8). Zadatak elektromagneta u znanstvene svrhe je stvaranje jakih magnetskih polja u više ili manje ograničenom prostoru. Izrežemo li iz prstenastog elektromagneta jedan kratak cilindri-



Sl. 9. ELEKTROMAGNET
RUHMKORFFOVA OBLIKA

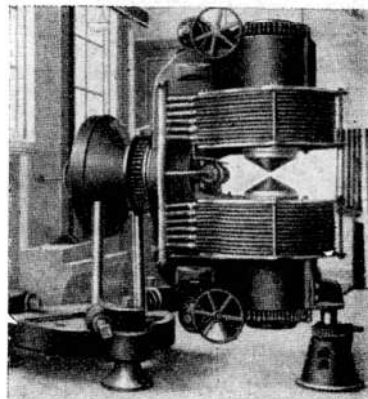


Sl. 10. DU BOISOV POLUPRSTENASTI
ELEKTROMAGNET

čeki komad jezgre, tako da prsten ostane nepodpun, na tome mjestu imamo jako magnetsko polje, koje je oko sredine izrezka homogeno. Na taj način prstenasti elektromagnet je uzorom i za elektromagnet u znanstvene svrhe. Elektromagneti, koji daju magnetska polja do najviše 30 kiloerstedu u prostoru oko 1 cm³, pripadaju ili starijem Ruhmkorffovu obliku (sl. 9) ili novijim oblicima od Du Bois (1894), kod kojih je razsipanje silnica manje; to su Du Boisov prstenasti elektromagnet i razšireniji poluprstenasti elektro-

magnet (sl. 10). Jako magnetsko polje dobiva se u zračnom prostoru među krajevima jezgre, t. zv. polovima. Među paralelnim čeonim ploham polnih nastavaka s promjerom plohe od kojih 5 cm mogu se dobiti kod malenog razmaka približno homogena polja jakosti 10 do 15 kiloerstedu. Jača polja, znatno nehomogena, dobivaju se među nastavcima oblikom prikraćenog čunja. Po najnovijim iztraživanjima kut među izvodnicama čunja treba iznositi 120°; većina velikih elektromagneta ima stariju Stefanovu vrijednost tog kuta 109,5°. Veliki Du Boisov elektromagnet daje u prostoru 0,3π 0,1 cm³ među čeonim ploham jakost polja 45 kiloerstedu uz potrošak snage struje 2 kW.

To je odprilike gornja granica za elektromagnete, kojima se još dade lako rukovati. S povećanjem jakosti polja nerazmjerno brzo rastu i veličina elektromagneta te snaga potrebnog izvora energije i poteškoće u rukovanju. U sl. 11 prikazan je veliki elektromagnet Kammerlingh Onnesa izrađen od tvrdke Siemens i Halske. U najnovijim najjačim elektromagnetima i u elektromagnetima ciklotrona (v.) oponašan je lončasti elektromagnet. Jaram elektromagneta čini zatvoreni željezni okvir, iz kojega prema unutra izlaze polne jezgre s uzvojnica za magnetiziranje. Na taj način magnetski tok čini dvostruki zatvo-



Sl. 11. VELIKI ELEKTROMAGNET
K. ONNESE

reni krug, prekinut samo među čeonim ploham čunjastih polnih nastavaka; tu je jako magnetsko polje. Takav oblik ima dosada najjači, a i najsavršeniji elektromagnet na svijetu, onaj sveučilišta u Uppsali (Švedska); stavljen je u porabu 1934. Ukupna mu je težina 37 tona. Uzvojnice su mu kratke, plosnate, s velikom gustoćom struje, uz hlađenje vodom. Uz potrošak snage od 98 kilovata on daje među ravnim čeonim ploham čunjastih polnih nastavaka u prostoru 0,52π · 0,6 cm² jakost polja 62 kiloerstedu, a u prostoru 2π · 2,3 cm² jakost polja 47 kiloerstedu. U poredbi s velikim elektromagnetom Francuzke akademije, koji se nalazi u mjestu Bellevue kod Pariza, a teži 120 tona, uppsalski elektromagnet uz jednak potrošak električne snage daje jednake jakosti polja na odprilike 1,4 puta većem prostoru $r^2 \cdot d$ (r = polumjer čeone plohe, d = razmak među čeonim ploham).

Veliki tehnički zahtjevi nastaju, kad se proizvode trajna vrlo prostrana i jaka magnetska polja, koja su homogena u većem svom dielu, kako je to kod uređaja za savijanje staza korpuskularnih zraka u Wilsonovoj komori (v.), a osobito kod ciklotrona (v.). Rutherford je za iztraživanje alfa-zraka upotrebljavao elektromagnet težine 2,25 tona, koji uz potrošak snage 2,2 kilovata daje trajno magnetsko polje jakosti 18 kiloerstedu, homogeno na 0,1%, u prstenastom prostoru sa srednjim polumjerom 40 cm, širine 5 cm, dubine 1 cm. Jedan njegov elektromagnet za iztraživanje savijanja staza korpuskula iz kozmičkih zraka daje uz potrošak 25 kilovata magnetsko polje jakosti 12,5 kiloerstedu u prostoru 12,5π · cm³ među čeonim ploham. U najnovije vrijeme su u svrhu iztraživanja tragova korpuskula iz kozmičkih zraka upotrebljavali i magnetsko polje uzvojnica bez željeza uz vrlo velike jakosti struje. Tako je Cotton (1938) dobivao u prostoru 75 × 20 × 4 cm³ polje jakosti 4 kiloerstedu kod jakosti struje u uzvojnici 30 hiljada ampera (struja iz Poirsonova unipolarnog dinama).

Vrlo kratkotrajna, a izvanredno jaka magnetska polja u prostorima reda veličine 1 cm³ pomoću uzvojnica bez željeza proizvodi su Walla i Kapitza. Wall (1924) je u tu svrhu upotrebljavao izbijanje baterije kondenzatora velikog kapaciteta nabijene na visoku napetost; dobivao je magnetska polja jakosti do 1400 kiloerstedu u trajanju 0,001 sec. Kapitza je najprije (1924) radio s časovitim jakim strujama, dobivenim kratkim spojem posebno u tu svrhu sagrađenih akumulatora, a kasnije (1927) kratkim spajanjem jakog izmjeničnog generatora kroz jednu poluperiodu. Dobivao je na prostoru 2 cm³ magnetska polja jakosti 320 kiloerstedu kroz vrijeme od oko 0,01 sec.

LIT.: (novija): A. Cotton, Comptes rendus 187 (1928); Cotton-Dupouy, C. R. 190 (1930); Cotton-Belling, C. R. 198 (1934); Cotton, Nuovo Cimento 15 (1938); L. Dreyfus, Arch. f. Elektrot. 29 (1931); Dreyfus, Elektrot. u. Maschinenbau 53 (1935); T. F. Wall, Nature 113 (1924) i 114 (1924); P. Kapitza, Proceedings of Royal Society 105 (1924) i 145 (1927). M. K.

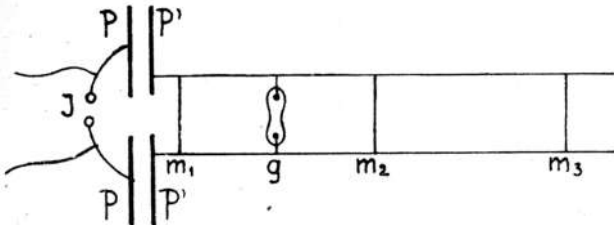
Elektromagnetska indukcija → Indukcija.

Elektromagnetski valovi. Nauka o elektromagnetskim ili električkim valovima nastala je s Maxwellovom teorijom elektriciteta, napose s njegovom elektromagnetskom teorijom svjetlosti (1873). Iz ove teorije izlazi, da se

električki titraji duž ravne žice, kroz uzduh, prazan prostor (eter) ili drugi izolator šire kao elektromagnetski valovi brzinom, koja je jednaka brzini svjetlosti u tim sredstvima. Po toj su teoriji i valovi svjetlosti vrlo kratki elektromagnetski valovi. Za širenje električkih titraja i širenje svjetlosti uzima Maxwell isto sredstvo, eter, i kaže: ne bi se dalo filozofski opravdati, kad bi za tumačenje novih pojava svakiput izpunjavali prostor drugim sredstvom.

Poznatim Hertzovim pokusima ($\rightarrow$ električki titraji 2) bio je cilj, da se eksperimentalno ispita vrijednost Maxwellove teorije. Hertz je radio s progresivnim i stojnim valovima na žici i s valovima u slobodnom prostoru.

1. Elektromagnetski valovi na žici. Za proučavanje ovih valova dao je E. Lecher eksperimentalni uređaj nacrtan u sl. 1. Imamo ovdje Hertzov oscilator sastavljen od iskrišta I i kovnih ploča PP' . Njima su nasuprot ploče $P'P'$ s uzporednim Lecherovim žicama, koje se na zgodnim mjestima kratko spajaju »mostovima«, t. j. žicama $m_1, m_2, m_3, \dots$. Prvi most m_1 stavlja se na mjesto, da s njim omeđen krug titranja s pločama $P'P'$ bude u resonanciji s primarnim krugom. Most m_2 dolazi na takvo mjesto, da Geisslerova cjevčica (g), koja se nalazi u sredini razmaka m, m_2 , najjače svietli. Mjesta m_1, m_2 jesu čvorovi



SL. 1. LECHEROV SPOJ

napetosti (čvorovi električke sile) i ujedno trbusi struje (trbusi magnetske sile). Na srednjem mjestu (g) nalazi se trbus napetosti, odnosno čvor struje. Na tom su mjestu oscilacije napetosti među žicama najjače, dok je struja u žicama trajno jednaka ničiti. Duž jednakog sliedećeg razmaka $m_2 m_3 = m_1 m_2 = \frac{\lambda}{2}$, gdje je λ valna

dužina, stanje se ponavlja. Na žicama razmješteni čvorovi i trbusi napetosti (trbusi i čvorovi struje) čine sustav stojnih električkih valova. Između napetosti i struje postoji razlika faze $\pi/2$, t. j. kad struje u žicama dosegnu najveću vrijednost, napetost je jednaka ničiti.

Stojni električki valovi mogu nastati također duž žice jedne uzvojnice. Takav slučaj, uz induktivnu vezu krugova titranja, imamo i kod Teslina transformatora ($\rightarrow$ električki titraji 3).

Za širenje električkih valova na žici vrijedi obća formula $c = f\lambda$. Pomoću valne dužine λ , koju Lecherov pokus neposredno daje, i pomoću frekvencije f , izračunane po Thomsonovoj formuli ($\rightarrow$ električki titraji 8), može se odrediti brzina c . Trowbridge i Duane su odredili frekvenciju oscilatora u Lecherovu spoju eksperimentalno na način Feddersenov razstavljanjem iskre u zrcalu, koje rotira (1895). Kod tih pokusa bilo je $f = 5,29 \cdot 10^8$ /sek, $\lambda = 56,8$ m. Izlazi $c = f\lambda = 3,005 \cdot 10^{10}$ cm/sek (= brzini svjetlosti u vakuumu). Ako se u formulu $\lambda = c/f$ uvrsti frekvencija tehničke izmjenične struje 50/sek, izlazi $\lambda = 6000$ km.

Na brzinu širenja električkih valova ne utječe tvar ni debljina žice, ali utječe okolno dielektričko sredstvo. Ako se žice nalaze u sredstvu s dielektričkom konstantom ϵ , za brzinu širenja valova vrijedi Maxwellova formula $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$. Označimo li sa L samoindukciju za 1 cm Lecherovih žica, sa C odgovarajući kapacitet, izlazi za vrijeme titraja $\tau = \lambda \sqrt{LC}$, a za brzinu valova izraz $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Teoriju elektromagnetskih valova, koji se uzbuđuju po dugim brzajavnim ili telefonskim vodovima, obradili su Heaviside i K. W. Wagner. Stavlja li se na početak voda izmjenična napetost, uzbuđeni se val očituje kao valna napetost V i kao valna struja I . K. W. Wagner

uvodi ovdje pojam valnog otpora $Z = \frac{V}{I}$. (Wellenwiderstand, résistance de l'onde). Ta je veličina nezavisna o mjestu i ima istu dimenziju kao elek. odpor. Za nju

vrijedi formula $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$. Kod nezgodne vrijednosti valnog

otpora mogu nastati smetnje u telefonskom saobraćaju.

U tehnici jake struje mnogo su iztraživali elektromagnetske valove na žici, koji se zovu putni valovi (ondes mobiles, Wanderwellen). Oni se očituju u časovitom povišenju pogonske napetosti u dalekovodu za jaku struju.

Nastaju, kad se na dugi vod priključuju električki strojevi (generatori, transformatori). Osobite jake putne valove u slobodnim dalekovodima izazivaju bliza izbijanja atmosfere (olujni valovi, Gewitterwellen). Njihov postanak prikazuje sl. 2, u kojoj je sa Q označen vezani električki naboj, koji influencijom izводи oblak. Taj je naboj nepomičan, dok se ne mienja električko polje između oblaka i zemaljskog tla. Blizim udarcem munje izjednačuju se naboji oblaka i tla. Naboj Q tim se oslobađa i ciepa u dva diela, koji putuju po dalekovodu protivnim smjerovima brzinom $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/sek. Višestrukom refleksijom ovih nabojna na krajevima razvijaju se putni valovi, ako dalekovod ima dovoljno veliku dužinu. Frekvencija ovih valova na dalekovodu dužine l , kojem su krajevi izolirani, računa se po formuli $f = \frac{c}{2l}$. Za $l = \frac{\lambda}{2} = 150$ km izlazi $f = 1000$

titraja u sek. Drugčije su prilike, ako radimo s dvostrukim dalekovodom, kojem su oba vodiča spojena na jednom kraju. Na tom se kraju valne struje zbrajaju, dok je radi refleksije valna napetost trajno jednaka ničiti.

Primjer: Valna napetost $V = 50.000$ volta; valni odpor $Z = 500$ oma; valna struja $I = 100$ amp.; snaga $N = 5000$ kW.

Premda ovakvi pojavi traju vrlo kratko vrijeme (na pr. samo 10^{-5} sek, ako je $\lambda = 3$ km), mogu načiniti velike štete u priključenim strojevima. Našlo se međutim, da je opasnost to manja, što je veća radna napetost stroja. Utvrđeno je na pr., da kod uređaja, koji radi sa 6000 volta, lako dolazi do probijanja izolacije među početnim zavojima transformatora, koji

je na vod priključen, dok su uređaji za vrlo visoke napetosti (220.000 volta) neosjetljivi prema ovakvim zalutalim putnim valovima. Da se zaprieči razorno njihovo djelovanje, nači-

njene su različite zaštitne sprave s odporima, ugušivačima, kondenzatorima i iskrištima. U novije vrijeme izpituju ove pojave katodnim oscilografom (Gábor, Rogowski i dr). Sl. 3 pokazuje oscilogram putnog vala, koji se dobio kod stavljanja 100 m dugog voda na napetost 5.000 volta. Podvostručenje napetosti nastalo je refleksijom naboja na slobodnom kraju voda. Strmi početni dio oscilograma (čelo putnog vala) dug je 3 m i traje oko 10^{-8} sek.

2. Slobodni elektromagnetski valovi. Od električke iskre u sredini »otvorenog oscilatora« (oscilatora dipola sl. 4) šire se električki valovi na sve strane. Brzina širenja ista je kao kod valova duž žice. Energija, koja elektromagnetskim zračenjem izlazi u prostor, raste s 4. potencijom frekvencije. Kod niskih frekvencija ta je energija neznatna, i to je razlog, da se tek kod vrlo visokih frekvencija (10^8 do 10^9 u sek), s kakvim je Hertz radio, mogla opaziti. U središtu je oscilatora trbus titranja, na krajevima su čvorovi titranja. Približno je

$\lambda = 2l$, $f = \frac{3 \cdot 10^{10}}{2l}$, gdje je l dužina dipola,

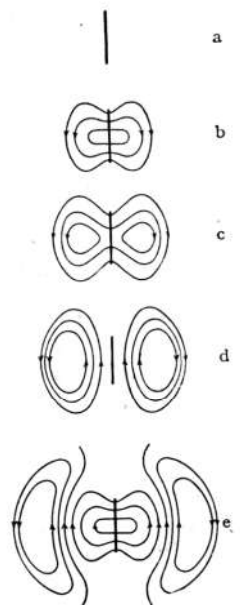
Sl. 3. OSCILOGRAM PUTNOG VALA

Sl. 4. HERTZOV STAP-OSCILATOR (DIPOL)

Sl. 3. OSCILOGRAM PUTNOG VALA. The diagram shows a sharp vertical rise in voltage followed by a series of smaller oscillations. The horizontal axis is labeled with time intervals: 10^-8, 10^-7, 10^-6, 10^-5, 10^-4, 10^-3, 10^-2, 10^-1, 10^0, 10^1, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5, 10^6, 10^7, 10^8, 10^9, 10^10, 10^11, 10^12, 10^13, 10^14, 10^15, 10^16, 10^17, 10^18, 10^19, 10^20, 10^21, 10^22, 10^23, 10^24, 10^25, 10^26, 10^27, 10^28, 10^29, 10^30, 10^31, 10^32, 10^33, 10^34, 10^35, 10^36, 10^37, 10^38, 10^39, 10^40, 10^41, 10^42, 10^43, 10^44, 10^45, 10^46, 10^47, 10^48, 10^49, 10^50, 10^51, 10^52, 10^53, 10^54, 10^55, 10^56, 10^57, 10^58, 10^59, 10^60, 10^61, 10^62, 10^63, 10^64, 10^65, 10^66, 10^67, 10^68, 10^69, 10^70, 10^71, 10^72, 10^73, 10^74, 10^75, 10^76, 10^77, 10^78, 10^79, 10^80, 10^81, 10^82, 10^83, 10^84, 10^85, 10^86, 10^87, 10^88, 10^89, 10^90, 10^91, 10^92, 10^93, 10^94, 10^95, 10^96, 10^97, 10^98, 10^99, 10^100.

Sl. 4. HERTZOV STAP-OSCILATOR (DIPOL). The diagram shows a simple dipole antenna with two vertical rods connected at the top and bottom by horizontal wires. The horizontal axis is labeled with time intervals: 10^-8, 10^-7, 10^-6, 10^-5, 10^-4, 10^-3, 10^-2, 10^-1, 10^0, 10^1, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5, 10^6, 10^7, 10^8, 10^9, 10^10, 10^11, 10^12, 10^13, 10^14, 10^15, 10^16, 10^17, 10^18, 10^19, 10^20, 10^21, 10^22, 10^23, 10^24, 10^25, 10^26, 10^27, 10^28, 10^29, 10^30, 10^31, 10^32, 10^33, 10^34, 10^35, 10^36, 10^37, 10^38, 10^39, 10^40, 10^41, 10^42, 10^43, 10^44, 10^45, 10^46, 10^47, 10^48, 10^49, 10^50, 10^51, 10^52, 10^53, 10^54, 10^55, 10^56, 10^57, 10^58, 10^59, 10^60, 10^61, 10^62, 10^63, 10^64, 10^65, 10^66, 10^67, 10^68, 10^69, 10^70, 10^71, 10^72, 10^73, 10^74, 10^75, 10^76, 10^77, 10^78, 10^79, 10^80, 10^81, 10^82, 10^83, 10^84, 10^85, 10^86, 10^87, 10^88, 10^89, 10^90, 10^91, 10^92, 10^93, 10^94, 10^95, 10^96, 10^97, 10^98, 10^99, 10^100.

f frekvencija, λ valna dužina. Polazeći od Maxwellovih jednačbi Hertz je računom i konstrukcijom odredio »faze« električkog polja u okolini dipola. Početno stanje toga polja pokazuje sl. 5a–c.



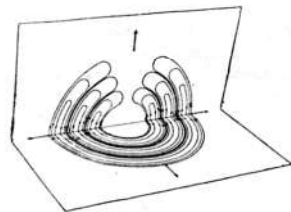
Sl. 5. MOMENTANA STANJA ELEKTRIČKOG POLJA OSCILATORA-DIPOLA

Sl. 5a: čas $t = 0$; dipol bez električkog polja.
b: u prvoj četvrtini periode titranja $\frac{T}{4}$ izlaze iz dipola električke silnice. Naboj gornje polovice dipola +, donje –.
c: u drugoj četvrtini periode električke silnice rješavaju se veze s dipolom.
d: čas $t = \frac{T}{2}$; odričene električke silnice zatvorene su krivulje. One čine vrtložno električko polje.
e: čas $t = \frac{3}{4}T$; slika električkih silnica kao u »fazi« (b), no smjer im je obrnut.

Magnetske silnice jesu koncentrične kružnice u ravninama okomitim na dipol. Gustoća i smjer magnetskih silnica mijenjaju se periodski. Zajedno s električkim poljem širi se i magnetsko.

Kod teoretskih razmatranja dieli se prostor oko dipola u blizko i daleko područje. Daleko područje počinje u daljini $r \approx 4\lambda$ i zove se područje ili polje zračenja. Iz Hertzsche teorije sledi, da se u blizkom području jakost električkog polja (E) u radialnom smjeru mijenja razmjerno s $1/r^3$, a jakost magnetskog polja (H) sa $1/r^2$. Razlika faze između oba polja iznosi $\pi/2$. U dalekom području veličine E i H opadaju sa $1/r$. Među njima nema faze razlike.

Sl. 6 pokazuje dva okomita presjeka kroz daleko elektromagnetsko polje dipola. U vertikalnom presjeku nacrtane su električke silnice, u horizontalnom magnetske. Sliku bi trebalo prostorno izpuniti i zamisliti, da se električko i magnetsko polje razteže brzinom svjetlosti kao mjehur od sapunice.



Sl. 6. PRESJECI KROZ PROSTORNO POLJE ZRAČENJA

Za maksimalne jakosti električkog i magnetskog polja u daljini r vrijede u ovom slučaju formule

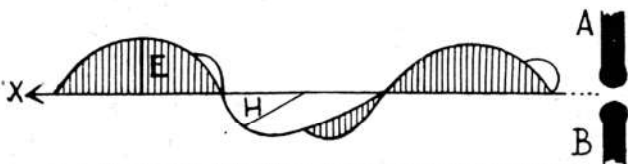
$$E = \frac{60 \pi I_0 l}{r \lambda} \text{ volta na cm;}$$

$$H = \frac{5 I_0 l}{r \lambda} \text{ amperzavoja na cm,}$$

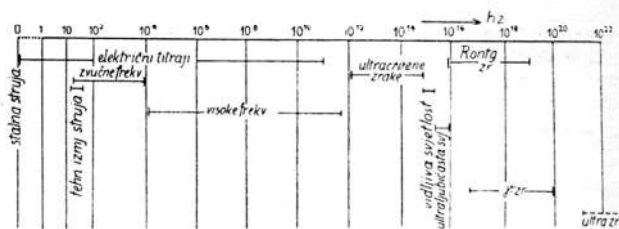
u kojima je I_0 maksimalna struja u dipolu, l dužina dipola. Veličine l , r , λ računaju se u cm, I_0 u amperima.

Zamršenije su prilike, ako se promatra širenje vala u kosim smjerovima. U takvim slučajevima nisu ni električko ni magnetsko polje okomiti na smjeru širenja, kako to sledi iz sl. 6. U smjeru osi dipola je $E = H = 0$.

Struja elektromagnetske energije kroz 1 cm^2 u 1 sek (tok zračenja) definira se izrazom $S = EH \sin \varphi$, gdje je



Sl. 7. ELEKTROMAGNETSKO POLJE ZA SMJER ŠIRENJA OKOMIT NA OSI DIPOLA



Sl. 8. ELEKTROMAGNETSKI SPEKTAR

φ kut među vektorima E i H . Mjerimo li E sa volt/cm, H sa amperzavoj na cm, izlazi S u jedinicama vat/cm².

Za snagu zračenja (puissance rayonnée, power radiated, Strahlungsverlust), t. j. za energiju, koja zračenjem izlazi u okolni prostor u 1 sek, vrijedi izraz

$$N = 40 \pi^2 \frac{l^2}{\lambda^2} I_0^2 = 80 \pi^2 \frac{l^2}{\lambda^2} I^2,$$

u kojem I znači efektivnu struju u dipolu. Veličina

$$R = 80 \pi^2 \frac{l^2}{\lambda^2}$$

zove se odpor zračenja (radiance, résistance de rayonnement, radiation resistance, Strahlungswiderstand). Ta je veličina jednaka odporu, u kojem bi se trošilo toliko energije, koliko dipol gubi zračenjem. Mjeri se omima (Ω).

Najveću ulogu u radiotehnici imaju poluslobodni valovi. Ako sredinom vertikalnog dipola položimo vodljivu horizontalnu ravninu, ne će to utjecati na oblik silnica ni na struju u dipolu. M. Abraham i Blondel pokazali su (1901), da za dipol izvedena teorija vrijedi i u ovakvom slučaju, gdje za gornji dio dipola uzimamo vertikalnu antenu, a za donji dio savršeno vodljivu ravninu »zemlju«. Za snagu zračenja i za odpor zračenja izlaze formule

$$N = 160 \pi^2 \frac{h^2}{\lambda^2} I^2, \quad R = 160 \pi^2 \frac{h^2}{\lambda^2},$$

u kojima h znači efektivnu visinu antene, I efektivnu struju.

Ako je razmještaj struje duž antene sinusoidalan, efektivna visina antene s dužinom H dana je izrazom

$$h = \int_0^H \sin \frac{2\pi x}{\lambda} dx.$$

Primjeri: a) Za unifilarnu antenu, koja titra s četvrtinom valne dužine ($H = \lambda/4$), izlazi

$$h = \frac{2H}{\pi} = \frac{\lambda}{2\pi}, \quad R = 40 \Omega.$$

b) Podatci za radio-postaju Croix d'Hins — Bordeaux:

cieli odpor antene $R' = 0,8 \Omega$;
efektivna struja u podnožju antene $I = 480 \text{ amp.}$;

antenska snaga $R' I^2 = \frac{0,8 \cdot 480^2}{10^3} = 184 \text{ kilovata}$;

efektivna visina antene $h = 170 \text{ m}$;
valna dužina $\lambda = 18900 \text{ m}$;

odpor zračenja $R = \frac{160 \pi^2 h^2}{\lambda^2} = 0,12 \Omega$;

stupanj djelovanja $\eta = \frac{R I^2}{R' I^2} = 0,15$.

Prema tome od 184 kilovata u anteni izlazi zračenjem u prostor samo 27,6 kilovata (15%). Kod rada s kratkim valovima stupanj je djelovanja mnogo veći.

3. Elektromagnetski valovi obuhvaćaju veliko područje fizikalnih pojava, koji svi čine ukupni elektromagnetski spektar. Cijelo to područje od 0 do 10^{23} titraja u sekundi (hertza, Hz) predočeno je u sl. 8. S obzirom na frekvenciju svojstva i učinci su ovih valova vrlo različni. Područje od 0 do 10^{11} Hz pripada valovima, koje proizvodimo električkim spravama. Tehnika jake struje radi sa 0 Hz (stalna struja) i sa 15 do 60 Hz (nizkofrekventna izmjenična struja). Električni titraji, izazvani čujnim zvučnim valovima, obuhvaćaju audiofrekvencije od 16 do 16.000 Hz. Vidljivom spektru pripadaju frekvencije $3,8 \cdot 10^{14}$ do $8,3 \cdot 10^{14}$ Hz. Najviše frekvencije pripadaju Röntgenovim i ultrazrakama.

Pregled elektromagnetskog spektra prema valnim dužinama daje slijedeća tablica:

Vrst valova (zraka)	λ (cm)
električni valovi	$2 \cdot 10^6$ — $8 \cdot 10^{-3}$
ultracrveni spektar	$3,4 \cdot 10^{-2}$ — $7,8 \cdot 10^{-5}$
vidljivi spektar	$7,8 \cdot 10^{-5}$ — $3,6 \cdot 10^{-6}$
ultralubičasti spektar	$3,6 \cdot 10^{-5}$ — $1,4 \cdot 10^{-6}$
Röntgenove zrake	$6,6 \cdot 10^{-6}$ — $1,6 \cdot 10^{-9}$
najkraće γ -zrake	$0,5 \cdot 10^{-10}$
sekundarne ultrazvuke	$\sim 10^{-12}$ do 10^{-13}

U tehnici visoke frekvencije razlikujemo duge, srednje, granične, kratke i ultrakratke valove. Dugim valovima, koji se upotrebljavaju najviše u radiotelegrafiji, pripadaju valne dužine $\lambda > 2000$ m. Za srednje je valove $\lambda = 200 - 2000$ m, za granične $\lambda = 100 - 200$ m, za kratke $\lambda = 10 - 100$ m. Ultrakratki valovi $\lambda < 10$ m služe u televiziji. Valovi $\lambda < 1$ m zovu se mikrovalovi, dm-, cm-, mm-valovi. Mjesto podataka o valnim dužinama pišu se u novije vrijeme podatci frekvencije u kilociklima (kilohertzima, khz). Metodom električke iskre postignuti su najkraći električki valovi $\lambda = 0,08$ mm, koji sežu u ultracrveni spektar (Glagoleva Arkadijeva, 1924). Zajedničko je svojstvo sviji elektromagnetskih valova, da se sastoje od električkog i magnetskog vala i da se kroz prazan prostor šire jednakom brzinom.

4. Metode dobivanja električkih valova $\rightarrow$ električki titraji 2, 3, 4, 5, 6.

5. Širenje električkih valova, s kojima se služi radio-tehnika, vrlo je zamršen pojav. Glavni su utjecaji električka svojstva valova (valna dužina, prigušenje), vrijeme (dan, noć, godišnje doba), oblik i svojstva zemaljske površine (kopno, more), prilike u atmosferi. Do nekog obćeg rješenja ovog pitanja nije nauka došla.

Sommerfeld u svojoj teoriji (1909) razlikuje prostorne valove i valove duž zemaljskog tla. Od antene odašiljača šire se prostorni valovi u kuglama. U većim daljinama njihovo električko polje opada sa $1/r$, a energija sa $1/r^2$. Valovi duž tla prodiru djelomice u zemlju i mogu se izporediti s valovima na žici. Njihovo električko polje opada sa $1/\sqrt{r}$, a energija sa $1/r$. U većim daljinama preteže energija valova duž tla. No radi absorpcije u zemlji u vrlo velikoj daljini mogu ipak doći do jačeg izražaja prostorni valovi. Obje su vrste valova u međusobnoj vezi. Nemoguće ih je razstaviti, kao što je nemoguće odijeliti električko polje od magnetskog. Za efektivnu jakost električkog polja vrijedi po Sommerfeldu formula

$$E = 120 \pi \frac{hI}{\lambda r} f(\varphi) = \frac{377 hI}{\lambda r} f(\varphi) \quad (1)$$

(h, λ, r kilometri, I amperi, E milivolti na metar, $\frac{mV}{m}$).

Faktor absorpcije ili Sommerfeldova funkcija $f(\varphi)$ zavisi o dielektričkoj konstanti i o električkoj vodljivosti tla. Poslužimo li se izrazom za snagu zračenja u kilovatima, dobivamo za jakost električkog polja jednostavniju formulu

$$E = \frac{300}{r} \sqrt{N} f(\varphi) \quad (2) \quad (r \text{ kilometri, } N \text{ kilovati, } E \frac{mV}{m})$$

Formule (1) i (2) mogu se primijeniti na srednje valove, ako daljina r iznosi nekoliko stotina km.

6. Širenje dugih valova na velike daljine, gdje dolazi u obzir i zakrivljenost Zemlje, iztraživali su Austin, Appleton, Zenneck, Kiebitz, Bäumlér i dr. Služeći se velikim brojem empiričkih podataka izveo je Austin za efektivnu jakost električkog polja poluempiričku formulu (1926)

$$E = 120 \pi \frac{hI}{\lambda r} \sqrt{\frac{\alpha}{\sin \alpha}} e^{-0,0015 r/\lambda^{0,6}}$$

(h, λ, r kilometra, I amp., $E \frac{mV}{m}$).

U ovoj je formuli α kut, pod kojim bi se iz središta Zemlje vidjela daljina r . Faktor absorpcije $e^{-0,0015 r/\lambda^{0,6}}$ izveden je za širenje valova $\lambda = 500$ do 25.000 m nad morskom površinom po danu ($r > 1000$ km). Za utjecaj zemaljske zakrivljenosti izveo je Kiebitz izraz $\frac{\alpha}{\sin \alpha}$. Za širenje valova do mjesta antipoda ne može se upotrebiti ni Kiebitzova ni Austinova formula. Za takav slučaj izla-

zilo bi $\frac{\alpha}{\sin \alpha} = \infty, \sqrt{\frac{\alpha}{\sin \alpha}} = \infty$. Drugi iztraživači dobili su za faktor absorpcije izraze s različnim empiričkim konstantama.

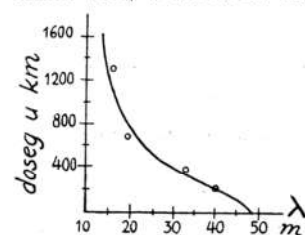
Primjeri: 1. Odašiljač Croix d'Hins (Bordeaux): $h = 0,17$ km, $\lambda = 18,9$ km, $I = 480$ amp. Račun po Austinovoj formuli daje za $r = 6.000$ km (= daljina Bordeaux—New-York) $E \sim 0,06 \frac{mV}{m}$.

2. Iz podataka za zagrebački odašiljač $h \sim H = 50$ m, $\lambda = 476,9$ m, $I = 25$ amp., za daljinu $r = 1000$ km izlazi po Austinovoj formuli $E \sim 0,1 \frac{mV}{m}$. Za primanje detektorom

treba $E \sim 3 \frac{mV}{m}$.

Da je Zemlja savršena kugla, bila bi prema teoriji jakost električkog polja na mjestu antipoda ista kao u blizini odašiljača valova. No radi sploštenosti Zemlje nisu u takvom slučaju jednaki svi putovi valova. Zbog razlike u fazi, koja tim nastaje, mogu se na diametralnome mjestu Zemlje valovi oslabiti. Motrenja pokazuju, da je u području 100 km oko mjesta antipoda električko polje znatno pojačano.

7. S kratkim valovima postizava se brzojavna i telefonska veza na vrlo velike daljine, iako odašiljač radi s malenom snagom. Valovi, veći od 60 m, vladaju se uglavnom kao srednji i granični valovi. Noću sežu dalje nego danju. Kod još kraćih valova nastaju zamršenije i anomalne prilike. U razmjerno malenoj daljini od odašiljača počinje t. zv. mrtva zona ili zona šutnje ($\rightarrow$ akustika 4), u kojoj je primanje nemoguće i uz pojačanu snagu odašiljača. U mnogo većoj udaljenosti prestaje mrtva zona. Jakost električkog polja se skokom uveća. Kažemo, da kratki valovi preskakuju mrtvu zonu. Pojav je to izraziti, što je val kraći. Vanjski polumjer mrtve zone zavisi o dužini vala, o dnevnom vremenu i godišnjoj dobi. Noću seže mrtva zona dalje nego danju, zimi dalje nego u ljetno doba. Zavisnost toga doseg o valnoj dužini pokazuje sl. 9. Već je starije izkustvo pokazalo, da na primanje valova mnogo utječe valna dužina, dnevno vrijeme i godišnje doba. Razlikovali su noćne valove (25—40 m), dnevne (10—18 m) i prelazne valove (19—24 m). Dvije daleke brzojavne postaje mogu uzdržati trajnu međusob-



SL. 9. ZAVISNOST DOSEGA ZONE O VALNOJ DUŽINI

nu vezu, ako, prema dnevnom vremenu i godišnjoj dobi, zgodno odabiru valne dužine.

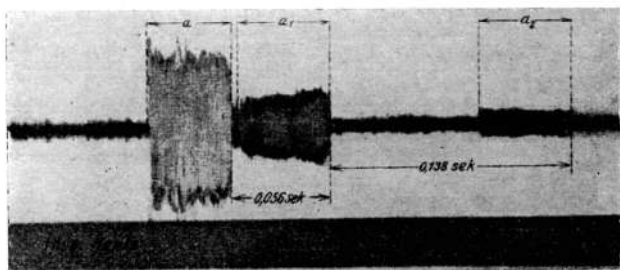
Za anomalno širenje kratkih valova prihvatili su slijedeće tumačenje: Valovi, koji slijede zemaljsku površinu, absorbiraju se već nakon razmjerno malenog puta. Prostorni pak valovi, nakon refleksije na visokim ioniziranim slojevima uzduha (Heavisideov i drugi slojevi), vraćaju se i dolaze na mjesta izvan mrtve zone.

8. Valovi, kraći od 10 m, šire se pravocrtno kao valovi svjetlosti. Zovu se radi toga kvazi-optički valovi. Držali su, da je zbog toga njihov doseg ograničen optičkim horizontom. Radi pojava ogiba mogu se ovi valovi primati u mnogo većim daljinama. Za jakost električkog polja unutar optičkog horizonta vrijedi formula $E = 9,5 \frac{\sqrt{N}}{r}$

(N vati, r km, E volti/metar).

Mikrovalovi upotrebljavaju se u aeroplanskom saobraćaju i pomorstvu (signaliziranje, pokazivanje tečaja broda). Prema Marconijevim pokusima granični doseg valova $\lambda = 57$ cm iznosi 270 km, dok je optički doseg bio samo 116 km.

9. Pojav radiojeke. Time, što električki valovi različnim putovima stižu na mjesto primanja, može nastati pojav radiojeke. U tom slučaju točkasti Morseov znak primamo kao dva bliza znaka. Prvi znak daju valovi, koji se šire duž zemaljske površine, a drugi potječe od prostornih valova reflektiranih na ioniziranom visokom sloju atmosfere.



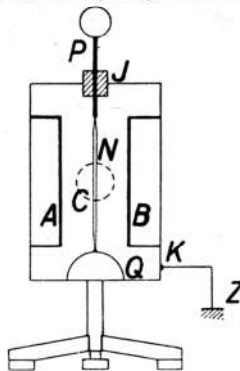
SL. 10. OSCIOGRAM ZNAKA POSLANOG OKO ZEMLJE

Kod kratkih valova može nastati pojav radiojeke tako, da nakon prvog primanja valovi obidu cijelu Zemlju jedanput ili više puta. Sl. 10 pokazuje oscilogram takvog pojava. Odašiljač Buenos Aires; postaja za primanje Geltow; $\lambda = 18,3$ m; a = glavni primljeni znak; a_1 = znak primljen iza prvog obilaženja Zemlje; a_2 = znak primljen poslije drugog obilaženja Zemlje. Trajanje obhoda oko Zemlje 0,138 sek.

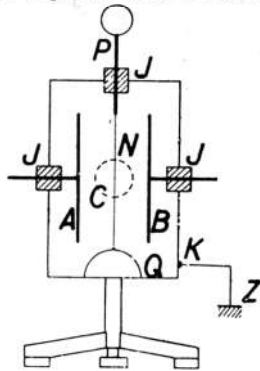
10. Detektori za električke valove → detektor → elektroskopska cjev.

LIT.: F. Bédau, *Cours élémentaire de Télégraphie et de Téléphonie sans fil*, 1937; F. Vilbig, *Lehrbuch der Hochfrequenztechnik*, 1937; B. Beckmann, *Die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen*, 1940. D. P.-č.

Elektrometri, mjerne sprave s vrlo raznolično izvedenim pomičnim sustavima, koji se odklanjaju pod utjecajem elektrostatskih sila u slučaju postojanja električkoga napona između sustava i okolnog kovnog »kućišta«. Elektrometri su dakle u bitnosti bolji elektroskopi (v.) i po načelu djelovanja *elektrostatski instrumenti*, odakle i dolazi, da ih često, ako imaju skalu u jedinicama električkoga napona *voltima*, zovu i »elektrostatskim voltmetrima«. E. se prema galvanometričkim i drugim instrumentima, u praksi običnijima, odlikuju time, da kod mjerenja stalnih napona ne troše uopće nikakvu struju, dok kod priključka na izmjenične električke napone troše obično tek posve neznatnu i k tomu »praznu« ili »bezvratnu« električku struju. Dvije suvremene izvedbe e-a, od kojih je prva osjetljiva na umjereno nizke, a druga čak i neznatne električke napone, bile bi na pr. *Wulfovi e.*: *dvonitni* (sl. 1) i *jednonitni* (sl. 2). Dvonitni je u praksi vrlo običajan uz-



SL. 1.



SL. 2.

prkos umjerenosti osjetljivosti, jer je jednostavan u upotrebi. Prema sl. 1 lako je u njemu nazreti bitno usavršeni elektroskop sa zlatnim listićima (→ elektroskopi). I kod njega se naime vidi, izoliran jantarnom J od kućišta K, kovni provod u obliku štapića P s kuglicom na gornjem kraju; samo se mjesto zlatnih listića, slobodnih na donjem kraju, nadovezuju na P dvije izvanredno nježne vodljive niti N (na pr. tanahne kovne žice od samo 1 ili 2 tisućinke milimetra promjera), koje elastično zajedno drži nježni kremen stremen Q (kremen također dobro izolira). Zbog jačega elektrostatskoga djelovanja postavljeni su s obje strane niti kovni štapići A i B u vodljivoj vezi s kućištem. Nabije li se sustav s nitima pozitivno ili negativno prema kućištu, niti N se do izvjestne mjere razmaknu, jer ih privlače štapići A i B, i popušta im elastično stremen Q. Dragocjeno je pritom, da se položaj ravnotežja kraj sićušne mase niti N uspostavi osobito brzo, na pr. u malom dielku sekunde, tako da je instrumentom moguće

pratiti i brzo promjenljive pojave. Mikroskopom ili projekcionim uređajem, udešenim poprilično za vidno polje ograničeno crtkanom kružnicom C u sl. 1, može se povećanje razmaka niti prema neznatnom njihovom početnom razmaku u nenabijenom stanju lako pratiti, i na prikladnoj skali u velikom povećanju odčitavati (bilo u mikroskopu, bilo u projekciji na velikom zaslonu vidljivom istodobno brojnom slušateljstvu). Skala može odmah biti u voltima (na pr. s mjernim obsegom od nekoliko volta do nekoliko stotina volta). Kod jednonitnoga e-a izvedba je po sl. 2 izmijenjena ne samo po tom, što instrument ima samo jednu nit N, nego i po tom, što su štapići A i B također poput provodnika P jantarnima J izolirano uvedeni. Tako A i B mogu tvoriti samostalne elektrode, između kojih se može podržavati »pomoćni napon« baterije B₀ galvanjskih elemenata. Ako je sredina baterije B₀ spojena s kućištem K i sa zemljom Z, jedna od ploča A i B bit će pozitivna, a druga isto toliko negativna prema kućištu i zemlji, pa ako se pomoćni napon uzme dovoljno visok i recimo takva predznaka, da A bude pozitivno i B negativno, doći će i kod neznatno prema kućištu pozitivne električke niti N istodobno do jakoga odbijanja između N i jako pozitivne elektrode A i jakoga privlačenja između N i jako negativne elektrode B, te prema tomu do odklona niti N prema B (uz negativni naboj niti N ova bi se odklonila prema A). Upotrebom pomoćnog napona osjetljivost se instrumenta dakle znatno poveća, pa jednonitni e. reagiraju već na pr. na stotine volta, i njihova će upotreba, uzprkos komplikacijama s izvorom pomoćnog napona, biti na mjestu, gdje se traže ekstremne osjetljivosti. Od starijih e-a još se i danas mnogo spominje naročito Kelvinov (Thomsonov) kvadrantni e-ar. Tehnički zanimljive su izvedbe elektrostatskih sprava, prikladne za mjerenja vrlo visokih napona (mnogo »kilovolt«); ovi se elektrostatskim visokonaponskim voltmetrima lakše neposredno mjere nego na pr. galvanometričkim voltmetrima posredno uz pomoć smanjenja napona mjernim transformatorima. E. nisu samo neophodno potrebni za nastavne svrhe, nego i za vrlo važna naučna izpitivanja, na pr. iztraživanja radioaktivnosti, ionizacije zraka i t. d. Neke posebno osjetljive konstrukcije e-a kadre su mjeriti čak struje na pr. od samo 100 ili 1000 elektrona sekundno (600 elektrona sekundno odgovaralo bi struji od kojih 10^{-16} ampera!). J. L.

Elektromotorna sila shvaća se kao »skup sila«, koje razstavljaju protivne električke naboje, kao »uzrok« gibanja elektriciteta u vodiču, odnosno kao »uzrok«, koji u vodiču uzdržava potencijalnu razliku (H. A. Lorentz). U vezi s izrazom e. s. dolazi izraz napetost među polovima njem. Klemmenspannung). Dok izvor ne daje električku struju, obje su veličine jednake. U zatvorenom krugu struje napetost je među polovima to manja od e-e s-e, što je veći gubitak napetosti u nutrašnjem otporu izvora. U elektrotehničkoj literaturi uvrštava se često e. s. u pojam električke napetosti. Hrvatske norme uvele su za e-u s-u oznaku E. Jedinica u praktičnom sustavu mjera za e-u s-u i za električku napetost jest volt (→ električke jedinice). D. P.-č.

Elektron (→ čestice elementarne).

Iztraživanjem katodnih zraka, betazraka te zraka, koje pri fotoelektričkom pojavu izlaze iz kovina, utvrdilo se, da su sve one u biti jednake: u njima se gibaju negativni elektricitet i masa nerazdružno povezani tako, da svaki gram nosi $1.76 \cdot 10^{18}$ kulon elektriciteta. Kako je taj naboj 1838 puta veći od onoga, što ga pri elektrolizi prenese 1 gram najlakšeg elementa, vodika, to je očit zaključak, da se u katodnim i srodnim zrakama mogu gibati samo krhotine atoma. Za te krhotine obćenito se ustalilo ime elektroni, pa se gore spomenute zrake zovu jednim imenom elektronske zrake. Pokusi s elektronskim zrakama učinili su vjerojatnom pomisao, da su elektroni sitna tjelešca. Ta je vjerojatnost znatno porasla, kad su u Wilsonovoj komori učinili vidljivima staze, kojima su pojedini elektroni prošli, i kada je Millikan pokazao, da postoji najmanji električki naboj.

Da predočbom o elektronu, kao tjelešču s negativnim električkim nabojem, nije ovaj podupno opisan, moglo se naslutiti već iz Bohrove nauke o atomima. De Broglie je iznio hipotezu, da su elektroni i valne prirode. Ona je našla eksperimentalnu potvrdu u difrakciji elektronskih zraka, pojavu značajnu za valove. »Valni paket« (v. 11) pokušaj je zornog spoja obiju predočbi o elektronu.

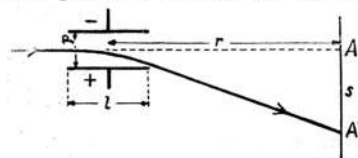
Novija kvantna nauka načelno se odriče zorne predočbe o elektronu pa postavlja matematičku shemu, kojom obrađuje elektron. Iz te sheme izlazi, kada se pri opisanju pojava možemo služiti česticom, a kada valom kao slikom o elektronu.

1. ELEKTRONSKE ZRAKE ponajprije su opažene kao t. zv. katodne zrake (v.; Plücker, 1858). Hittorf je našao (1869), da se one šire pravocrtno, i da ih magnetsko polje može svinuti, dok je Goldstein otkrio (1876) odklon u električkom polju. Crookes (→ Crookes, Crookesove cjev) izveo je s katodnim zrakama pokuse, koji su učinili jak dojam na njegove suvremenike, i iznio je misao, da su one stvarne prirode. Perrin je jasno utvrdio (1895), da su one struja negativnog elektriciteta (→ Perrinova cjev), na što je upućivao i smjer odklona u magnetskom i električkom polju.

Lenard je pokazao (1899), da pri Hallwachsovu pojavu (→ fotoelektricitet) izlaze iz kovina, obasjanih ultravioletnom svjetlošću, elektronske zrake. Približno se u isto vrijeme ustanovilo, da su i betazrake (v.) elektronske.

2. ODKLON ELEKTRONSKIH ZRAKA U ELEKTRIČKOM I MAGNETSKOM POLJU može poslužiti, da se izmjeri brzina v , te omjer e/m naboja e i mase m elektrona (J. J. Thomson, 1897).

Uzki svežanj elektronskih zraaka upravi se između ploča ravnog kondenzatora, kojemu su ploče uzporedne s prvotnim pravcem svežnja (sl. 1). Ako među pločama nema električkog napona, svežanj ostaje pravocrtan i zgađa u točki A zastor, koji pod udarcima elektrona svijetli (fluorescentni zastor). Kad se uzpostavi napon U , onda se u čitavom prostoru među pločama pobudi



Sl. 1.

električko polje jakosti $E = U : d$ (d je razmak među pločama), pa na svaki elektron djeluje sila $F = eE$, koja ga vuče prema pozitivno električkoj ploči. Elektron se dakle u tom prostoru giba poput vodoravno bačenog kamena u polju zemljine težje, t. j. po paraboli. Zato sada zgodi zastor u točki A', koja je u daljini s od točke A. Ako je l duljina kondenzatora, dakle i prostora, u kojem vlada električko polje, a r razmak između sredine kondenzatora i zastoira, to onda valja:

$$v^2 : \frac{e}{m} = E \frac{rl}{s}. \quad (1)$$

Pobudi li se na jednom dielu puta elektronskih zraaka magnetsko polje okomito na smjer svežnja, tad djeluje na svaki elektron sila

$F = evB$, gdje B znači magnetsku indukciju u pobuđenom polju. Smjer te sile je okomit i na brzinu v i na smjer magnetskog polja (t. j. na smjer od B). Ako je l' širina polja (sl. 2), r' razmak između sredine polja i zastoira, s' opaženi uklon, tad u ovom slučaju valja:

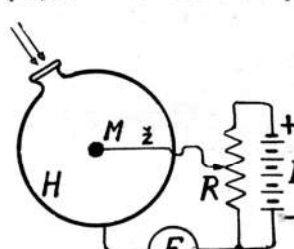
$$v : \frac{e}{m} = B \frac{r'l'}{s'}. \quad (2)$$

U sl. 2 treba zamisliti, da je magnetsko polje nastalo tako, da se pred ravninom crtnje nalazio sjeverni magnetski pol.

U jednačbama (1) i (2) mogu se sve veličine na desnoj strani izmjeriti i time odrediti v odn. e/m . Nalazi se, da se elektroni gibaju brzinama od nekoliko tisuća km/sek pa sve do blizu brzine c svjetlosti u praznome prostoru; tako na pr. v u betazrakama RaC iznosi i 99% od c . Ako je v maleno prema c , tad je omjer e/m stalan (unutar granica pogreške mjerenja) i iznosi $1.758 \cdot 10^{18}$ kulon/gram $= 5.270 \cdot 10^{17}$ elst cgs/gram, međutim, kad se v približava brzini c , biva on sve manji i manji (Kaufmann, 1901), pa na pr. za spomenute elektrone iz RaC iznosi tek $1/2$ navedene vrijednosti. Budući da naboj e ne zavisi o brzini, to sledi, da je masa ovih elektrona 7 puta veća od mase m_0 sporih elektrona. Ovo je u skladu s izrazom, što ga daje teorija relativnosti za ovisnost mase nekog tiela o brzini:

$$m = m_0 : \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

Pri izraživanju brzina elektrona u fotoelektričkom pojavu upotrebio je Lenard (1902) metodu »protivnog polja«.



Sl. 3.

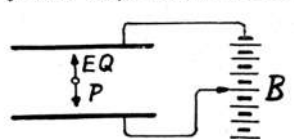
— U središtu šuplje vodljive kugle H (sl. 3), iz koje je odstranjen uzduh, nalazi se kovina M, koja se obasja svjetlošću kroz maleni prozor od kremenova stakla. Tad izlieću iz M elektroni, koje pohvata kugla H i vraća ih kroz vrlo osjetljiv galvanometar E, otpornik R i žicu ž kovini M. E pokazuje u tom slučaju električku struju. Ako se pomoću baterije B i otpornika R daje kovini M pozitivni, a kugli H negativni naboj, tad u kugli vlada električko polje, koje vuče izbačene elektrone natrag prema M. Ako je električki napon U između M i H baš tolik, da nijedan elektron ne stigne do kugle H, t. j. da kroz E ne teče električka struja, tad je kinetička energija, a time i brzina v najbržih elektrona određena izrazom $eU = (m - m_0)c^2 \approx m_0 v^2/2$, gdje je m masa tih elektrona (→ elektronvolt).

U tablici su u prvi stupac uneseni naponi U , koji bi po Lenardovoj metodi »protivnog polja« baš mogli zaustaviti elektrone, koji se gibaju brzinama v unesenim u drugi stupac. Brojevi u trećem stupcu kažu, koliko je puta pripadna masa m elektrona veća od m_0 .

Napon U volt	Brzina v km/sek	m/m_0
1	595	1.00
100	5950	1.00
10^3	$1.87 \cdot 10^4$	1.003
10^4	$5.85 \cdot 10^4$	1.02
10^5	$1.65 \cdot 10^5$	1.2
10^6	$2.83 \cdot 10^5$	3.2
$3 \cdot 10^6$	$2.97 \cdot 10^5$	7.1

3. NABOJ ELEKTRONA e (odn. masa m) ne može se odrediti iz odklona elektronskih zraaka u električkom i magnetskom polju. Za to su potrebne druge metode. Pojavljuje se elektroliza (v.) upućuju na postojanje najmanje množine električkog naboja. No taj naboj dobivamo iz naboja golemog broja čestica, koje u elektrolizi sudjeluju, pa je bila opravdana sumnja, nije li on tek neka srednja vrijednost.

Millikan je (1911 i dalje) »metodom kapljice« odredio najmanji električki naboj, koji se može jednom tielu dati odn. oduzeti. — Sitna kapljica ulja pada kroz mirni uzduh stalnom brzinom, jer njezinoj težini drži ravnotežu sila, koja nastaje od trenja s uzduhom. Pri tome ona poprimi oblik kugle radi površinske napetosti. Iz brzine padanja, specifične težine ulja te koeficijenta viskoznosti i specifične težine uzduha mogao je Millikan odrediti polumjer kapljice (nekoliko tisućina mm), dakle i njezinu težinu. Već kod razpršavanja ulja u kapljice ove se redovito elektriziraju. No Millikan je mogao naboj kapljice promieniti tako, da je rentgenskim zrakama obasjao uzduh, kroz koji se kapljica giba. Ove zrake naime izbiju iz pojedinih molekula elektrone, i tako u uzduhu nastanu nosioc električkih naboja. Kad se takav nosilac pridruži kapljici, promieni ona skokom naboj. — Nosi li kapljica električki naboj Q , može se zgodnim homogenim električkim poljem (među pločama širokoga ravnog kondenzatora) vertikalnog smjera postići, da kapljica lebdi. Tad je sila EQ , kojom električko polje jakosti E djeluje na naboj Q , jednaka težini P kapljice (sl. 4); t. j. $EQ = P$.



Sl. 4.

Kako su E i P poznati, to se odatle odredio naboj Q . Za taj je izišlo, bio on pozitivan ili negativan, da može imati samo neke odabrane vrijednosti: $1e, 2e, 3e, \dots$, gdje je $e = 1.60 \cdot 10^{-19}$ kulon $= 4.80 \cdot 10^{-10}$ elst cgs. Ta se vrijednost slaže s onom nađenom pri elektrolizi. Uzima se, da svaki elektron nosi naboj e . Masa m elektrona računa se iz omjera e/m . Izlazi $m_0 = 9.10 \cdot 10^{-28}$ gram.

4. LORENTZOVA TEORIJA ELEKTRONA uzima, da dijelovi atoma i molekula nose električke naboje. H. A. Lorentz ju je nadovezao (1895) na Maxwellovu teoriju (v.) elektromagnetskog polja, koja obrađuje tvarno sredstvo kao kontinuum, t. j. ne uzimajući u obzir njegovu strukturu. Već je Maxwell iztaknuo za svoj način razmatranja, da može biti valjan, ako su dužine elektromagnetskih valova vrlo velike prema veličini čestica, od kojih je tvar građena. — Lorentz nadalje pretpostavlja, da je uvijek mirni eter (v.) jedini nosilac elektromagnetskih polja i da izpunjava neprekidno čitav svemir. Kroz eter se gibaju atomi pobuđujući svojim električkim nabojima zamršena elektromagnetska polja. Ta se polja dodaju k poljima izazvanim uzrocima izvan tiela. Zato se neko elektromagnetsko polje, na pr. žuta natrijeva svjetlost, drugčije razprostire kroz prazni prostor, a drugčije kroz staklo. U posljednjem slučaju sudjeluju u pojavu i čestice, od kojih se sastoji staklo.

Uvodeći prikladne predočbe o građi tvari Lorentzova teorija je tumačila disperziju svjetlosti, dobru vodljivost kovina za električku struju i toplinu, magnetska svojstva tvari i još druge pojave.

Ampèreova hipoteza, da u pojedinim česticama magnetizma kruži elektricitet ($\rightarrow$ Ampèreove struje), poprimila je u teoriji elektrona određeniji oblik u pretpostavci, da se u atomima magnetizma gibaju elektroni po zatvorenom stazama. Uzme li se, da elektron izvodi to gibanje pod utjecajem sile, koja je upravljena prema čvrstom središtu, tad je njegova staza u ravnini, a veličina magnetskog momenta d , koji joj stazi pripada, razmjerna je s nabojem elektrona, površinom staze i frekvencijom obhoda. Kako elektron ima i masu, to je u ovom slučaju elektronov zakretni impuls p razmjern s masom elektrona, površinom staze i frekvencijom obhoda. Izlazi, ako se služimo miešanim sustavom

električkih jedinica, $d = \frac{1}{2c} \frac{e}{m} p$. Svakom je magnetskom momentu pridružen posve određen mehanički zakretni impuls (magnetomehanički paralelizam). To vrijedi i za čitav magnet, jer se njegov magnetski moment dobije geometrijskim zbrajanjem momenata njegovih dijelova, a isto tako i zakretni impuls ($\rightarrow$ Einstein-de Haasov pojav).

S poviestnog je gledišta značajno, da je Lorentzovo tumačenje t. zv. normalnog Zeemanova pojava (v.) također vodilo do elektrona, i to kao česticu, odgovornu za izsijavanje svjetlosti.

5. RAZPRŠAVANJE I ABSORPCIJA ELEKTRONSKIH ZRAKA pripomogli su upoznavanju atoma. — Hertz je započeo (1892) izpitivanjem propustnosti tankih kovinskih listića za elektronske zrake. Ta je izraživanja nastavio Lenard izvedavši elektronske zrake iz katodne ciev u uzduh kroz »Lenardov prozor« (1893). Lenard je našao, da se pri prolazu kroz tvar, na pr. uzduh, alumini, i t. d., elektronske zrake razpršavaju i absorbiraju to manje, što su elektroni brži. Za pojedini elektron treba uzeti da je pritom prošao kroz mnogo tisuća atoma, prije nego što je znatnije skrenuo sa svojeg pravca ili u kojem atomu zapeo. Na osnovu toga

i Ruthefordovih pokusa s alfa-zrakama (v.) nastala je predočba o atomu, poznata pod imenom Ruthefordov atom (1911; $\rightarrow$ atom 11).

Sl. 5 prikazuje staze elektrona u uzduhu postale vidljivima metodom Wilsonove komore (v.): ravni magleni trag potječe od jednog vrlo brzog elektrona, a svakojako svinuti od polaganijih izbačenih iz molekula uzduha fotoelektričkim pojavom.

O prolazu elektrona kroz tekućinu $\rightarrow$ Čerenkovljev pojav.

Za razpršavanje i absorpciju vrlo sporih e-a $\rightarrow$ Ramsauerov pojav. Sraz fotona i elektrona $\rightarrow$ Comptonov pojav. Također $\rightarrow$ deltazrake.



Sl. 5.

6. BOHROVA TEORIJA uzima Ruthefordovu predočbu o atomu. N. Bohr se njome poslužio najprije pri tumačenju spektra vodikova atoma. U tom atomu kruži jedan elektron oko protona, koji ga privlači po Coulombovu zakonu. Po klasičnoj (Maxwell-Lorentzovoj) elektrodinamici morao bi takav elektron neprestano izsijavati elektromagnetske valove, a to bi išlo na račun njegove energije, pa bi u vrlo kratko vrijeme stigao do samoga protona. Bohr pretpostavlja, da postoji samo diskretni niz staza (kružnica), po kojima se može elektron gibati, i da elektron pritom ne izsijava valova. Te su kružnice određene Bohrovim kvantnim uvjetom, da zakretni impuls p elektrona može biti samo neki cjelobrojni mnogokratnik od $h/2\pi$, t. j.

$$p = n \frac{h}{2\pi}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

gdje je h Planckov kvant djelovanja. Spektar vodika mogao je Bohr raztumačiti dodavši k tome još svoj »uvjet frekvencije«, u kojem po drugi put ulazi u ovu teoriju konstanta h . Po tom uvjetu atom izsijava svjetlost, kad elektron preskoči s jedne šire kružnice na užu.

Po magnetomehaničkom paralelizmu pripada najužoj kružnici ($n = 1$) magnetski moment

$$\mu = \frac{eh}{4\pi mc}$$

poznat pod imenom Bohrov magneton. Momenti širih staza su mnogokratnici ovoga.

A. Sommerfeld je proširio Bohrovu teoriju razmatrajući gibanje elektrona po elipsama i uzevši u obzir relativističku promjenu elektronske mase s brzinom. Time je tumačio finu strukturu vodikovih crta i našao novu vezu između naboja e elektrona i Planckova kvanta djelovanja h .

7. SPIN ELEKTRONOV je nova hipoteza o elektronu, do koje su dovela spektroskopska izraživanja. — Već prije Bohrove teorije uspjelo je uglavnom razmrsiti spektre alkaličnih i zemnoalkaličnih kovina u serije. Pri tumačenju tih spektara Bohrovom teorijom ostalo je neriješeno pitanje višestrukih spektralnih crta, tako na pr. natrijeve dvostruke žute (5890 Å, 5896 Å). Isto tako nije objašnjen anomalni Zeemanov pojav. Sve te poteškoće rješava jednim udarcem hipoteza Goudsmita i Uhlenbecka (1925), da sam elektron ima magnetski moment jednak Bohrovu

magnetonu i zakretni impuls, t. zv. spin, $\frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$, dakle polovinu od onoga, koji bi mu po magnetomehaničkom paralelizmu pripadao.

8. PAULIJEVO NAČELO vrijedi za raspored elektrona po raznim kvantnim stanjima u atomu, molekuli, dapače i u velikom komadu kovine. — Kvantno stanje jednog elektrona u bilo kojem atomu određeno je s četiri kvantna broja: n, l, m_l, m_s . Brojem n , t. zv. glavnim kvantnim brojem, određena je, uglavnom, energija elektrona, a brojem l , azimutalnim kvantnim brojem, koji može imati vrijednosti $0, 1, 2, \dots, n-1$, oblik njegove staze. Svakom kvantnom broju l pripada $2l+1$ vrijednost magnetskog kvantnog broja m_l , a to su: $-l, -(l-1), \dots, -1, 0, 1, \dots, (l-1), l$. Konačno je m_s spinov kvantni broj, koji može imati

vrijednosti $-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$. — Paulijevo načelo kaže, da u

jednom atomu ne mogu biti dva elektrona, kojima bi sva četiri kvantna broja bila jednaka, t. j. koji bi bili u istom kvantnom stanju. Prema tome, ako su dani brojevi n, l, m_l, m_s , tad može biti u atomu samo jedan elektron, kojemu ti brojevi pripadaju. U brojevima n, l, m_l mogu se podudarati samo dva elektrona s obzirom na dvije vrijednosti m_s ; dok se u brojevima n, l može podudarati $2(2l+1)$ elektron, jer m_l može poprimiti $2l+1$ vrijednost. Konačno se u broju n može podudarati $\sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 2n^2$ elektrona;

radi vrijednosti, koje broj l može primiti. Tim je načelom raztumačen periodički sustav elemenata. U najnižem energetsom nivou, $n = 1$, t. zv. K-ljuski, mogu biti najviše 2 elektrona; u L-ljuski, $n = 2$, već $2 + 6 = 8$ elektrona; u M-ljuski, $n = 3$, $2 + 6 + 10 = 18$ elektrona, i t. d., a to su brojevi elemenata u periodama sustava elemenata.

Fermijeva statistika uzima Paulijevo načelo u svoje osnove.

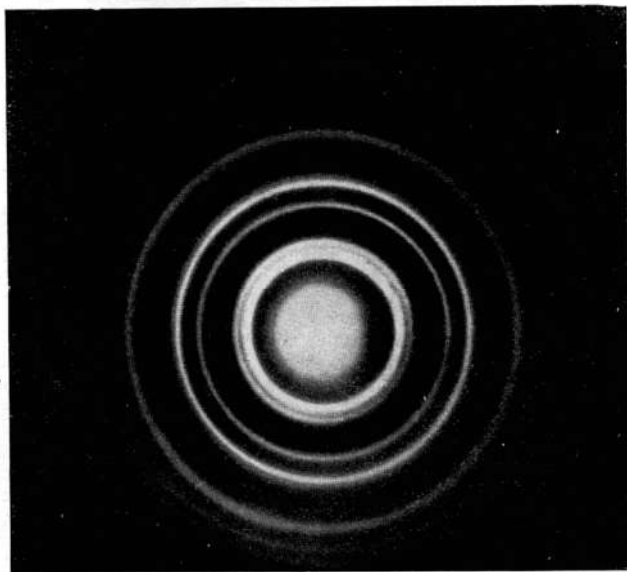
Paulijevo načelo daje se donekle obrazložiti sa stajališta valne mehanike.

9. MATERIJSKI VALOVI jesu valovi, koje je L. de Broglie pridružio (1924) svakoj čestici, koja se giba. On polazi od relativističke formule $E = mc^2$, gdje je dana masa m , koja pripada energiji E , te od izraza za energiju fotona $E = h\nu$. Spajanjem tih dviju formula dobivamo polaznu točku teorije L. de Brogliea: $E = mc^2 = h\nu$. Svakoj čestici mase m pridružen je periodički pojav frekvencije ν . U prostoru, u kojem čestica miruje, t. j. koji se zajedno s česticom giba, ta formula glasi: $E_0 = m_0c^2 = h\nu_0$. L. de Broglie uzima, da je periodički pojav u tom prostoru čisto titranje. Pri prielazu u prostor, u kojem se čestica giba, valja se poslužiti Lorentzovom transformacijom ($\rightarrow$ relativnost), pa se onda periodički pojav u tom prostoru predoči kao val. Dužina λ tog vala dana je izrazom $\lambda = h/mv$, gdje je v brzina čestice, a brzina vala formulom $u = c^2/v$. Dakle je brzina tih valova veća od brzine svjetlosti c .

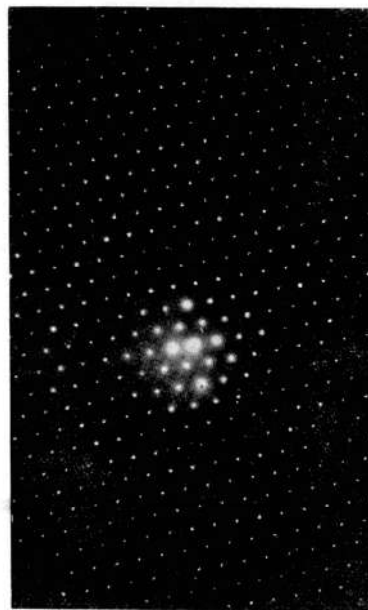
W. Elsasser je upozorio (1925), da bi se materijski valovi mogli eksperimentalno pokazati kao difrakcija i interferencija elektronskih i atomskih zraka, t. j. u pojavima, značajnim za valove.

10. DIFRAKCIJA (OGIB) I INTERFERENCIJA ELEKTRONSKIH ZRAKA nađena je eksperimentalno g. 1927. Davisson i Germer pustili su uski svežanj sporih elektrona, da pada okomito na plohu niklenog kristala, pa su izraživali, kako se oni od njega odrazuju. Našli su, da za izvjestne brzine elektrona postoje u prostoru povlašteni smjerovi, u koje se elektroni osobito jako odbijaju. To se može protumačiti time, da se elektronski valovi, nastali ogibom na atomima kristala, u tim smjerovima interferencijom pojačavaju. Iz rasporeda atoma na površini kristala i povlaštenog smjera odraza mogli su Davisson i Germer odrediti dužinu vala elektronskih zraka. Ta se izvrstno slaže s onom, što je predviđa teorija de Brogliea. Razlog, zašto se takvo odbijanje elektronskih zraka dobiva samo za izvjestne brzine elektrona, t. j. samo za odabrane dužine elektronskih valova, jest u tome, što u pojavu sudjeluju i valovi nastali ogibom na atomima izpod površine kristala. Ako se uzme u obzir i dubinski raspored atoma u kristalu, to se mogu teoretski odrediti te odabrane dužine elektronskih valova. Ove se međutim ne slažu osobito s eksperimentalno nađenima, jer se u teoriji zasada ne može dovoljno uzeti u obzir završeno električno polje, koje vlada u unutarnjosti kristala.

Ogib brzih elektrona pokazao je G. P. Thomson (1927) pustivši, da uski svežanj elektronskih zraka prolazi kroz mikrokristalinični kovinski listić vrlo male debljine (oko 10^{-6} mm). Zrake zatim padaju na fotografsku ploču, okomitu na njihov prvotni smjer. Osim središnje mrlje, u kojoj zgađaju ploču one elektronske zrake, koje nisu promijenile smjera, pokaže se još nekoliko krugova, od zraka odklonjenih ogibom na kristalićima listića. Sl. 6 jedna je snimka G. P. Thomsona ($\rightarrow$ Debye-Scherrerova metoda).

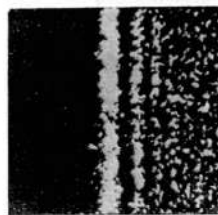


Sl. 6.



Sl. 7.

različnu od ništa samo u jednom malenom djeliću prostora; u njemu je dakle zgusnuta sva energija tih valova. Prema tome se taj djelić prostora može smatrati kao mjesto tjelešca. Takav valni paket nije međutim jednostavan valovit pojav, nego je sastavljen od jednostavnih valova, koji izpunjavaju čitav prostor. Dužine tih valova poprimaju sve moguće vrijednosti iz jednog uzgok područja oko dužine vala, koja prema de Broglieu pripada tjelešcu, što se giba brzinom v . Ovi se valovi poništavaju interferencijom posvuda osim u gore spomenutom djeliću prostora, u kome grade valni paket. Premda pojedini jednostavni valovi putuju brzinama, koje su prema teoriji de Broglieovoj veće od brzine svjetlosti c , ipak se valni paket giba, kako pota-



Sl. 8.

nje razmatranje pokazuje, brzinom v tjelešca. Nažalost, valni paket povećava s vremenom svoj obujam i — kako vrijeme napreduje — znademo sa sve manjom točnošću mjesto čestice. Na granici pak dvaju područja, na kojoj se materijski valovi lome i reflektiraju, raspada se u dva valna paketa. To su poteškoće, radi kojih se valnom paketu ne može pripisati objektivni značaj.

12. VALNA MEHANIKA i njoj ravnopravna kvantna mehanika odriču se zorne predočbe o gibanju elektrona u atomima. — E. Schrödinger je osnovao (1926) valnu mehaniku vođen paralelizmom, koji postoji između klasične mehanike i geometrijske optike (Hamilton, 1828). Geometrijska optika vrijedi uz uvjet, da su leće i predmet, od kojega valja načiniti sliku, veliki prema dužini vala upotrebne svjetlosti. Pri prielazu na sitne predmete treba se poslužiti optikom, koja vodi računa o valovitoj naravi svjetlosti. Geometrijska optika je tek granični slučaj valne. Schrödinger uzima, da je i mehanika, koja vrijedi za velika tjelesa, tek granični slučaj valne mehanike, koju valja upotrebiti, ako se radi o sitnim tjelešcima i malenim prostorima, kao što je elektron unutar jednog atoma. Osnovnu jednačbu svoje valne mehanike dokučio je Schrödinger služeći se osnovnom jednačbom valne optike te paralelizmom klasične mehanike i geometrijske optike. Dužina vala, koja u tu jednačbu ulazi, izražena je kinetičkom energijom čestice, njenom masom i Planckovom konstantom, a poklapa se s dužinom materijskog vala, što ga je de Broglie pridružio čestici, ali uz uvjet, da je brzina čestice malena prema brzini svjetlosti c . Razlog je tome, što je Schrödinger pošao od klasične mehanike, koja je granični slučaj relativističke, ako su brzine tjelesa malene prema c .

U atomu ima elektron i potencijalnu energiju, jer na njega djeluje električno polje ostalih dijelova atoma. Ta

Sl. 7 prikazuje ogib elektronskih zraka dobiven njihovim prolazom kroz vrlo tanki listić tinjca (snimili Finch i Wilman). Taj ogib odgovara ogibu svjetlosti na ukrštenim mrežicama ($\rightarrow$ difrakcija), a dobiven je na način Laueovih diagrama kod rentgenskih zraka.

H. Börschu uspjelo je (1940) dobiti s elektronskim zrakama ogib Fresnelova tipa na rubu poluravnine (sl. 8, povećano oko sto puta).

11. »VALNI PAKET« je zamisao E. Schrödingera, u kojoj su zorno spojene obje predočbe o elektronu: tjelešce i val. Materijski valovi elektrona imaju po toj zamisli amplitudu

potencialna energija ulazi u osnovnu jednačbu valne mehanike, jer se na njezin račun može povećati kinetička energija elektrona, dakle smanjiti dužina materijskog vala. U slučaju vodikova atoma potječe to polje od jednoga protona. Za funkciju, koja predočuje val u osnovnoj jednačbi, nalazi se diskretan niz jednoznačnih i neprekidnih rješenja, koja su karakterizirana cijelim brojevima, t. zv. kvantnim brojevima. Svakom od ovih rješenja pripada posve određena energija elektrona. Bohrov kvantni uvjet ovdje je suvišan, jer se diskretan niz stacionarnih stanja nadaje sam od sebe. Iz dobivenih valnih funkcija grade se vjerojatnosti, da se elektron nalazi u nekom dielu prostora, odnosno da priđe iz jednog stacionarnog stanja u drugo (Born, 1927).

13. RELATIVISTIČKA VALNA MEHANIKA je ona, koja zadovoljava načelo relativnosti. — Već je sam Schrödinger pokušao (1926) uskladiti osnovnu jednačbu valne mehanike s teorijom relativnosti. Jednačba, do koje je došao, nije međutim dala dobar rezultat za finu strukturu vodikovih crta, dok je Sommerfeldovo relativističko proširenje Bohrove teorije, kako je prije spomenuto, bilo u tom pogledu u skladu s iskustvom. Odatle je Dirac zaključio, da Schrödingerova relativistička valna jednačba nije osnovna jednačba relativističke valne mehanike. Služeći se četverorednim matricama Dirac je uspio (1928) razcjepiti relativističku Schrödingerovu diferencijalnu jednačbu, koja je drugog reda, u četiri jednačbe prvog reda. U Diracovu prikazu ima zato valna funkcija četiri komponente. Dvije od ovih odnose se na elektrone pozitivne kinetičke energije, a dvije, što se izprva smatralo velikom poteškoćom, na elektrone negativne kinetičke energije.

Promatra li se elektron s pozitivnom kinetičkom energijom, a s takvima se u iskustvu susrećemo, to iz Diracove teorije sledi, da on ima, kad nalazi u elektromagnetskom polju, osim potencialne energije, radi svojeg električkog naboja, još i potencialnu energiju, radi svojega magnetskog momenta. Za veličinu tog momenta teorija daje baš jedan Bohrov magneton. Isto tako sledi iz Diracove teorije, da elektronu pripada i spin u iznosu, što ga zahtieva hipoteza Goudsmita i Uhlenbecka. Tako se ova hipoteza izvodi posve prirodno iz Diracove valne mehanike.

Dirac nije mogao zanemariti rješenja s negativnom kinetičkom energijom elektrona, jer teorija daje konačnu vjerojatnost, da elektron pozitivne energije, kad se nalazi u polju neke atomske jezgre, priđe u stanje negativne energije, a razlika se energije između tih stanja pretvori u foton. Kako bi na taj način domalo svi elektroni iz svijeta nestali, prešavši u »podsviet«, to Dirac uzima, da su stanja negativne energije već zaposjednuta, pa po Paulijevu načelu takav prijelaz nije moguć. Prijelaz jednog elektrona iz podsvieta u svet moguć je u polju atomske jezgre, ako mu jedan energijom dovoljno bogat foton preda svoju energiju.

Nastala šupljina među elektronima negativne energije ima pozitivni električki naboj i energiju, t. j. masu, običnog elektrona. Ta se dakle šupljina vlada poput pozitivno električkog elektrona, pozitrona. Vieć je pozitrona međutim kratak. Čim naide na elektron, koji pripada jednom atomu, poništi se s ovim, i njihova se energija pretvori u energiju fotona.

Poteškoće s elektronima negativne energije i teorija šupljina našle su sjajnu potvrdu u eksperimentalnom otkriću pozitrona (Anderson, 1932) i u pretvorbi fotona u elektron i pozitron (t. zv. dvojci; I. Curie i F. Joliot,

1933). Sl. 9 je snimka supruge Curie-Juliot, koja prikazuje pretvorbu jednog fotona gama-zraka ThC'' u elektron i pozitron. Staze ovih učinjene su vidljivima metodom Wilsonove komore, dok je staza fotona, koji je doletio odozdo, nevidljiva. Budući da je u prostoru komore bilo pobuđeno magnetsko polje, to su staze elektrona i pozitrona svinute na protivne strane.

LIT.: R. A. Millikan, *The Electron*, 1924; P. A. M. Dirac, *Die Prinzipien der Quantenmechanik* (prievod s engleskog), 1930; A. Sommerfeld, *Atombau und Spektrallinien*, I. sv., 1931, II. sv., 1939; M. von Laue, *Materiewellen und ihre Interferenzen*, 1944; Sir J. Jeans, *The New Background of Science*, 1933; H. A. Bauer, *Grundlagen der Atomphysik*, 1938; Grimsehl-Tomaschek, *Lehrbuch der Physik III.*, 1943, V. L.-č.

Elektron, negativni i pozitivni. Gdjekada se naziv elektron upotrebljava ne samo za česticu u katodnim zrakama, atomskoj ljusci i t. d., već i za pozitron (→ čestice elementarne). Prva se čestica onda zove negativni elektron, druga pozitivni elektron. St. H.

Elektron, teški bio je prvobitni naziv za mezontron (→ čestice elementarne). St. H.

Elektroni i kemijska svojstva elemenata. Već se davno naslućivalo, da elektrika sudjeluje u izgradnji materije. Helmholtz je tumačio Faradayeve zakone s pomoću atoma elektrike. U elektrolitima, kod prolaza struje, putuju pozitivni i negativni atomi elektrike zajedno sa svojim tvrnim nosiocima, a takve čestice zovemo ionima. Metalna vodljivost stoji naprotiv u gibanju slobodnih negativnih elementarnih čestica elektrike. Te su negativne čestice po prirodi Stoneya nazvane »elektronima«. Kasnije se došlo do spoznaje, da su elektroni uobče sastavni dio atoma, pa su dobiveni i u slobodnom stanju. Bilo je čudno, što se ne mogu dobiti i atomi pozitivne elektrike u slobodnom stanju, već uvijek vezani uz atome materije. Razlog je u tome, što se slobodni elektroni mogu lako odijeliti od materije, jer dolaze u ovoju atoma. Kada se elektroni odiele od materije, zaostaje isti iznos pozitivne elektrike na ostatku atoma. Zato je dugo bila uzaludno tražena slobodna elementarna čestica pozitivne elektrike — pozitron, dok je nije našao Anderson (1932).

Danas nam je poznat ne samo naboj elementarnih čestica elektrike — elektrona i pozitrona — već i njihova masa, koja je 1840 puta manja od mase najlakšeg atoma, t. j. vodikova atoma.

Atomi kemijskih elemenata nisu homogeno izpunjeni materijom, već se sastoje iz pozitivne jezgre i negativnih elektrona, koji se brzo giblju u okolišu jezgara. Ti elektroni mogu biti bliže ili dalje u »ovoju« oko jezgara. Kako su elektroni lagani, to je gotovo sva masa atoma koncentrirana u jezgri. Pozitivna jezgra i elektroni u ovoju privlače se elektrostatskim silama. Coulombove sile privlačenja i centrifugalna sila elektrona drže se u ravnoteži, pa odatle zaključujemo, da se elektroni moraju oko jezgre gibati po određenim stazama. Elektroni su porazdijeljeni u elektronskom ovoju oko jezgre u pojedinim slojevima ili ljuskama. Tako dolazimo do slike o izgradnji atoma ili do atomskog modela, kako su ga zamislili E. Rutherford (1911) i N. Bohr (1913).

Najjednostavnije je izgrađen vodikov atom, koji ima u jezgri jedan proton, a u ovoju samo jedan elektron (→ atom).

Govorili smo o elektronu kao čestici negativne elektrike. Prema novijem naučavanju atomske fizike elektronima pripisujemo i valnu prirodu. Kao što svjetlo nastupa dualistički, kao valovita pojava i kao gibanje čestica (korpuskularno gibanje), tako pripada i materiji, dakle i elektronima, taj čudni dualizam (De Broglie, 1924). To je otkriće dalo povoda postavljanju kvantne i valne mehanike. W. Heisenberg je uspio s pomoću valne mehanike protumačiti teoriju atomskog ovoja i ukloniti nepodudaranja. Današnja fizika s jednakim pravom upotrebljava valnu i korpuskularnu sliku atoma. Zapravo je slika atoma valne i kvantne mehanike matematička tvorevina, veoma zamršena i gotovo bez ikakve zornosti. Zato se u kemiji radije služimo korpuskularnom slikom atoma. Na taj su nam način razumljiva kemijska svojstva pojedinih elemenata, njihova periodičnost i valjanost ili valencija.

Ako promotrimo periodički sustav elemenata (v.), vidjet ćemo, da se u 1. periodu nalaze samo dva elementa: vodik i helij. U 2. periodu dolazi osam elemenata: litij, berilij, bor, ugljik, dušik, kisik, fluor i neon. Obje se periode završavaju s plemenitim plinom. Helij ima dva elektrona u vanjskoj ljusci, a neon osam. Takve su ljuske stabilne, one su popunjene elektronima. Zato su plemeniti plinovi



Sl. 9.

kemijski indiferentni. Atomi, koji se nalaze prije i poslije plemenitih plinova u periodičkom sustavu, nemaju vanjsku ljusku popunjenu elektronima, zato su izvrgnuti promjenama i mogu kemijski reagirati. O vanjskim dakle elektronima ovise kemijska svojstva elemenata i njihova valencija. Zato takve vanjske elektrone zovemo »elektronima valencije«. Element fluor ima u svojoj vanjskoj ljuski 7 elektrona, nema dakle još jednoga elektrona, da bude podpuna ljuska plemenitog plina. Doista, atom fluora lako prima taj jedan elektron, pa u otopinama dolazi redovno kao negativni jednovaljani ion. Naprotiv, elementi, koji imaju u vanjskoj ljuski samo jedan elektron (to su elementi na početku perioda: vodik i alkalijske kovine), lako otpuštaju taj elektron, pa postaju jednovaljani elektropozitivni ioni. Odatle slijedi, da će se ti elementi osobito rado spajati s halogenim elementima, koji lako primaju jedan elektron, da popune svoju vanjsku ljusku na 8 elektrona. Tako nastaju spojevi fluorovodik (HF), natrijev fluorid (NaF), natrijev klorid (NaCl) i dr. U 3. periodu, koja počinje s natrijem, a završava se s argonom, nalazi se također 8 elemenata. Nakon treće periode postaje sustav nešto zamršeniji, jer u 4. periodu, koja počinje s kalijem, a završava se s plemenitim plinom kriptonom, ima 18 elemenata, a isto ih je toliko i u 5. periodu, koja počinje s rubidijem, a završava se s ksenonom. U 6. periodu nalaze se, počevši od cesija do plemenitog plina radona (emanacije), čak 32 elementa. Posljednja, 7. perioda, nije podpuna, ona se završava s elementom uranom, koji ima redni broj 92.

Razpodjelba elektrona

Element	Redni broj (broj protona)	Broj elektrona		
		1. nutar. ljuska	2. ljuska	3. ljuska
Vodik	1	1	—	—
Helij	2	2	—	—
Litij	3	2	1	—
Berilij	4	2	2	—
Bor	5	2	3	—
Ugljik	6	2	4	—
Dušik	7	2	5	—
Kisik	8	2	6	—
Fluor	9	2	7	—
Neon	10	2	8	—
Natrij	11	2	8	1
Magnezij	12	2	8	2
Aluminij	13	2	8	3
Silicij	14	2	8	4
Fosfor	15	2	8	5
Sumpor	16	2	8	6
Klor	17	2	8	7
Argon	18	2	8	8

i t. d.

Promotrimo li kao primjer atom ugljika, vidjet ćemo, da dolazi na šestom mjestu u periodičkom sustavu elemenata, dakle ima u jezgri 6 protona i 6 elektrona u ovoj. Ovi se elektroni ne nalaze svi na istoj ljuski. Što je atom veći, to više ima protona u jezgri i elektrona u ovoj, koji se gibaju po određenim ljuskama u određenim udaljenostima. Tako na primjer najteži atom urana (redni broj 92) ima 92 protona u jezgri i 92 elektrona, koji kruže porazdieljeni na 7 ljusaka.

Brojevi su elektrona u pojedinim popunjenim ljuskama slijedeći: 2, 8, 18, 32. Oni se pokoravaju jednostavnom matematičkom odnosu: $2 \cdot 1^2 (=2)$, $2 \cdot 2^2 (=8)$, $2 \cdot 3^2 (=18)$, $2 \cdot 4^2 (=32)$. Kad je ljuska popunjena određenim maksimalnim brojem elektrona, dolaze daljnji elektroni na novu vanjsku ljusku. Prva unutarnja ljuska može imati najviše 2 elektrona, slijedeća 8 i t. d., dok vanjska ljuska može imati od 1 do najviše 8 elektrona.

Rekli smo već, da o vanjskim elektronima ovise kemijska svojstva, karakter i valencija atoma. Prema tome će oni elementi, koji imaju u izvanjskoj ljuski isti broj elektrona, biti kemijski veoma slični. Takvi elementi idu u istu skupinu periodičkog sustava.

Kada dva elementa stvaraju međusobno spoj, nastaje promjena u podjeli elektrona u vanjskoj ljuski. Prema teoriji Kossela i Lewisa (1916), koju su izradili na temelju Bohrova atomskog modela, spajaju se kovine i nekovine tako, da njihovi atomi prelaze u ionsko stanje, t. j. elektropozitivni elementi predaju svoje labilno vezane elektrone valencija elektronegativnim metaloidima. Pritom nastaje u vanjskim elektronskim ljuskama poredak kao kod plemenitih plinova. Pozitivni i negativni ioni imaju konfiguraciju plemenitog plina, redovno s 8 elektrona u vanjskoj ljuski. Na pr. kod jednovaljanih alkalijskih kovina nalazi se u vanjskoj ljuski samo jedan elektron valencije, koji se lako odcjepljuje, pa zaostaje jednovaljani pozitivni ion. Poredak je elektrona u ovoj tog iona sada jednak poredku elektrona u predhodnom atomu plemenitog plina. Razlika je samo u jezgri i masi. Ion ima veću masu i pozitivni naboj, uvjetovan od protona jezgre. Zbog većeg centralnog naboja imaju elektronske ljuske u ionu manje polumjere od polumjera plemenitih plinova. Lewis je kasnije (1923) pokušao protumačiti i stvaranje nepolarnih molekula (na pr. Cl_2 , C_2H_6 i t. d.) s pomoću t. zv. zajedničkih elektronskih parova (oktetska teorija). Prema tome bi atomi obćenito nastojali prijeći kod spajanja u stanje, kakvo imaju plemeniti plinovi. Oni naime nemaju labilno vezanih elektrona valencije. Njihovi su atomi omeđeni vrlo stabilnom elektronskom ljuskom.

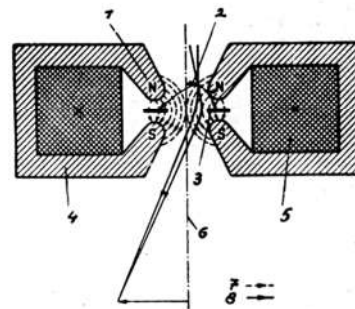
Ovako možemo iz poredka elektrona u ovoj atoma tumačiti svojstva i ponašanje različitih elemenata i nastajanje njihovih spojeva. Zato je elektronska teorija postala važna i u anorganskoj i organskoj kemiji. M. D-é.

Elektronska optika 1. je nauka, koja se bavi dobivanjem slika pomoću gibanja elektrona u električkim i magnetskim poljima. Geometrijska e. o. promatra elektron kao električnu česticu i proučava geometriju njegovih staza u ovim poljima; ona odgovara geometrijskoj optici svjetlosti. Valna e. o. uzima u obzir valnu narav elektrona ($\rightarrow$ Broglie 3) kod stvaranja slike; ona odgovara fizikalnoj optici svjetlosti, posebno ogibu. Za raztvornu moć elektronsko-optičkog uređaja vrijedi Abbeova relacija iz optike svjetlosti: $d_{\min} = \lambda : (n \cdot \sin u)$, gdje je $n \cdot \sin u$ numerička apertura, ako za λ stavimo De Broglievu valnu dužinu. Međutim optičke pogreške najboljih elektronskih leća i uz neobično male numeričke aperture (reda veličine 10^{-2} do 10^{-3}), kakve se upotrebljavaju, još uvijek bitno više utječu na točnost točkastog oslikavanja današnjim elektronskim uređajima nego Abbeova relacija, tako da je raztvorna moć najboljih elektronskih nadmikroskopa znatno izpod teoretske granice određene De Broglievom valnom dužinom i numeričkom aperturom. Zato u elektronskoj optici prevladaju gledišta geometrijske optike, pa se pod e-om o-om obično razumieva geometrijska.

Slično kao u optici svjetlosti slika u običnom smislu rieči nastaje, ako se zrake elektrona, koji izlaze iz jedne točke u ravnini okomitoj na os elektronsko-optičkog sustava, opet sastaju u jednoj točki druge takve ravnine. Da bi slika bila slična predmetu, potrebno je, da sve točke slike leže u meridianskim ravninama pripadnih točaka na predmetu. Kod elektronsko-optičkih sustava s magnetskim

lećama moramo ovaj preduvjet sličnosti proširiti time, da točke slike moraju biti zakrenute za isti kut prema meridianskim ravninama pripadnih točaka predmeta.

Pravi početak geometrijske e-e o-e treba računati od dviju radnja H. Buscha iz g. 1926 i 1927. Busch je dokazao, da aksialno simetričko magnetsko polje jedne kratke uzvojnice djeluje na staze elektrona u svežnju katodnih zraka, malo nagnutih prema osi uz-



Sl. 1. SHEMA MAGNETSKE LEĆE. 1. polni krajevi; 2. predmet; 3. prstenasti zapor; 4. željezni oklop; 5. navoji uzvojnice; 6. optička os leće; 7. magnetske silnice; 8. staze dvaju elektrona iz vrha predmeta

vojnice (paraksialne zrake), kao kratka sabirna leća na svjetlost, te da za sliku, dobivenu takvom magnetskom lećom, vrijedi optička jednačba leće: $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$, gdje je f žarišna da-

ljina magnetske leće, određena njenim magnetskim poljem, dok su a i b daljine predmeta i slike od sredine leće. U sl. 1 shematski je prikazan osni presjek magnetske leće poboljšanog oblika s kratkom žarišnom daljinom. To je upravo tip novijih magnetskih leća, kakve se ugrađuju u cievima elektronskih mikroskopa. Da bi, uzprkos prostranosti navoja uzvojnice (ukršteno izcertani pravokutnici), magnetska leća bila kratka, uzvojnica je zatvorena u željeznom oklopu, osim jednog prstenastog prociepa na unutrašnjem dielu plašta. Horizontalni crni potezi unutar tog prociepa označuju prstenasti zapor za zaustavljanje elektrona razpršenih na objektu. U shemi su također prikazane magnetske silnice i staze elektrona, koji stvaraju sliku predmeta, projicirane na ravninu crtnje. Buschova formula za žarišnu daljinu glasi: $f = \frac{4V^2}{\gamma^2} : \int_{-\infty}^{+\infty} H^2(z) dz$, gdje su v i γ

brzina i specifički naboj elektrona, dok $H(z)$ prikazuje jakost magnetskog polja uzduž osi simetrije z . Preglednija je približna formula, koju su dali Knoll i Ruska: $f \approx C \cdot \frac{V \cdot d}{i^2 N^2}$, gdje su: C jedna konstanta, V napetost ubrzanja elektrona, d srednji promjer uzvojnice, dok je i

jakost struje u uzvojnici s brojem uzvoja N . Prema tome mienjanjem napetosti V i jakosti i možemo žarišnu daljinu magnetske leće mienjati u dosta širokim granicama. Sličnu promjenljivost žarišne daljine imaju i elektrostatske elektronske leće. U tome je bitna razlika prema lećama u optici svjetlosti. Iz formula za f sliedi ujedno, da magnetska leća uvijek djeluje kao sabirna leća. Povećanje je $P = \frac{b}{a}$ kao u

svjetlosnoj optici. U sl. 2 prikazana je magnetska leća nešto starije izvedbe. Visina pri-

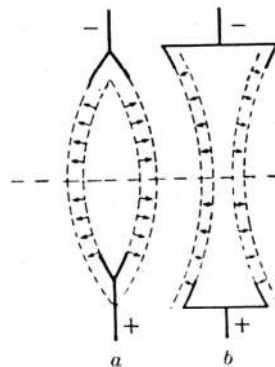
stenastoga zračnog prociepa može se na njoj mienjati; tim se mienja debljina leće.

Djelovanje magnetske leće na zrake elektrona, koje idu ponešto koso prema osi leće, sastoji se i u tome, da se zraka spiralno zakreće, pa je slika zakrenuta prema predmetu. Ovo se zakretanje daje više ili manje kompenzirati sustavom dviju ili triju leća sa suprotnim magnetskim poljima, jer suprotna magnetska polja izvođe suprotna zakretanja, dok su jakosti $\frac{1}{f}$ nezavisne o smjeru polja te se približno zbrajaju.

Potrebno je iztknuti jednu temeljnu razliku između leće u svjetlosnoj optici i leća u e-oj o-i. Svojstva svjetlosne leće osnivaju se na lomu svjetlosti, t. j. na naglom skoku u brzini svjetlosti na graničnim plohama leće. U e-oj o-i ovom je načelu približno odgovarala samo elektrostatska leća s električkim dvoslojem, koju su 1932 izradili Knoll i Ruska, a koja je ubrzala iztisnuta elektrostatskim lećama bez diskontinuiteta. Naprotiv, značajka je magnetskih polja, koja djeluju kao kratka elektronska leća, njihova kontinuirana prostorna promjenljivost, a to je značajka i elektrostatskih polja kod elektrostatskih leća, koje su razvijene poslije dvoslojne leće. Magnetske leće čak uobće ne mienjaju brzine elektrona, koji prolaze kroz njih. Djelovanje spomenutih novijih elektrostatskih leća temelji se na kontinuiranoj promjeni brzine elektrona. U svjetlosnoj bi im optici odgovarala leća izgrađena od nehomogenog

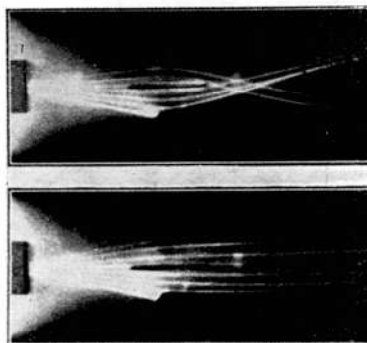
sredstva, kojemu bi indeks loma postepeno rastao prema sredini leće. Takvo je svojstvo u manjoj mjeri ostvareno u tankom površinskom sloju Zeissovih t. zv. T-leća.

Svako rotaciono-simetrično električno polje djeluje kao elektrostatska elektronska leća na elektrone, koji se gibaju pod nevelikom nagibom prema njegovoj osi simetrije. Takvo se polje ostvaruje električkim kondenzatorima s aksialnom simetrijom. Dvoslojna leća bila je kondenzator



Sl. 3. ELEKTROSTATSKE DVO-SLOJNE LEĆE; a) sabirna leća, b) raztresna leća. Strjelice naznačuju smjer polja

jednog za drugim, od kojih je unutrašnji na pr. na negativnoj napetosti, a dva su vanjska na istoj pozitivnoj napetosti, dok su lijevo i desno prostori s jednakim potencijalom, što u svjetlosnoj optici odgovara prostorima konstantnog indeksa loma. Ovakva je leća najprije opisana u jednom francuzkom patentu iz 1928; proučavali su je 1930 Davisson i Calbick, ali je njezina uloga u napredku e-e o-e započela istom 1932, kad su je nezavisno otkrili s jedne strane Knoll i Ruska, s druge strane Brüche i Johannson. Leća s



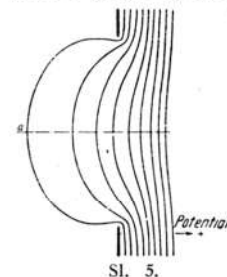
Sl. 4. SKRETANJE ZRAKA ELEKTRONA U ELEKTROSTATSKOJ CILINDRIČKOJ LEĆI

cilindričkim kondenzatorom i pojedinačna leća uvijek djeluju kao sabirna leća.

Dademo li kovnoj ploči s okruglim otvorom ili kovnom prstenu neku električku napetost, dok su jakosti polja nalijevo i nadesno nejednake, već električno polje oko takvog otvora, koje je aksialno simetrično, a nesimetrično prema ravnini ploče ili prstena, djeluje kao elektronska leća. To je zasloni otvor. U sl. 5 prikazane su njegove ekvipotencialne plohe u aksialnom presjeku. Za njegovu žarišnu daljinu vrijedi formula:

$$\frac{4 \varphi_0}{E_1 - E_2}$$

gdje je φ_0 napetost na zaslonskoj ploči, a E_1 i E_2 su jakosti polja na jednoj i na drugoj strani. Zbog izraza u nazivniku zasloni otvor djeluje za $E_1 > E_2$ kao sabirna, za $E_1 < E_2$ kao raztresna leća.

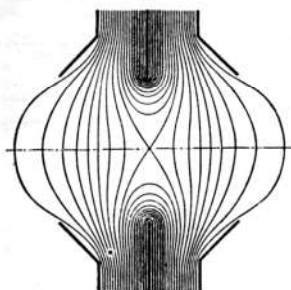


Sl. 5.

Sl. 6 prikazuje aksijalni presjek kroz poboljšani oblik spomenute pojedinačne leće i kroz njezine ekvipotencialne plohe. Zadatak je e-e o-e izračunati staze elektrona u takvu polju ograničujući se na paraksialne staze. Jakost ovakve leće dana je ovom formulom:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{8\sqrt{V}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{(V+U)^3}} \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 dz,$$

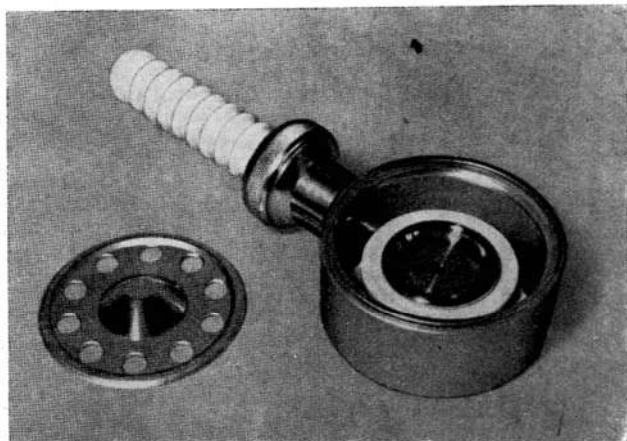
gdje su V napetost, koja određuje brzinu elektrona, a U napetost na osi leće. Sl. 7 prikazuje pojedinačnu leću za visoku napetost u izvedbi AEG-a.



Sl. 6.

Dva koaksijalna zaslonka otvora na nejednakim naponima, smještena u prostoru bez polja, daju treću vrst elektrostatske leće, imerzionu leću, koja je uvijek sabirna. Ovamo pripada u prvom redu imerzioni objektiv kod elektronskog mikroskopa. Kod njega zaslonki otvor, bliži katodi, koja emitira, ili iztraživanom objektu, ne graniči s prostorom bez polja, nego je prema njima na malenoj napetosti. U sl. 8 prikazani su presjek kroz ekvipotencijalne plohe takva objektiva i staze dvaju elektronskih snopova iz katode.

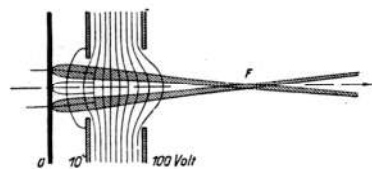
Povisujemo li negativnu napetost negativnog zaslonkog otvora pojedinačne leće, umanjuje se broj elektrona, koji prodiru kroz leću. Tim se postupkom daje ostvariti u e-oj o-i iris-otvor svjetlosne optike. Dobije li



Sl. 7.

povišena negativna napetost toliku vrijednost, da elektroni ne mogu prodrijeti kroz leću, oni se reflektiraju, pa elektrostatska leća djeluje kao elektronsko ogledalo. Ovakvu vladanju leće nema analogije u svjetlosnoj optici.

Kod elektronskih leća susrećemo 5 istih pogrešaka, koje poznajemo kod svjetlosnih leća u monohromatskoj svjetlosti. To su: sferna aberacija, astigmatizam, svodolikost slike, izobličenost i koma. Kod magnetskih leća pridolaze još tri pogreške, kojima je izvor u zakretanju elektronskih staza. To su: anizotropna koma, anizotropni astigmatizam i anizotropno zakretanje slike. Poteškoće kod uklanjanja ovih pogrešaka sile na primjenu vrlo malenih apertura. Ako napetost, koja daje elek-



Sl. 8.

tronima brzinu, koleba za više od 1%, javljaju se nove pogreške, koje odgovaraju hromatskoj aberaciji leća u svjetlosnoj optici.

Ulogu prizme iz svjetlosne optike, t. j. odklon zrake i disperziju, imaju u elektronskoj optici homogeno transversalno električko polje i homogeno transversalno magnetsko polje. Približno tako djeluju odklonske pločice ili odklonske uzvojnice kod Braunove cijevi ili katodnog

oscilografa. Disperzija elektronskih staza sastoji se u tome, da njihov odklon u takvim poljima zavisi o brzini elektrona, pa se elektroni različitih brzina gibaju u različito zakrivljenim stazama. U ovom je odvajanju po brzinama na prvi mah razlika između disperzije u svjetlosnoj optici i disperzije u e-oj o-i. Dodirnu točku uzpostavljamo kvalitativno preko De Broglieove jednačbe; ali ostaje razlika u tom, što elektroni veće brzine, t. j. s kraćom valnom dužinom vala pratioca, dobivaju manje odklone. Prostrana homogena transversalna električka i magnetska polja imaju osim toga i svojstvo fokusiranja, jer takva polja elektrone, koji se gibaju slabo divergentnim početnim smjerovima jednakim brzinama, sjedinjuju u jednoj točki, odnosno u jednom pravcu. U svjetlosnoj optici slično svojstvo imaju prizme s konveksnim plohama.

2. Analogno načinu izražavanja, uvrieženom u primijenjenoj svjetlosnoj optici, upotrebljava se kadkad izraz »elektronska optika« i kao skraćeni tehnički naziv za elektronsko-optički sustav primijenjen u nekom elektronskom aparatu.

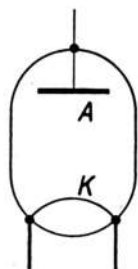
LIT.: H. Busch, Ann. d. Phys. (4) 81, 974, 1926 i Archiv f. Elektrot. 18, 583, 1927; H. Busch-E. Brüche, Elektronenoptik, Leipzig 1937; M. v. Ardenne, Elektronen-Übermikroskopie, Berlin 1940. M. K.

Elektronske cijevi, naprave na načelu strujanja elektrona u visokom vakuumu (t. j. prostoru po mogućnosti potpuno lišenom zraka) s vrlo mnogobrojnim primjenama, osobito u radiotehnici, električkoj reprodukciji zvuka i sl. Redovito se e. c. izvode kao stakleni baloni, u koje se, već prema predviđenoj upotrebi, smjeste dvie, tri ili više naročito građenih i naročito razpoređenih elektroda s priključcima izvedenima kroz stijenke balona u vanjski prostor. Kroz mali cjevasti otvor, t. zv. izsisnu cjevčicu, balon se nakon ugradnje elektroda (upotrebom dobrih zračnih sisaljki uz istodobno tjeranje zaostalih plinova sa staklenih stienki i elektroda primjenom vrućine) nadasve pomno evakuira, na pr. toliko, da od svake milijarde molekula zraka ne zaostane više nego jedna, i nakon toga se izsisna cjevčica zataljivanjem hermetično zatvori. Visoki se vakuum osigurava i prikladnim apsorpcionim sredstvima, t. zv. getterima, stavljenima u samu ciev. Po potrebi se stakleni balon cijevi, zbog toga, da se spriječi skupljanje električkih naboja na njegovim nutarnjim plohama, iznutra pocrni slojem ugljena, a uz to se, zbog zaštite od izvanjskih elektrostatskih polja, izvana »metalizira« slojem kovne (bakrene ili cincane) boje sa zaštitnom prevlakom pokosti. Priključci, koji su izvedeni iz pojedinih elektroda, skupe se u normiranom rasporedu na »podnožju« cijevi iz prikladne tvari, koja električki izolira, a za pojedine se elektrode dovedu do kapice na vrhu cijevi. Mnogo se grade danas i »metalne« e. c. s čeličnim evakuiranim balonima, kroz koje se dakako provodi elektronskih priključaka izvedu električki izolirano.

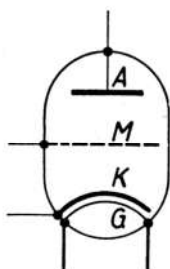
U bitnosti se kod e-ih c-i uvijek radi o strujanju elektrona između dvie elektrode u posve određenom (a ne i obrnutom) smislu, naime od t. zv. *katode* prema t. zv. *anodi*, koja je s obzirom na katodu jako pozitivno električki nabijena; međutim kod većine e-ih c-i smjesti se između katode i anode još jedna ili više elektroda, t. zv. *mrežica* ili *rešetki*, koje kroz svoje otvore više ili manje propuštaju elektrone, što struje iz katode, no svojim negativnim ili pozitivnim električkim potencijalom ujedno slabe ili pojačavaju, odnosno djelomično na sebe svraćaju struju elektrona s katode. Najjednostavnije su e. c. prema tome cijevi bez mrežice, samo s katodom i anodom, t. j. cijevi s dvie elektrode ili *diode*; sliede dalje cijevi s tri elektrode ili *triode* s katodom, jednom mrežicom i anodom, zatim cijevi sa četiri elektrode ili *tetrode* s katodom, dvie mrežice i anodom, pa *pentode*, *heksode*, *heptode* i *oktode* s tri, četiri, pet i šest mrežica, t. j. s pet, šest, sedam i osam elektroda.

Budući da katoda mora biti izvor elektrona, ona se gradi tako i kod pogona se cijevi podržava u takvu stanju, da doista daje iz sebe elektrone. U tu se svrhu (služeći se pojavom izbacivanja ili emisije elektrona iz vrućih vodiča u vakuumu) katodi može dati oblik tanke žice s priključcima s oba kraja, tako da se ona može jače ili slabije žariti *direktno* električkom »strujom grijanja« iz posebnoga pomoćnog izvora struje (na pr. »baterije grijanja«, koja se pozitivnim i negativnim polom priključi na katodne priključke). No katodni se sustav može izvesti i s grijačem odijeljenim od katode, na pr. s grijačem u obliku spirali-

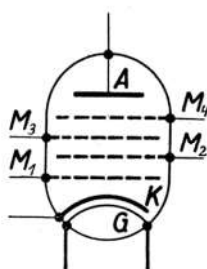
zirane volframove žice, preko kojeg se izolirano natakne niklena cjevčica, prevučena izvana djelotvornom oksidnom pastom, koja emitira elektrone. Tada se strujom grijanja (na pr. iz »transformatora grijanja« priključena na mrežu izmjenične struje) neposredno žari samo grijač, a katodi, u ovom slučaju tek *indirektno* grijanoj grijačem, ostaje samo još funkcija elektrode, tako da joj postane dovoljan jedan izvanjski priključak. Prema tomu ima »direktno grijanih« cjevi s dva priključka do oba kraja katode i »indirektno grijanih« s tri priključka katodnoga sustava, dva do grijača i jednim do katode (v. u sl. 1 simbol direktno grijane diode s katodom K i anodom A , sa svega 3 priključka, te u sl. 2 simbol indirektno grijane triode s grijačem G , katodom K , mrežicom M i anodom A , s ukupno 5 priključaka, napokon u sl. 3 shemu indirektno grijane heksode s mrežicama M_1 do M_4 i svega 8 priključaka).



Sl. 1.

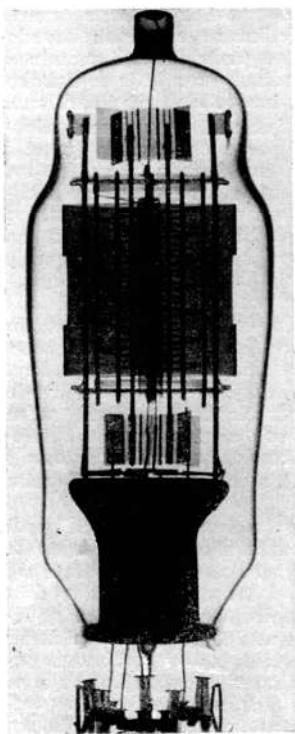


Sl. 2.



Sl. 3.

Praktički se kao material katoda, koji emitira elektrone, uzimao najprije volfram, koji je trebalo usijavati do bijelog žara, zatim volfram s primjesom torija, koji dovoljno emitira već kod žutoga žara, dok najmanje energije struje grijanja troše suvremene katode s oksidima barija i sl. na prikladnom nosiocu, koje je dosta tek tamno crveno žariti. Pored ovih potonjih katoda, običajnih kod malih *prijamnih cjevi* (za aparate za primanje radija, za električka pojačala zvuka i dr.), susreću se međutim još uvijek u posebnim slučajevima i katode iz volframa ili iz toriranog volframa (kod velikih *emisionih cjevi* postaju za davanje radiosignala i kod visokonaponskih *ventila* za rentgenske uređaje za visoki istosmjerni napon).



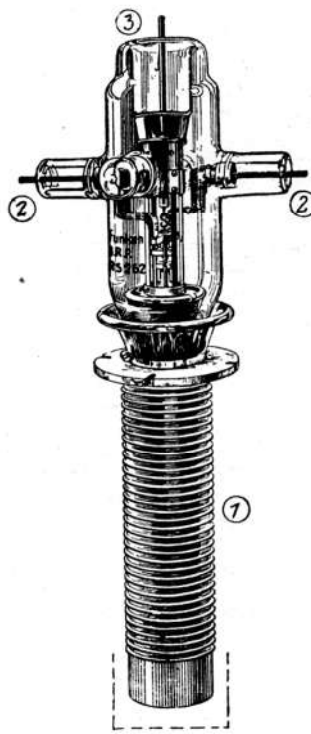
Sl. 4.

Katodu okružuje kod trioda mrežica, a ovu opet anoda; kod tetroda do oktoda oko katodi najbliže »prve« mrežice ovija se »druga« i tako redom, a sve okružuje anoda. Mrežice su obično zavojnice od molibdenske žice s gušćim ili rjeđim zavojima, a anode su iz masivnog lima ili gusto tkane mreže od nikla, željeza, tantala i dr. Pogled kroz unutrašnjost jedne prijamne cjevi (pentode) daje rentgenska snimka reproducirana u sl. 4; unutar staklenog balona, kome je dolje i izsisna cjevčica, razabiru se elektrode s pet priključaka (dva od grijača, jedan zajednički od katode i treće mrežice, te po jedan od druge mrežice i anode), izvedenih na podnožje, i s jednim priključkom (od prve mrežice) izvedenim na kapicu cjevi.

Kod pogona potrebni su mrežicama, osim signala, koji se puštaju, da djeluju na određenu mrežicu ili mrežice, stalni negativni ili pozitivni predhodni potencijali u odnosu prema katodi, t. zv. *mrežni prednaponi*, a anode pogotovo trebaju, da bi ostale jako pozitivno nabijene

prema katodi unatoč tome, što pristižu negativni naboji u obliku elektrona s katode, određene predhodne pozitivne napone, t. zv. *anodne napone*. Zato se kod upotrebe e-ih c-i moraju obćenito predvidjeti, osim izvora struje grijanja, koji e-m c-ima daje potrebiti »napon grijanja«, još i izvori spomenutih napona. Kod već zastarjelog baterijskog pogona uzimaju se osim »baterije grijanja« u obliku akumulatora još »baterija mrežnih prednapona« i »anodna baterija«; obje se potonje obično sastoje iz malih suhih elemenata i kombiniraju u jedno. Kod suvremenog se pogona iz mreže izmjenične struje dobivaju sva tri izvora transformiranjem napona mreže s jedne strane na napon grijanja, koji se kod indirektno grijanih cjevi uvijek, a kod direktno grijanih u posebnim slučajevima može bez daljega preuđavanja upotrebiti, a s druge na napon, koji dalje »izpravljen« na prikladan način (na pr. diodama, kako će se odmah razložiti) i »izgladen« (upotrebom svitaka i kondenzatora) postane istosmjerni i toliko stalan, da može služiti za prednapone mrežicama i anodama. Kod malih aparatura, na pr. prijamnika radija, ovakve naprave za pogon e-ih c-i izmjeničnom strujom nisu skupe i ne uzimaju mnogo struje iz električke mreže, dok je dakako baš obrnuto kod jakih emisionih postaja radija, gdje treba njihovim posredstvom privesti emisionim cjevima velike električke snage i k tomu pri vrlo visokim anodnim i mrežnim naponima.

Treba još primietiti, da se u e-ih c-ima javljaju gubici energije i s njima vezana ugrijavanje elektroda. Poimence se od ukupne električke snage, crpene iz izvora anodne struje, jedan dio bezkoristno troši u vezi s bombardiranjem anoda brzim elektronima, koji su dojurili s katode, pa anode postanu u pogonu kadkad vrlo vruće. A vruće, nego odgovara crvenom žaru, anode ne smiju postati. Zato se cjevima s velikim ugrijavanjem anoda — poimence diodama za izpravljanje izmjenične struje, konačnim cjevima u pojačalima i malim emisionim cjevima — anode pocrnjuju. To znatno povećava obteretivost cjevi, jer olakšava izsijavanje topline s anode. A kod velikih se emisionih cjevi anode čak izvedu vakuumski sigurno pritaljene na staklo, tako da su otkrivene prema vani, pa se mogu »umjetno hladiti« posebnim uređajima s kruženjem hladne vode. Tako trioda za 25 kilovata snage na sl. 5, u naravi gotovo metar visoka, ima razhladnim rebrima snabdjevenu anodu 1, oko koje se kod upotrebe pričvrsti posuda s cirkulacijom vode (njezin donji dio je u slici crtkano markiran); razabiru se još oba katodna priključka 2 i mrežni priključak 3.



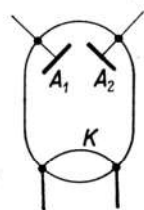
Sl. 5.

Za teoriju i primjenu e-ih c-i bit će korisno najprije razmotriti *diodu* (sl. 1). Njihova se upotreba nadeja sama iz okolnosti, da u njima struje elektroni, dakle negativni naboji, samo u smislu katoda-anoda. Dioda mogu dakle, s obzirom na to, da je običajno smjerom električne struje nazivati smjer, kojim bi se gibali pozitivni naboji, propuštati samo struje u smislu anoda-katoda, pa prema tomu mogu služiti kao »izpravljači« izmjeničnih struja u istosmjerne. Za takvu su službu diode u mnogim prilikama prikladne. Kraj male tromosti elektrona, koju možemo zanemariti, one jednako dobro izpravljaaju »nizkofrekventne« struje, t. j. struje iz razsvjetne mreže i uobće struje »tonskih« frekvencija, kao i »visokofrekventne« signale »valova nosilaca« radija s često mnogo tisuća i više puta bržim titrajima. Kod dioda u prvoj upotrebi

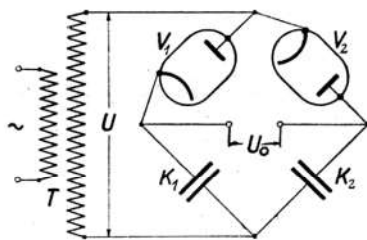
određenije se govori o *izpravljačkim diodama* ili visokovakuumskim *izpravljačicama* ili *kenotronima*, a u rentgenskoj tehnici, gdje se radi o propuštanju u jednom i zaustavljanju u protivnom smislu struja kod napose visokih napona, i o *visokonaponskim ventilima*. Naprotiv se u slučaju izpravljanja »moduliranih« (t. j. u ritmu titraja prenašanih zvukova jačanih i slabljenih) visokofrekventnih signala radija govori radije o »detekciji«, i pri tomu upotrebljavane diode zovu se поближе *detektorskim diodama*.

U pogledu izpravljačica vrijedno je primietiti, da sama jedna izpravljačica može, dakako, izpravljati tek »poluvalno«, t. j. propuštati na pr. pozitivne i zaustavljati negativne polovice titraja izmjenične struje; no upotrebom dviju izpravljačica, priključenih na transformator s dva sekundarna namotaja, i to jednim glavnim, koji treba da daje izpravljanu struju i mora imati odvojak u sredini, i drugim pomoćnim, koji odmah daje struju grijanja objema izpravljačicama, moguće je izpravljati i »punovalno«, t. j. tako, da se upotrebe obje polovice vala izmjenične struje. Po ovom načelu rade već spomenute naprave za priključak prijemnih radio-aparata na izmjeničnu struju, pri čemu se obje izpravljačice obično spoje po sl. 6 u jednu dvostruku s dvije anode A_1 i A_2 i zajedničkom katodom K . Upotrebljeni mrežni transformator obično se onda snabdije na sekundarnoj strani i jednim daljim, dakle trećim namotajem, iz kojega dobivaju struju grijanja i različite cjevi same prijemne aparature u užem smislu. Mrežni prednaponi dobivaju se međutim kadkad i bez naročitih izvora struje po načelu gubitka napona u odporima protjecanima strujom, (»automatski prednaponi«).

Punovalno izpravljanje izmjeničnih struja vrši se kadkad također spojevima sa četiri izpravljačice kod jednofaznog priključka, a sa šest kod trofaznog priključka; u potonjem je slučaju izpravljena struja već i bez gladenja prilično stalna. Posebno se ovako, upotrebljavajući četiri ili šest visokonaponskih ventila, mogu proizvoditi visoki istosmjerni naponi za pogon rentgenskih cjevi, iako se tu više upotrebljavaju na pr. spojevi po sl. 7 sa sama dva ventila V_1 i V_2 , no kombinirana i s dva kondenzatora K_1 i K_2 . Kod spoja po sl. 7 izlazi istosmjerni napon U_0 između 1 i 2 priključene rentgenske cjevi gotovo dvaput tolik kao »maksimalni« ili »tjemeni« iznos U_m , dakle malone tripot tolik kao »efektivni« iznos U izmjeničnoga napona proizvedenoga sekundarno visokonaponskim transformatorom T , koji se primarno priključi na električku mrežu (vriedi relacija $U_m = 1,414 \cdot U$). Povišenje napona postizava se



Sl. 6.



Sl. 7.

spojem po sl. 7 zbog toga, što se kondenzatori K_1 i K_2 preko ventila V_1 i V_2 naizmjenice nabijaju iz transformatora T i prikladno izbijaju kroz rentgensku cjev; uz transformator T za sekundarno 40 hiljada volta postizavaju se tako na rentgenskoj cjevi izpravljani naponi znatno iznad 100 hiljada volta.

Ugrijavanja anoda kod izpravljačica obično su znatna i samo su ekvivalent električke snage $U_a \cdot I_a$, koja se troši u samim izpravljačicama s toga razloga, što prolaz određene anodne struje I_a uvjetuje određen »gubitak napona« U_a u izpravljačici. U prvo je vrijeme bilo nejasno, zašto već kod povoljno malenih pozitivnih napona anode prema katodi ne struje elektroni, potrebni, da se podržava ma koja anodna struja sve do najviše uz određenu užarenost katode moguće struje, t. zv. *struje zasićenosti*, kod koje bi se trošili svi elektroni, koje izbacuje katoda kod dane temperature, odnosno dane struje grijanja. Bliža razmatranja pokazala su, da iznos anodne struje I_a najprije raste s povećavanjem anodnoga napona diode U_a po posve

određenom zakonu neke vrste parabole, točnije: parabole reda 1,5, dakle po »formuli prostornoga naboja«:

$$I_a = K \cdot U_a^{1,5}$$

gdje je K konstanta određena geometrijskim odnosima katode i anode. Tomu je pojavu uzrok djelovanje naboja onih elektrona, koji se u danom momentu nađu u prostoru između katode i anode pa odbijaju one, koji bi iza njih išli prema anodi; istom se visokim pozitivnim anodnim naponom toliko svlada spomenuto djelovanje, da I_a dostigne iznos struje zasićenosti I_s te ostaje na tom iznosu kod nepromijenjene temperature katode, ma koliko dalje rastao anodni napon. Grafički predočeno krivulja s ordinatama I_a i abscisama U_a , t. zv. I_a - U_a -krivulja, uzdiže se najprije po zakonu parabole reda 1,5, da u nekoj izvjestnoj visini I_s , ovisno kod dane cjevi samo o struji grijanja, postane horizontalna. Kod jače struje grijanja postane dakako I_s veće, pa krivulja postaje u većoj visini vodoravna. Za iznos struje zasićenosti I_s vriedi izraz:

$$I_s = A \cdot e^{-b/T} \cdot T^2 \cdot S$$

gdje S znači površinu i T stupnjeve absolutne skale temperature (za 273 povišene stupnjeve Celzijeve skale) užarene katode, e bazu prirodnih logaritama 2,718..., te A i b konstante. Uz I_s u amperima i S u cm^2 je $A=60,2$, dok b varira s djelotvornom tvari katode, pa je na pr. za volfram $b=52600$. Iz ovog izraza lako je vidjeti, da već neznatno jača grijanja katode daju znatna povišenja struje zasićenosti.

Uz detektorske diode spominjemo još, da su se diode za svrhe detekcije upotrebljavale, dok još nije bilo cjevi s mrežicama, iako su im tu bili jaki takmaci, doduše manje pouzdani, ali zato jednostavniji i osjetljiviji »kristalni detektori« (→ detektor). Kasnije su se za detekciju cjevima počele s osobitim uspjehom upotrebljavati, i to na različite načine, triode, dok se danas kod prijama radiofonije u moderniziranom obliku pored trioda u funkciji detektora opet dosta cjevi i detektorske diode. Poimence se diode upotrebljavaju u superheterodnim prijamnicima (»superima«) za svrhe prve i druge detekcije i za svrhe automatske regulacije jakosti reprodukcije zvuka na iznos, neovisan o variranju jakosti primanih radiosignala. Kod supera su, protivno nego kod običnih prijamnika sa samo jednom detekcijom, potrebne dvie detekcije, jer se kod ovih aparata primanim visokofrekventnim signalima radia kratkih ili srednjih dužina vala, predhodno pojačanim ili nepojačanim, primiešaju titraji ponešto druge dužine vala proizvedeni posebnim oscilatorskim spojevima. Iz dobivene se smjese prvom detekcijom dobivaju signali transponirani na određenu znatno smanjenu visoku frekvenciju, t. zv. međufrekventni signali, koji se lako pojačavaju; pojačani pak međufrekventni signali tek ponovnom detekcijom postaju signali u ritmu bezžično prenašanih zvukova, dakle tonfrekventni signali, koji se opet mogu kao takvi dalje pojačavati, prije nego se puste da djeluju na zvučnik.

Prelazeći na cjevi s mrežicama svrnut ćemo pažnju naročito na njihove najosnovnije i po načinu funkcioniranja najpreglednije reprezentante: *triode*.

Budući da se mrežici M (sl. 2) može dati povoljni prednapon U_g , očito se ne samo anodom, nego i mrežicom daje utjecati na struju elektrona s katode. Posebno kod negativne, i zbog toga za elektrone odbojne mrežice elektroni će teško prolaziti kroz otvore mrežice prema pozitivnoj anodi, pa će negativni prednaponi mrežice doći do izražaja u obliku smanjenja anodne struje prema onoj uz mrežicu na prednaponu $U_g=0$. Kako je pak mrežica znatno bliže katodi nego anoda, čak svaki volt mrežnog napona dolazi do izražaja kao nekoliko volta anodnoga, na pr. 1 V, primijenjen na mrežicu, kao 25 V primijenjenih na anodu, u kome se slučaju veli, da cjev ima *faktor pojačavanja* $m=25$ ili *prohvat* $D=1/m=1/25=0,04$, odnosno u postotcima $D=4\%$. Drugim riječima: kod cjevi sa $m=25$ ili $D=0,04$ račun bi dao istu anodnu struju, na pr. 0,006 A ili 6 mA (6 miliampera), uz primijenjenih +100 V na anodi i 0 V na mrežici kao i uz primijenjenih +150 V na anodi i -2 V na mrežici, odnosno 200 ili 250 V na anodi kraj -4 ili -6 V na mrežici.

Budući da se tu radi o tri veličine triode u međusobnim odnosima, moguće je predočiti ovisnosti anodne struje I_a o mrežnom prednaponu U_g i anodnom U_a tek rojem

krivulja, bilo tako, da se nacrtaju I_a-U_g -krivulje uz iznose U_a , iste za svaku krivulju, bilo opet tako, da se nacrtaju I_a-U_a -krivulje za pojedine U_g . Roj krivulja prvog tipa predložen je na sl. 8.

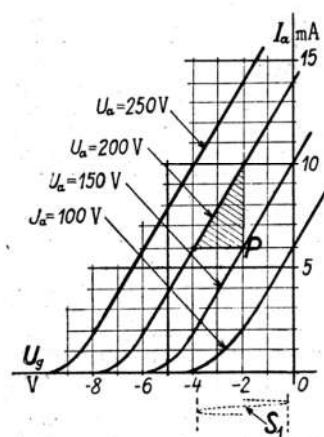
Kako se vidi, ista struja 6 mA može se odčitati na krivulji s $U_a = 100 \text{ V}$ kod $U_g = 0 \text{ V}$ kao i na krivuljama s $U_a = 150, 200$ i 250 V kod $U_g = -2, -4$ i -6 V , što s obzirom na malo prije spomenuti primjer o m i $D=1/m$ znači, da se krivulje na sl. 8 odnose na ciev s $m = 25$ ih $D = 0,04$.

Međutim još se dvie dragocjene okolnosti dadu pročitati iz »karakteristika« u sl. 8. Da izlaganja budu jednostavnija, ograničimo se samo na ono radno područje, gdje karakteristike na sl. 8 smijemo smatrati pravocrtnima, paralelnima i jednoliko razmaknutima. U tom slučaju vidimo ponajprije, da se karakteristike uzdižu s određenim priklonom prema osi abscisa, t. j. s određenim omjerom prirasta struje I_a prema pripadnom prirastu napona U_g , pa se za promatrano područje taj omjer pridaje samoj triodi pod imenom *strmine* S . Tako se iz sl. 8 razabira, da na karakteristici s anodnim naponom 200 V porastu anodne struje od 6 mA na 10 mA , t. j. za 4 mA ili $0,004 \text{ A}$, odgovara porast mrežnog prednapona od -4 V na -2 V , t. j. za 2 V , tako da bi strmina bila: $S = 0,004/2 = 0,002$ »ampera po voltu« ($= 2$ »miliampera po voltu«).

No još se i to razabira, da bi trioda s karakteristikama po sl. 8 uz stalan mrežni prednapon na pr. -2 V propuštala kod anodnih napona 200 V i 150 V anodne struje 10 mA , odnosno 6 mA , t. j. da bi na 50 V prirasta anodnog napona reagirala sa 4 mA ili $0,004 \text{ A}$ prirasta anodne struje. Međutim uobče je prirodno omjer prirasta napona prema pripadnom prirastu struje (pomišljajući na temeljni Ohmov zakon o električkim strujama) nazvati odporom, pa je običaj posebno promatrati takav omjer, pripisujući ga cievi, zvati *unutarnjim otporom* R_0 triode; u danom slučaju bilo bi: $R_0 = 50/0,004 = 12500 \text{ oma}$.

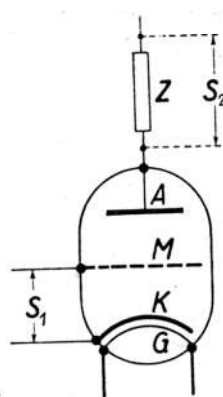
Lako se uvjeriti, da vrijedi jednostavna formula: $D \cdot S \cdot R_0 = 0,04 \cdot 0,002 \cdot 12500 = 1$; čak ovakva relacija između triju karakterističnih veličina triode vrijedi i obćenito na svakom dielku područja karakteristika, makar se spomene veličine i mienjale od dielka do dielka. Prema tomu se kod poznate dvie od triju veličine D , S i R_0 treća može računski naći.

Na podlozi karakteristika lako je moguće razabrati najosnovniju funkciju triode, njezinu upotrebu kao pojačalo signala. Zbog zanemarive tromosti elektrona pojačavani signali mogu biti i vrlo brzo promjenljivi, tako da se triodama mogu pojačavati signali radija: a) prije detekcije, dok su još »visokofrekventni« (posebno kod superheterodina također i nakon prve detekcije, ali prije druge detekcije, dok su još »medufrekventni«), kao i b) nakon detekcije (kod superheterodina nakon druge detekcije), kad su već tonfrekventni; u slučajevima a) govori se o *visokofrekventnom* (i posebno o »medufrekventnom«), a u slučajevima b) o *nizkofrekventnom* pojačavanju; ovo potonje primjenjuje se i kod električkih naprava za reprodukciju zvuka.



Sl. 8.

I visokofrekventna kao i nizkofrekventna pojačavanja mogu se praktički vršiti različitim postupcima, pri čemu se u posebnim slučajevima triode zamjenjuju za pojedine svrhe prikladnijim cievima s više mrežica, na pr. tetrodama ili pentodama. No osnovno načelo ostaje kod svih pojačavanja cievima uvijek isto i može se razabrati iz obćenite sheme pojačavanja triodom u sl. 9. Kako se vidi, u anodni strujni krug triode s predpostavljenim karakteristikama po sl. 8 uključen je neki potrošač struje, t. zv. »anodni otpor« Z , koji će tek u najjednostavnijem



Sl. 9.

slučaju biti obični omski otpor od R oma, dok će redovito biti neki »složeni otpor« za izmjenične struje (na pr. bit će to zavojnica u spoju s kondenzatorom, odnosno zavojnica sama za sebe ili transformator) prilagođen frekvenciji pojačavanih signala. Ako se sad pojačavani izmjenični signal S_1 , koji je crtkano naznačen na sl. 8, primieni između mrežice i katode cievi iz sl. 9, sa U_a i U_g , prije toga prikladno udešenima — na pr. po sl. 8 sa $U_a = 150 \text{ V}$ i $U_g = -2 \text{ V}$, na točku P karakteristike 150 V s abscisom -2 V — superponirat će se vremenski promjenljivi iznosi napona signala S_1 stalnom naponu U_g , pa će se korespondentno signalu kolebati ukupni napon mrežice,

a s njim i anodna struja cievi. Posebno bi se kod izmjeničnog napona S_1 iz sl. 8 s amplitudom $1,8 \text{ V}$, dakle s maksimumom $+1,8 \text{ V}$ i minimumom $-1,8 \text{ V}$, napon mrežice mienjao između $-2 + 1,8$ volta i $-2 - 1,8$ volta, dakle između $-0,2 \text{ V}$ i $-3,8 \text{ V}$, što bi izazvalo posve izvjestna mienjanja anodne struje. No anodna struja kod spoja po sl. 9 teče i kroz anodni otpor Z , pa mienjanja anodne struje moraju doći do izražaja u mienjanjima napona između krajeva otpora Z , koja će kod odabranoga radnog područja, kao na sl. 8, i kod prikladnog Z biti vjerna, no u isti čas i mnogostruko uvećana reprodukcija S_2 signala S_1 primijenjena na mrežicu. Promatranim cievim spojem »pojačan« je dakle prvobitni signal, i pojačani se signal može, prikladnim načinom odvojen s anodnoga otpora, podvrgnuti nakon ovakva »jednostepenog« pojačavanja ponovnom pojačavanju idućim »stepenom« pojačavanja, i opet po sl. 9, i tako dalje. Postignuto »pojačanje«, t. j. omjer p amplituda signala S_2 i S_1 zavisi o upotrebljenoj cievi i odabranom anodnom otporu, različitim kod različitih tipova pojačavanja. Osobito je lako p izračunati uz predpostavku omskog otpora iznosa R oma kao anodnog otpora; ako su m i R_0 faktor pojačavanja i unutarnji otpor upotrebljene triode, vrijedi za p jednostavna formula: $p = m \cdot R / (R_0 + R)$, po kojoj bi se kod ovakva »odpornog pojačavanja« na pr. uz ciev sa $m = 20$ i $R_0 = 10.000 \text{ oma}$, a kod $R = 30.000 \text{ oma}$, postiglo kod jednostepenoga pojačavanja »pojačanje« $p = 15$, kod dvostepenog pojačanje $p^2 = 15 \cdot 15 = 225$, i tako dalje. Treba još reći, da osim opisanoga najjednostavnijeg tipa pojačavanja i pripadnih t. zv. *naponskih* pojačala ili *A-pojačala* (s izkorišćenjem samo pravocrtnih dielova karakteristika i istodobnim ograničenjem na područja negativnih mrežnih napona za cijelo vrijeme djelovanja pojačavanog signala) postoje još dva načelno drugačija i znatno zamršenija tipa pojačavanja, i po tomu još t. zv. *B-pojačala* i *C-pojačala*. Treba li na pr. iz konačnog stepena nizkofrekventnog pojačavanja izvući mnogo snage za pogon ovećeg zvučnika, uzet će se koje od B-pojačala sa znatno više negativnim mrežnim prednaponima nego kod A-pojačala, a time izazvanim »izobličenjima« pojačavanog zvuka predusrest će se upotrebom dviju konačnih cievi »u protudjelovanju« (push-pull). U visokofrekventnom području, kod pojačavanja titraja u velikim emisionim postajama, uz B-pojačala ima i C-pojačala s još jače negativnim mrežnim prednaponima. Međutim ono, što je rečeno o A-pojačalima, dovoljno načelno osvjetljuje uobče mogućnosti pojačavanja triodama.

Od trioda u funkciji pojačala samo je jedan korak do njihove primjene kao *oscilatora*, t. j. proizvođača visokofrekventnih i nizkofrekventnih struja. Pomislimo, da se jedan dio energije mrežnim signalom S_1 izazvanog variranja anodne struje sa anodnog otpora Z triode prenese natrag na mrežni krug t. zv. *reakcijom*, t. j. prikladnim induktivnim, kapacitivnim ili sličnim djelovanjem između anodnog i mrežnog kruga, te da se tim dobije na mrežici baš tolik i takva predznaka signal S_1 , kojega je podržavanje upravo potrebno za izazivanje onih variranja struje u Z . U tom slučaju ciev sama sebi proizvodi signal S_1 pa

i ne treba za podržavanje spomenutih variranja nikakva vanjskog signala: cjev se sama »uzbudi« na titranja, koja se podržavaju na račun energije crpene iz izvora anodne struje.

Vidjeli smo triode kao pojačala različitih tipova i kao oscilatore, a mogli bismo ih opisati i kao *modulatore* u službi moduliranja visokofrekventnih titraja zvučnim frekvencijama kod bežične telefonije, kao što smo ih već prije spomenuli, pored dioda, kao *detektore* (ima čak dva tipa detekcije triodama: detekcija »audionima« i detekcija »anodnim detektorima«). Načelno se pak od trioda u njihovim glavnim funkcijama ne razlikuju ni cjevi s više mrežica, koje tek, pored »upravljačke« mrežice (kadkad i dvije takve) s funkcijom upravljanja anodnom strujom s pomoću signala na mrežici kao i kod trioda, imaju još mrežice s naročitim zadacima, t. zv. »zaslonske« i »zahvatne« mrežice, te po tomu u mnogim prilikama daju bolje rezultate. Kraj ovako raznovrstnih funkcija pronalazak i postepeni razvoj e-ih c-i, razumijevajući tu i ispravljačice, prirodno je izazvao revolucionarni napredak ciljnih područja elektrotehnike, u prvom redu radiotehnike. U radiotehnici suvremene bežične postaje za davanje i nisu drugo nego uređaji, gdje se samouzbuđenim oscilatorskim cjevima proizvedeni visokofrekventni titraji, po potrebi modulirani mikrofonskim strujama posredstvom modulatorskih cjevi, postepeno pojačavaju sve većim i većim cjevima u stepenima sve veće snage; tako se konačno antenskom krugu dobivaju jake visokofrekventne struje, kojih energiju antena isijava u prostor u obliku valova radija. Slično e. c. danas podpuno vladaju i na prijamnoj strani, pa će recimo osjetljiv suvremeni super imati na pr. najprije cjev za visokofrekventno pojačavanje antenom uhvaćenih bežičnih signala, zatim oscilatorsku cjev pa cjev za »mješanje« primanih signala s oscilatorskima u međufrekventne (prvi detektor), onda cjevi za međufrekventno pojačavanje te cjev za konačnu detekciju (drugi detektor) kao i one za nizkofrekventno pojačavanje; k tomu još treba pored cjevi za posebne svrhe (na pr. indikaciju točnog udešavanja na primani val) dodati dvostruku ispravljačicu naprave za pogon ciele aparature izmjeničnom strujom. Kao cjev za mješanje mogla bi se na pr. uzeti heksoda po sl. 3 sa M_1 i M_3 kao upravljačkim i M_2 i M_4 kao zaslonskim mrežicama: na M_1 bi se primetili primani, a na M_3 oscilatorski titraji. No oktodom bi se mogla nadomjestiti u isti mah i cjev za mješanje i oscilatorska cjev, kao što se uobće pojedinim posebnim ili kombiniranim cjevima pridaje više zadaća. Važne su još primjene e-ih c-i: pojačavanje zvuka u telefoniji i električkoj reprodukciji zvuka (električki gramofoni, naprave sa zvučnim prienosima i sl.) pa izpravljanja izmjeničnih struja u visokonaponskim napravama. Mnogo se e. c. primjenjuju i u električkoj mjernoj tehnici.

S poviestnoga gledišta primietimo, da je pojava izbacivanja elektrona iz usijanih vodiča iztraživao među prvima Richardson, a probleme utjecaja prostornih naboja i potrebu najviših vakuumu u e-m c-a izricao je uz ostale Langmuir. Za uvođenje mrežica u e. c. zaslužan je osobito Lee de Forest, za misao reakcije Meissner.

LIT.: H. Barkhausen, *Elektronenröhren*, 3. i 4. izd., Leipzig 1932—38; F. Vilbig, *Lehrbuch d. Hochfrequenztechnik*, 3. izd., Leipzig 1941; J. Lončar, *Konstrukcije radiostanica*, 2. izd., Zagreb 1931. J. L.

Elektronski mikroskop je elektronsko-optički uređaj, kojim se pomoću elektronskih zraka dobiva povećana slika mikroskopskog predmeta (→ elektronska optika 1). Ako povećanje nadilazi najveća povećanja, koja se dađu postići svjetlostnim mikroskopom, e. m. se naziva nadmikroskopom. Nastojanje, da se njim dobiju što bolje slike u što većem povećanju, bilo je izravnim povodom brzom razvoju elektronske optike.

Mogućnost dobivanja slike pomoću elektrona u gibanju osnovana je dualnom prirodom elektrona. Njegova priroda električke korpuskule određuje pravocrtno gibanje rojeva elektrona u prostorima bez električkog i bez magnetskog polja kao i geometriju njihovih staza u takvim poljima. Valna priroda elektrona u gibanju određuje njihovu sposobnost ogiba i stvaranja optičkih slika. Stalnost valne dužine u elektronskoj je optici još većma preduvjetom za monohromatičnost ogiba i razgovjetnost slike nego u svjetlosnoj optici. Stalnost valne dužine elektronskog vala pratioca uvjetovana je stalnošću brzine

elektrona, a ova je određena stalnošću električke napetosti. Na taj je način temeljni uvjet, koji ima izpuniti uređaj e-g m-a, razpolaganje s izvanredno stalnim izvorom visoke jednake napetosti. U geometrijskoj elektronskoj optici ovo dolazi do izražaja u formulama za žarišnu daljinu magnetskih i elektrostatskih leća. Snošljivi obseg kolebanja napetosti ravna se po trajanju ekspozicije snimke, jer je kod dužih ekspozicija veća vjerojatnost, da će se u visini napetosti na mikroskopu odraziti i spora kolebanja napetosti gradske mreže. Izkuštvom je utvrđeno, da do trajanja ekspozicije 10^8 kolebanja visoke jednake napetosti smiju iznositi najviše 0,1% kolebanja gradske napetosti, a iznad 10^8 imaju se sniziti na manje od 0,001%. Kod magnetskih leća pridolazi i zavisnost jakosti leće o kvadratu jakosti struje u uzvojnici, pa mora biti osigurano i strogo održavanje struje na stalnoj jakosti.

Prema tome e. m. sastoji se od visoko evakuirane cjevi, u kojoj mlaz elektrona dobiva jednakom visokom napetošću između anode i katode veliku jednaku brzinu. Različite vrste e-og m-a razlikuju se elektronsko-optičkim sustavom primijenjenim između anode i mjesta, gdje nastaje slika. Vakuum ima biti viši od $1 \cdot 10^{-4}$ mm Hg; inače se javljaju smetnje od prostornog naboja nastalog ionizacijom ostataka plina.

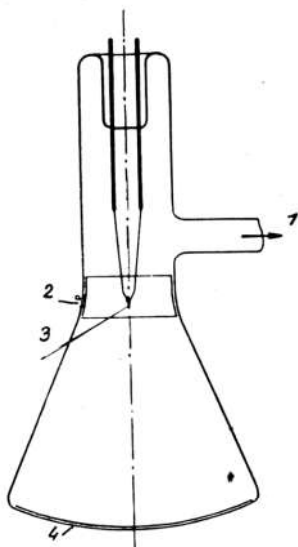
Visina potrebne anodne napetosti većinom leži između 30 kV i 100 kV. Jakost je anodne struje 10 do 100 puta manja nego kod rentgenskih cjevi. Odatle slijedi, da okolina mora biti dobro zaštićena od rentgenskih zraka, što izbijaju iz svih dijelova, u koje udaraju elektroni. Osobito se valja pobrinuti, da se uklone promjenljiva magnetska polja, okomita na os mikroskopa. U tu je svrhu cjev mikroskopa oklopljena jednostrukim i dvostrukim cilindrima od feromagnetičkih slitina velike permeabilnosti.

Slike, dobivene e-im m-om, nadmašuju svjetlostnim kontrastima one, koje su dobivene svjetlostnim mikroskopom. Ovome je razlog u tome, što kontrasti kod oslikavanja elektronima dolaze samo od razlika u razpršavanju elektrona na različitim točkama objekta, odnosno u emisijskim mikroskopima (v. niže pod 1 i 4) u različitim emisijskim sposobnostima različitih mikropodručja katode. Da ovi kontrasti ne bi bili u snimkama pokvareni razpršavanjem elektrona u osjetljivom sloju fotografske ploče, upotrebljavaju se posebne ploče, kod kojih je to razpršavanje svedeno na najmanju mjeru. To su t. zv. Schumannove ploče, na kojima je tanak osjetljivi sloj bez želatina.

Pod raztvornom moći mikroskopa razumijeva se najmanji razmak na objektu, koji se kod najvećeg polučnog povećanja poveća na 0,3 mm. Dok se raztvorna moć svjetlostnog mikroskopa zaustavlja na odprilike 200 μ , elektronski nadmikroskop uz prosijavanje objekta spustio je tu granicu (do kraja 1940) prosječno do na 5 μ , a u pojedinim slučajevima na 3 μ ; ovo odgovara izravnom povećanju od 100.000 puta. Vrlo oštre snimke dopuštaju još naknadna povećanja svjetlostnim putem. Tim su otvorena nova područja u iztraživanju žive i nežive tvari. Napokon je Ardenne nedavno (1944) svojim najnovijim elektronskim nadmikroskopom polučio raztvornu moć 1,2 μ .

Dok se kod svjetlostnog mikroskopa primjenjuju samo dvije metode za dobivanje povećane slike: metoda prosijavanja objekta kod običnog mikroskopa i metoda odbijene svjetlosti kod mikroskopa za iztraživanje kovnih površina — omogućuje elektronska optika više načina, da se dobije povećana slika. Tome je razlog s jedne strane kratka De Broglieova valna dužina brzih elektrona, a s druge strane mogućnost, da se dimenzije elektronskog izvora elektronsko-optičkim putem umjetno umanje do 10^3 puta. Tako se prve tri vrste e-og m-a u opisima, koji slijede, osnivaju na pravocrtnom gibanju elektrona u prostoru bez električkih i magnetskih polja. Vrste su poredane uglavnom tako, da s rednim brojem raste sličnost s normalnim svjetlostnim mikroskopom.

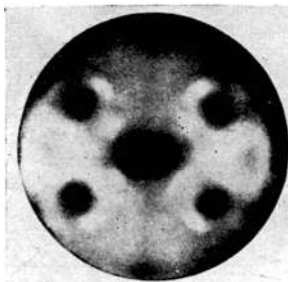
1. **Elektronski nadmikroskop emisijom autoelektrona** (R. P. Johnson i W. Shockley, 1936; E. W. Müller, 1937) osniva se na sposobnosti vrlo jakih električkih polja (reda 10^6 do 10^7 volt/cm), da omoguće izlazak elektrona iz kovnih površina vrlo velike zakrivljenosti (autoelektroni). Bitni dijelovi ovog nadmikroskopa u Müllerovoj izvedbi prikazani su shematski u sl. 1. Katoda (3) je vrlo oštar šiljak od volframa ili molibdena, gladko zašiljen kemijskim po-



Sl. 1. — 1. Spoj sa sisaljkom.
— 2. anoda. — 3. katoda. —
4. fluorescentni zastor

autoelektrona iz diela jednoga sitnog volframova monokristala; povećanje je blizu 100.000 $\times$.

2. Nadmikroskop pomoću projekcije sjene (H. Boersch, 1939). Slika, koju daje ovaj nadmikroskop, vrlo je povećana sjena mikroskopskog objekta projicirana u prostoru bez električnog polja iz točkastog elektronskog izvora izvanredno malenih dimenzija. Kao ovakav izvor djeluje



Sl. 2. EMISIJA ELEKTRONA
IZ PLOHA VOLFRAMOVA MO-
NOKRISTALA. Povećanje blizu
100 000 $\times$. Snimka od E. W.
Müllera

troni, koji prodru kroza nj, gibaju se pravocrtno u daljem prostoru do kraja cijevi, jer je taj prostor bez električnog polja. Kako je broj takvih elektrona različit za različita mikropodručja objekta, i to zbog nejednakih gubitaka refleksijom i razpršavanjem, nastaje u daljini *b* od sonde na fluorescentnom zastoru *LS* ili na fotografskoj ploči *F* vrlo povećana sjena prosijanog diela objekta s pojednostima njegove mikrostrukture. Povećanje je dano omjerom *b/a*. U sl. 4 prikazana je snimka diela jedne diatomeje dobivena ovakvim nadmikroskopom (povećanje 4200 $\times$). Snimke se odlikuju velikom dubinskom oštrinom. Raztvorna moć ograničena je s jedne strane sfernom aberacijom leća *L*₁ i *L*₂, s druge strane elektronskim ogibom Fresnelove vrste; u nekim je snimkama snižena do na 25 μ . Područje primjene ovog nadmikroskopa podudara se s područjem nadmikroskopa opisanog pod 5.

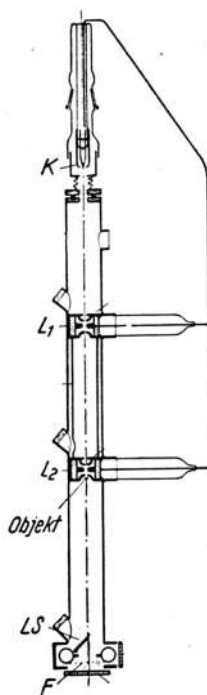
3. Nadmikroskop s rešetastim oslikavanjem (M. Ardenne, 1938) pripada ovamo samo po upotrebljenoj elektronskoj optici, dok se sama povećana slika dobiva napola mehaničkim putem. Glavni dio Ardenneova elektronsko-optičkog postupka isti je kao kod Boerschova nadmikroskopa; t. j. i on stvara elektronsku sondu s promjerom reda 10⁻⁵ mm pomoću dviju elektronskih leća kratke žarišne daljine. Ali kod njega elektronska sonda pada u sam mikroskopski objekt. Fotografska ploča dolazi nepo-

stupkom, a polumjer zakrivljenosti na vrhu reda je veličine 10⁻⁴ mm. Ciev je evakuirana do vrlo visokog vakuuma (kod 1 je spoj sa sisaljkom), a žice, koje vode do katodnog šiljka, služe za to, da se užarivanjem u vakuumu uklone iz šiljka tragovi adsorbiranih plinova. Anoda je prsten (2) uz stienу cijevi oko katode, a napetost između nje i katode reda je 10 kV. Zakrivljena ploha cijevi nasuprot vrhu katode obložena je fluorescentnim slojem (4). Brzi elektroni, koji izlaze iz katode, gibaju se pravocrtno i stvaraju na fluorescentnom sloju centralnom projekcijom sliku elektronske emisije iz vrha katode. To je jedina primjena ovog mikroskopa. Povećanje je određeno omjerom polumjera zakrivljenosti fluorescentnog zastora i vrha katodnog šiljka. Sl. 2 prikazuje jednu snimku emisije

elektrona iz diela jednoga sitnog volframova monokristala; povećanje je blizu 100.000 $\times$.
2. Nadmikroskop pomoću projekcije sjene (H. Boersch, 1939). Slika, koju daje ovaj nadmikroskop, vrlo je povećana sjena mikroskopskog objekta projicirana u prostoru bez električnog polja iz točkastog elektronskog izvora izvanredno malenih dimenzija. Kao ovakav izvor djeluje vrlo umanjena elektronska slika primarnog elektronskog izvora. To je t. zv. elektronska sonda. Mikroskopski uređaj prikazan je shemom u sl. 3. Elektronsko-optičke leće *L*₁ i *L*₂ s kratkim žarišnim daljinama stvaraju u dva stepena izpod *L*₂ vrlo umanjenu sliku točkastog vrha užarene katode *K* pomoću uskog mlaza elektrona velike brzine. Promjer ove umanjene slike reda je 10⁻⁵ mm. Anoda visoke napetosti na slici uski je otvor, drugi po redu, odmah izpod katode. U malenoj daljini *a* izpod elektronske sonde nalazi se mikroskopski objekt. Elektroni, koji prodru kroza nj, gibaju se pravocrtno u daljem prostoru do kraja cijevi, jer je taj prostor bez električnog polja. Kako je broj takvih elektrona različit za različita mikropodručja objekta, i to zbog nejednakih gubitaka refleksijom i razpršavanjem, nastaje u daljini *b* od sonde na fluorescentnom zastoru *LS* ili na fotografskoj ploči *F* vrlo povećana sjena prosijanog diela objekta s pojednostima njegove mikrostrukture. Povećanje je dano omjerom *b/a*. U sl. 4 prikazana je snimka diela jedne diatomeje dobivena ovakvim nadmikroskopom (povećanje 4200 $\times$). Snimke se odlikuju velikom dubinskom oštrinom. Raztvorna moć ograničena je s jedne strane sfernom aberacijom leća *L*₁ i *L*₂, s druge strane elektronskim ogibom Fresnelove vrste; u nekim je snimkama snižena do na 25 μ . Područje primjene ovog nadmikroskopa podudara se s područjem nadmikroskopa opisanog pod 5.

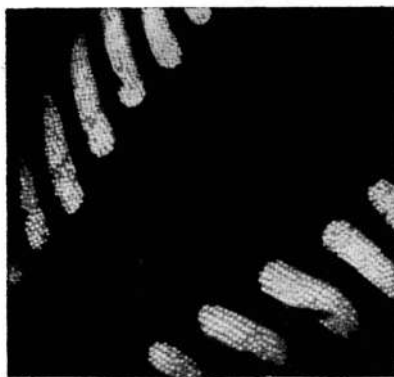
stvaraju na fluorescentnom sloju centralnom projekcijom sliku elektronske emisije iz vrha katode. To je jedina primjena ovog mikroskopa. Povećanje je određeno omjerom polumjera zakrivljenosti fluorescentnog zastora i vrha katodnog šiljka. Sl. 2 prikazuje jednu snimku emisije elektrona iz diela jednoga sitnog volframova monokristala; povećanje je blizu 100.000 $\times$.

3. Nadmikroskop s rešetastim oslikavanjem (M. Ardenne, 1938) pripada ovamo samo po upotrebljenoj elektronskoj optici, dok se sama povećana slika dobiva napola mehaničkim putem. Glavni dio Ardenneova elektronsko-optičkog postupka isti je kao kod Boerschova nadmikroskopa; t. j. i on stvara elektronsku sondu s promjerom reda 10⁻⁵ mm pomoću dviju elektronskih leća kratke žarišne daljine. Ali kod njega elektronska sonda pada u sam mikroskopski objekt. Fotografska ploča dolazi nepo-



Sl. 3.

jednom elektronskom lećom (magnetskom ili elektrostatskom) stvori se povećana slika diela katode, a ova se slika drugom elektronskom lećom povećano projicira. Prema postupku, kako se izaziva emisija elektrona iz katode, dijele se variante ovog mikroskopa kao i zadatci i područja izražavanja pomoću njega:



Sl. 4. DIO OKLOPA JEDNE DIATOMEJE.
Povećanje 4200 $\times$. Snimka od H. Boersch

toda. Slika objekta dobiva se u mikroskopu pomoću elektrona, koji se kod toga elastički odbiju od objekta.

Postupkom pod a) izražavaju se pojavi kod emisije elektrona iz užarenih katoda. Ako se u postupku pod b) upo-



Sl. 5. MIKROKRISTALI CINKOVA OKSIDA snimljeni nadmikroskopom s rešetastim oslikavanjem. Povećanje 8000 $\times$. Snimka od M. v. Ardenne

sredno iza objekta zastrta zaslonom, u kojem je u osi elektronskog mlaza uzak okrugli otvor za elektrone, koji su prodrli kroz objekt. Sonda nije nepomična, nego se pomoćnim odklonskim poljima pomiče po objektu, koji je reda veličine 10⁻² $\times$ 10⁻² mm², redak po redak u razmacima oko 10⁻⁴ mm — slično kao u televizijskim uređajima — dok se fotografska ploča pomiče sinhrono pod objektom. Na taj je način povećanje određeno brzinom pomicanja ploče. Sl. 5 prikazuje dio jedne snimke dobivene ovim postupkom (mikrokristali cinkova oksida, povećanje 8000 $\times$). Raztvorna je moć manja u smjeru okomitom na redke nego u smjeru redaka.

4. Emisijski mikroskop je najstarija vrst e-o g m-a (E. Brüche i H. Johansson, 1932). Njime se dobiva povećana slika emisije elektrona iz katode pomoću njih samih, pošto im je visoka napetost dala potrebnu veliku brzinu. No ovaj je mikroskop zbog tehničkih poteškoća oduže vrijeme zaostajao povećanjima za drugim mikroskopima, koji su se razvili poslije njega; istom 1941 uspijelo ga je usavršiti do nadmikroskopa (Mecklenburg). Elektronsko-optički je uređaj jednostavan: jednom elektronskom lećom (mag-

netskom ili elektrostatskom) stvori se povećana slika diela katode, a ova se slika drugom elektronskom lećom povećano projicira. Prema postupku, kako se izaziva emisija elektrona iz katode, dijele se variante ovog mikroskopa kao i zadatci i područja izražavanja pomoću njega:

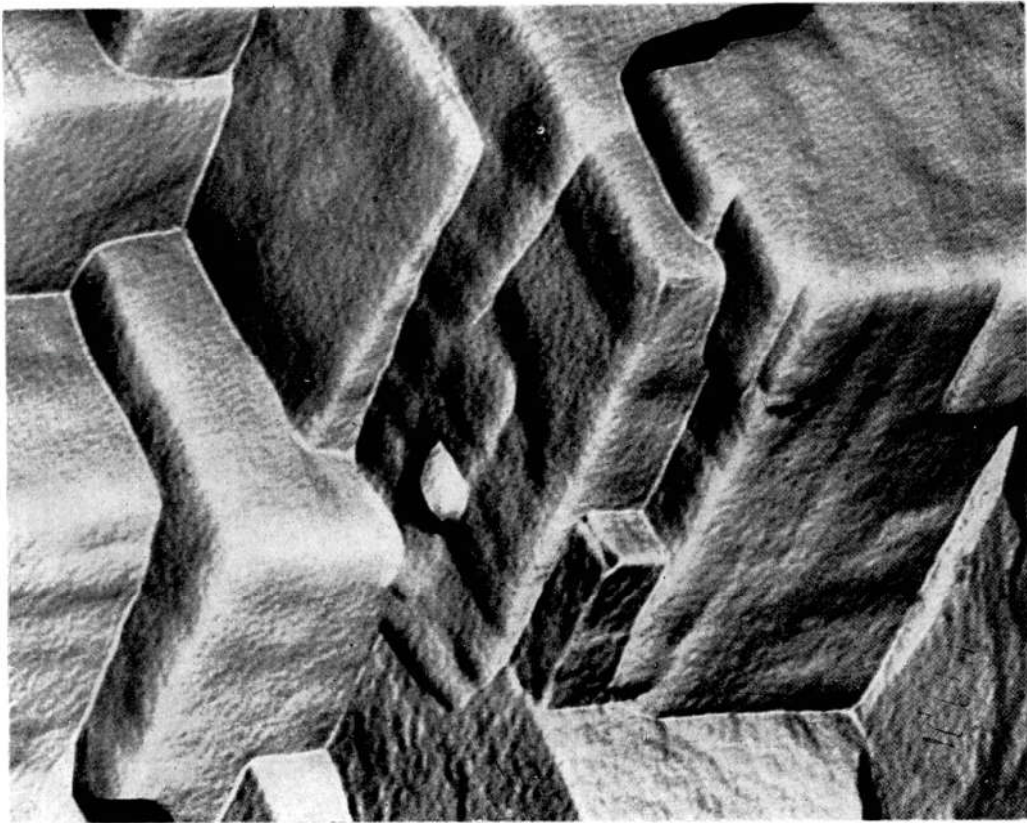
a) Emisija elektrona izazvana je žarenjem katode;

b) osvijetljivanjem katode ultraljubičastom ili rentgenskom svjetlošću izaziva se fotoelektrički efekt; tako oslobođeni elektroni upotrebljavaju se za oslikavanje katode;

c) elektroni iz pomoćne užarene katode, koja je postrance od osi mikroskopa, ubrzani pomoćnom napetošću, udaraju u objekt smješten u osi mikroskopa kao njegova katoda. Slika objekta dobiva se u mikroskopu pomoću elektrona, koji se kod toga elastički odbiju od objekta.

Postupkom pod a) izražavaju se pojavi kod emisije elektrona iz užarenih katoda. Ako se u postupku pod b) upo-

ELEKTRONSKI MIKROSKOP I.



Lievo: POVRŠINA HIDRONALIJA KEMICKI OJEDENA. Povećanje 38 000 X.

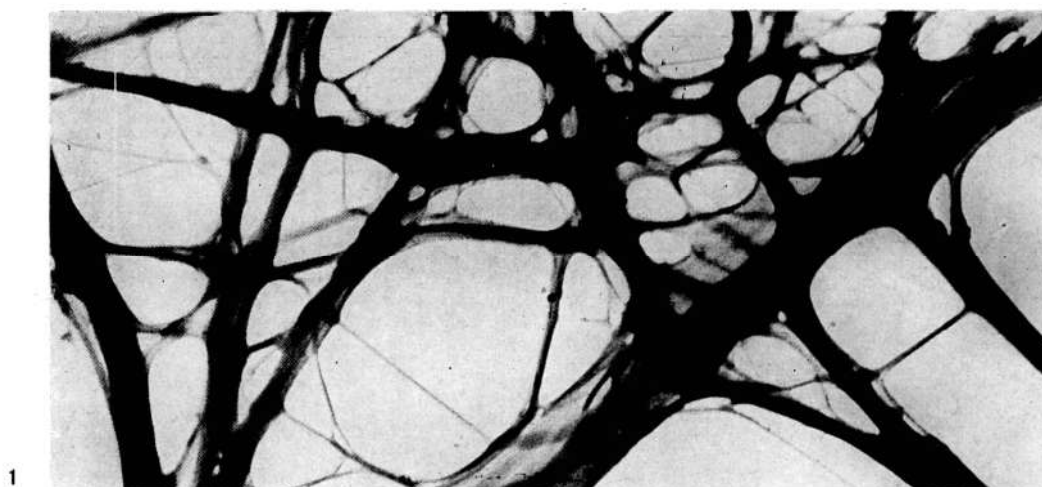
Snimili A. Jakob i H. Mahl (1940)



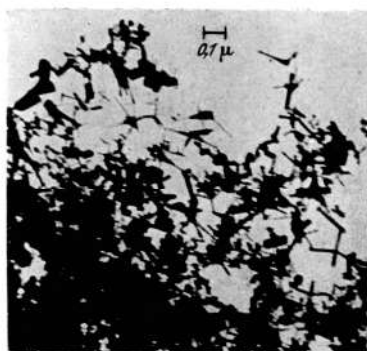
Desno: BAKTERIJ DISENTERIJE S BAKTERIOFAGIMA. Povećanje 28 000 X.

Snimili A. Jakob i H. Mahl (1940)

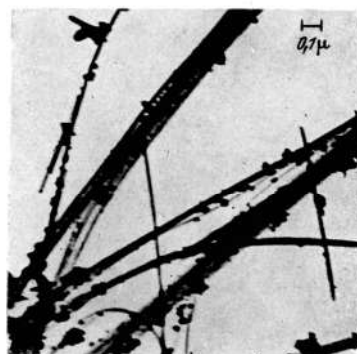
ELEKTRONSKI MIKROSKOP II.



1



2



3

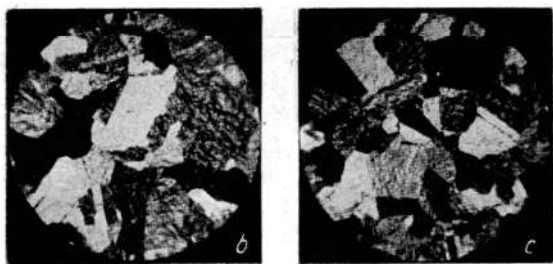


4



5

Sl. 1. VLAKANCA PAPIRA IZ KRPA. Povećanje 26 000 ×. Snimio H. Mahl (1941). — Sl. 2. KRISTALI CINKOVA OKSIDA IZ ELEKTRICKOGA LUKA MEĐU CINKOVIM ELEKTRODAMA. Povećanje 30 000 ×. Snimio M. v. Ardenne. — Sl. 3. NEUPOTREBLJENI PALADIJEV KATALIZATOR NA AZBESTU. Povećanje 30 000 ×. Snimio M. v. Ardenne. — Sl. 4. SVJEŽA ŽELJEZNA RŔA. Povećanje 22 000 ×. Snimio H. Mahl (1940). — Sl. 5. BAKTERIJ *PROTEUS* S UNUTRASNJOM STRUKTUROM. Povećanje 23 000 ×. Snimili A. Jakob i H. Mahl (1940).



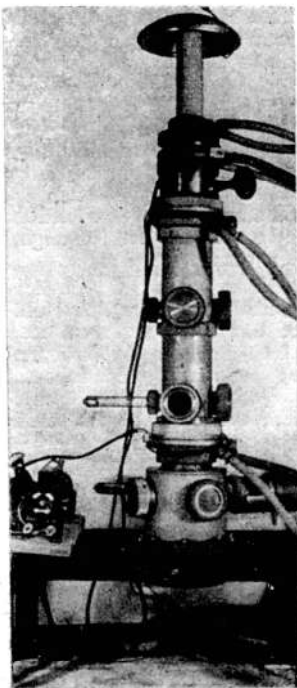
Sl. 6. PRIELAZ ŽELJEZA IZ MODIFIKACIJE β U MODIFIKACIJU γ
Povećanje 55 $\times$. Snimka od Brüchea i Knechta

trebi za katodu fotoelektrička katoda bez pogriješaka, pa se na nju projicira jedna umanjena svjetlostna slika, dobiva se e-im m-om ta slika povećana.

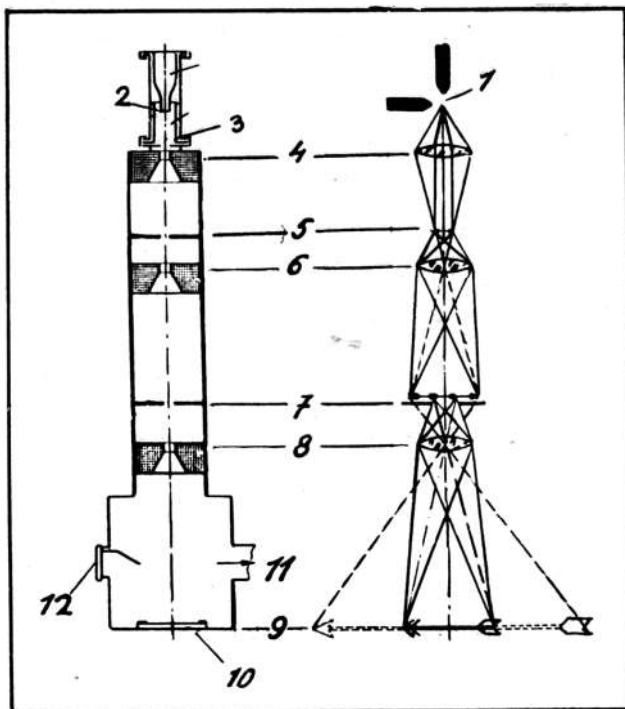
Postupak pod c) bio je prvobitno određen za izražavanje kovnih površina u metalurgiji; čak i shema odgovara shemi metalurgijskog svjetlostnog mikroskopa. Ali je ovaj postupak postepeno iztisnut s jedne strane primjenom postupaka a i b na ovakva izražavanja, a s druge strane metodom odtisaka, o kojoj će biti govora kod mikroskopa opisanog pod 5. Prevuče li se izražavana ravna kovna površina kao katoda mikroskopa atomarnim slojem druge kovine, koja ima malenu izlaznu radnju, pa se žarenjem ili fotoelektričkim putem izazove emisija elektrona iz nje, daje emisijski mikroskop sliku površine s njezinom kristalnom strukturom, jer se različita područja kristalita iziču kontrastima zbog različitih jakosti elektronske emisije. U tu se svrhu upotrebljavaju atomarni slojevi alkalnih kovina, barija ili tanke navlake barijeva azida. Ovakvim su postupkom dobivene snimke b i c u sl. 6, koje prikazuju prielaz željeza iz modifikacije β u modifikaciju γ kod temperature 906°C.

5. *Nadmikroskop uz prosijavanje objekta elektronima* podpuno odgovara postupkom i optikom normalnom dvostepenom svjetlostnom mikroskopu udešenom za projekciju ili za snimanje mikroobjekta. Najvažniji je od svih e-im m-a, jer ima najšire područje primjene. Kad se govori o e-om m-u, obično se misli na nj. Prvi takav e. m. izradili su M. Knoll i E. Ruska 1932, a usavršili su ga na stupanj nadmikroskopa Ruska i B. Borries 1934. Prvi mikroskopi i nadmikroskopi ove vrsti radili su magnetskim lećama, dok nije H. Mahl (1939) izradio i nad-

mikroskop s elektrostatskim lećama. Sl. 7 prikazuje vanjski izgled nadmikroskopa s magnetskim lećama ugrađenima u ciev. U slici 8 lijevo je prikazana shema istog nadmikroskopa, dok desna shema prikazuje za poredbu svjetlosni projekcijski mikroskop s prosijavanjem objekta. Uzki mlaz elektrona iz užarene katode, ograničen otvorom u anodi, dobiva veliku jednaku i stalnu brzinu od stalne visoke jednake napetosti stavljene između katode i anode. Kondenzorska uzvojnica koncentrira elektrone na objektu; pomoću elektrona, koji su prošli kroz objekt, stvara objektna uzvojnica (objektiv) u međuravnini povećanu sliku objekta, a dio ove slike projicira projekcijska uzvojnica u ravniu glavne slike. Svaka od ovih leća daje povećanje reda veličine 100 $\times$; prema tome konačno povećanje ima red veličine 10 000 $\times$. Konačna slika pada ili na fluorescentni zastor, na kojem se može promatrati kroz postrani prozorčić, ili se projicira na fotografsku

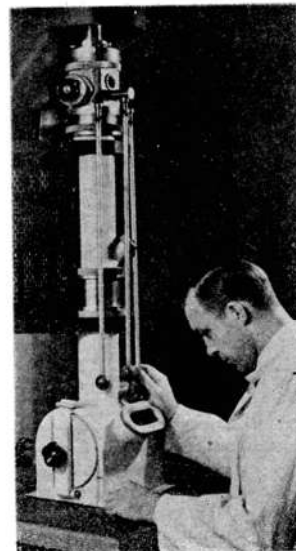


Sl. 7. NADMİKROSKOP S. MAGNETSKIM LEĆAMA



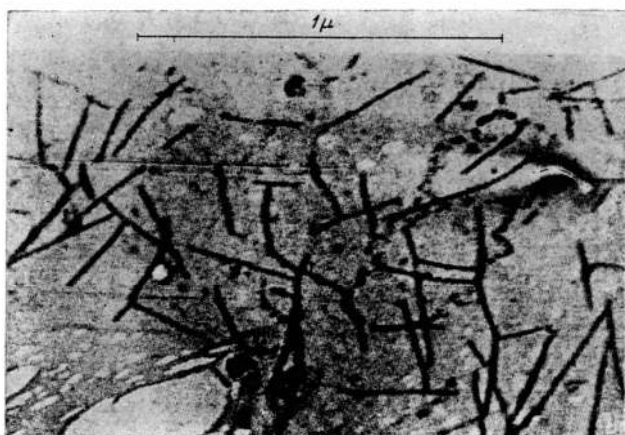
Sl. 8. SHEMA ELEKTRONSKOG NADMİKROSKOPA UZ PROSIJAVANJE OBJEKTA S UGRAĐENIM MAGNETSKIM LEĆAMA. Uzporedba sa svjetlostnim projekcijskim mikroskopom. Brojevi znače: 1 izvor svjetlosti, 2 izvor elektrona (katodu), 3 anodu, 4 kondenzorsku leću, 5 ravninu objekta, 6 objektiv, 7 ravninu međuslike, 8 projekcijsku leću, 9 ravninu konačne slike, 10 fluorescentni zastor, 11 spoj sa sisaljkom, 12 prozorčić za promatranje.

ploču, pošto je postignuta najbolja oštšina. Postrani prozorčići kod međuravnine služe za promatranje međuslike na pomoćnom prstenastom fluorescentnom zastoriću, da bi se za snimku u konačnoj slici dalo odabrati zanimljivije mjesto na objektu. Prema formuli za f magnetske leće oštšina se slike može namjestiti ili finim promjenama anodne napetosti ili finim promjenama jakosti struje u uzvojnica (→ elektronska optika); istodobno se i objekt daje mikrometrički pomicati. — Kod nadmikroskopa ove vrsti s elektrostatskom optikom anoda je izrađena tako, da djeluje kao kondenzorska leća. Sl. 9 prikazuje vanjski izgled takvog nadmikroskopa u izvedbi AEG-a. Tri vertikalna držaka, završena kuglama, služe za smještanje objekta u točan položaj pred objektivom.



Sl. 9. ELEKTRONSKI NADMİKROSKOP S. ELEKTROSTATSKIM LEĆAMA

Ovaj je nadmikroskop već otvorio široka nova područja izražavanja i primjena, možda manje u čistim fizikalnim pitanjima, ali to više u kemiji (struktura koloidnih čestica, celuloze, škroba i dr.), zoologiji, medicini i bakterijologiji. Njime su prvi put učinjeni vidljivima bakteriofagi, a u mnogo slučajeva i virusi (sl. 10). U pojedinim slučajevima učinjeni su vidljivima makromolekuli sa srednjim promjerom 8 m μ (molekul edestina). Preparat, koji se izražuje, a tako i njegova podloga, moraju biti izvanredno tanki, da ne bi izazvali preveliko razpršavanje elektrona, koje bi, osim duge ekspozicije, prouzročilo i manju oštirinu slike. Za podloge



Sl. 10. JEDAN BILJNI VIRUS. Povećanje 50 000 ×.
Snimio M. v. Ardenne

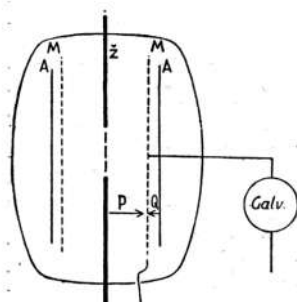
se upotrebljavaju vrlo tanke kožice (nekoliko mμ) kolo-dija bez vlastite strukture. Ovakva se kožica s prepa-ratom jednolično razastre preko otvora na dršku za objekte; rjeđi su slučajevi, da se objekt daje izravno smjestiti na samom otvoru. Zoološke i biljevnne prepa-rate režu specialnim mikrotomima na klinaste izrezke debljine izpod 1 mikrona.

Poseban postupak, što ga je pronašao H. Mahl, omo-gućio je primjenu ovog nadmikroskopa na izraživanja makroskopski ravnih površina kovina i slitina u metalur-giji; time je u mnogo pitanja iztislano izraživanje takvih površina variantama a, b i c kod emisijskog mikroskopa. Taj se postupak sastoji u tome, da se napravi vrlo tanak jednoličan odtisak kovne površine, koja je na pr. kemič-kim postupkom lako ojedena, pa se ovaj odtisak izraži ovim nadmikroskopom. Kod aluminija i njegovih slitina napravimo termičkim putem tanku jednoličnu kožicu oksida, pa ovu odljuštimo elektrolitičkim putem. Kod drugih kovina radi se tako, da na površinu spustimo kap razrijeđene raztopine zapon-laka pa dobivenu suhu kožicu odljuštimo elektrolizom. Ovako dobivene tanke kožice u prosijavanju elektronima pokazuju sve mikroskopske ne-ravnosti kovne površine zbog mjestimičnih sitnih razlika u debljini.

Nekoliko snimaka iz različitih područja izraživanja, koje su dobivene nadmikroskopima ove vrsti, prikazano je u slikama na tablama: Elektronski mikroskop I, II.

LIT.: H. Busch i E. Brüche, Beiträge zur Elektronenoptik, Leipzig 1937; M. v. Ardenne, Elektronen-Übermikroskopie, Berlin 1940; C. Ramsauer, Elektronenmikroskopie, Berlin 1942 (AEG). M. K.

Elektronski udarac je sraz, koji nastaje, kada elektron udari u atom ili molekulu. Obilna je prilika za prouča-vanje toga pojava, budući da se brzina elektrona daje po volji mienjati. Jednostavan eksperimentalni uređaj za tu svrhu prikazan je u sl. 1. Vakuum-ciev s raz-riedenim plinom, slična triodi (→ elektronska ciev), ima tri platinene elektrode: 1. valjkasti list A, u slici prikazan samo s dvie izvodnice, 2. u njemu valjkastu istoosnu (koaksialnu) mrežicu M i 3. u osi tih valjaka žicu Z, ko-joj je srednji dio tanak (raz-mak $ZM = 4$ cm, $MA = 1-2$ mm). Električkom strujom tanki se dio žice užaruje te pušta iz sebe elektrone. Posebno baterijom s otporni-kom učini se M pozitivno elek-tričkim prema Z, te M privlači elektrone, koji su emitirani iz Z. Napetost P, koja vlada između M i Z te pospje-šuje elektrone, može se mien-jati. Jedan treći izvor struje stvara napetost između M i A, te je A slabije negativno električno prema M. Ta na-petost Q ponešto zaustavlja elektrone, koji su prošli kroz



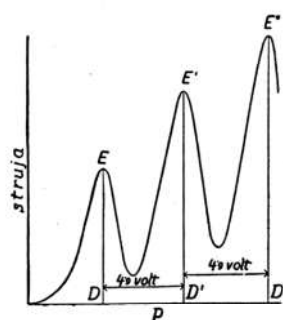
Sl. 1.

oka mrežice, tako da prespori elektroni ne stizavaju do A niti teku kroz galvanometar, koji je metnut izpred A.

km/sek	volt
100	0.0284
1000	2.84
10000	284
100000	31000

Već slaba električna napetost daje elektronima veliku brzinu, kako se vidi iz tablice, koja u prvom stupcu donosi krajnju brzinu izprva mirnog elektrona, a u drugom na-petost, koja je elektron ubrzala. Tako 0.1 V (volt) daje elektronu brzinu, koja je golema prema brzini atoma ili molekule, jer ta brzina obično ne iznosi ni 1 km/sek. S obzirom na e. u. možemo takvu česticu smatrati mirnom. Ti udarci mogu biti dvovrstni. Dok je P maleno, srazovi su elastični; to će reći: zbroj kinetičkih energija poslije udara tolik je, kolik i prije udara. Kako je udarena čestica prije sraza mirovala, i kako su mase i najlakših atoma mnogo puta veće od mase elektrona, elektron se — prema poznatim zakonima sraza — odbije na udarenom atomu ili molekuli gotovo nesmanjenom brzinom, te izgubi vrlo malo svoje kinetičke energije, da je preda udarenoj čestici. Kod većih brzina javljaju se neelastični udarci, t. j. takvi, kod kojih se gubi kinetička energija.

Na glasu je primjer takvih udara, koji su iztražili J. Franck (v.) i G. Hertz (v.). U ciev sl. 1, koja se sva nala-zila u parafinskoj kupelji (oko 112°C), bila je zasićena živina para, kojoj je tlak iznosio oko 1 tor. Kada se nape-tost P povisivala, galvanometar je pokazivao mienjanje struje, koje je grafički prikazano u sl. 2. Struja je rasla do najveće vrijednosti DE, naglo pala, opet rasla do novog



Sl. 2.

maksimuma D'E' i t. d. Da se prijede od jednog maksi-muma na drugi, trebalo je P povećati za 4.9 V. Tumače-nje: Kad elektron postigne dovoljnu brzinu, postaje nje-gov udarac u živin atom ne-elastičan, i to tako, da elek-tron udarcem izgubi svu brzi-nu, dakle i svu kinetičku ener-giju; na račun toga poveća se udarenom atomu unutarnja energija, te on prijede u t. zv. pobuđeno stanje. Kada P raste, to se prvi put događa tik pred mrežicom M, te elektron, bez brzine, ne može svladati napetosti Q, ne stigne na elektrodu A i ne ide kroz galvanometar. Struja u galvano-metru oslabi. Kod daljnjeg povećanja napetosti P struja opet raste zato, jer se mjesta, gdje nastaju neelastični udarci, približe žici Z, te se elektroni, koji su udarcem već izgubili brzinu, na daljnjemu putu do M nanovo ubrzaju. Napetost 4.9 V baš dostaje, da elektronu, koji je ostao bez brzine, nanovo podieli kinetičku energiju, kakvu treba za novi neelastični udarac. Ta je energija dakle 4.9 eV (→ elektronvolt), i pobuđeni živin atom u opisanom primjeru ima za 4.9 eV veću unutarnju energiju negoli u nepobuđenom, t. zv. osnovnom stanju.

Franck i Hertz još su našli, da njihova vakuum-ciev, kada P premaši 4.9 V, svjetli poznatim živinim ultraljubi-častim zrakama dužine vala 2536 Å, i upozorili su, da fotoni tih zraka ima energiju, kako se lako izračuna, 4.89 eV. Taj spektroskopski podatak očito se podudara s Franckovim i Hertzovim, manje točnim posljedkom električkih mjerenja. No po Bohrovoj nauci atom zasvjetli, kada iz stanja veće energije preskoči na manju energiju, te je energija emitiranog fotona jednaka razlici tih atomskih ener-gija. Pokusima Franckovim i Hertzovim, koji su uostalom izvedeni bez sveze s Bohrovom naukom (1914), do-biva ta nauka odličnu neposrednu potvrdu: e-im u-ima unutarnja se atomska energija toliko povisi, koliko se odmah iza toga emisijom fotona smanji. Zato se e-im u-em ne može unutarnja energija atoma povisiti za koju mu drago vrijednost, već samo za takvu, koja je u skladu s atomskim energijama, kako su poznate iz spektralnih izraživanja.

Mnogobrojnim energetičkim stanjima, na koja se može pobuditi živin ili koji drugi atom, odgovaraju različite mogućnosti za neelastične e-e u-e. Tako može u živinoj

pari elektron s kinetičkom energijom 6-7 eV pobuditi živin atom, te on iza toga emitira foton dužine vala 1849 Å, kojemu je energija opet 6-7 eV.

Činjenica, da se pri pogonu rentgenskih cijevi upotrebljavaju napetosti od mnogo tisuća volta, pokazuje, da su za pobuđenje atoma na rentgensko svjetljenje potrebni e-i u-i, gdje elektroni dolete s kinetičkim energijama od tisuća eV.

E-im u-em može se od atoma odbiti elektron njegove ljuske. Izgubivši česticu negativnog elektriciteta atom kao cjelina postaje onda pozitivno električan ion. Da se ionizira živin atom, potreban je e. u. s kinetičkom energijom 10-4 eV. Elektron se u tu svrhu ubrza »ionizacionom« napetošću 10-4 V. Ionizacijska napetost helijeva je 24-5 V, vodikova atoma 13-5 V, natrijeva 5-12 V i t. d. Uostalom samo kod vodika i helija postoji tek jedna ionizacijska napetost. Jačim napetostima mogu se elektroni toliko ubrzati, da iz atomske ljuske izbiju koji od elektrona, koji su bliži atomske jezgri, tako da ionizacijskih napetosti ima to više, što je veći redni broj atoma.

Najposlije mogu se već ionizirani atomi ili molekuli odkinuti još i drugi, treći i t. d. elektron, čemu su potrebne različite energije e-ih u-a. Opet su druge energije potrebne, da se ionizira pobuđeni atom ili pobuđi ionizirani, što sve upućuje na golemo mnoštvo mogućnosti.

LIT.: K. T. Compton-E. L. Mohler, *Ionisierungs- und Anregungsspannungen* (prievod), Berlin 1925; K. Darrow, *Introduction to Contemporary Physics*, 2. izd., London 1939. St. H.

Elektronvolt (eV), sićušna jedinica energije i radnje; upotrebljava se u izražavanjima atoma i elementarnih čestica, a jednaka je porastu energije elektrona, kada elektron priđe iz neke točke u drugu, gdje je električki potencijal za 1 volt veći. Na pr. u rentgenskoj cijevi pod napetosti 50 kilovolta svakom elektronu na putu od katode do anode energija naraste za 50000 eV. Iz množine elektriciteta elektronova izračunava se, da je 1 eV = 1.60×10^{-12} erg. Srodna je jedinica 1 megaelektronvolt (MeV) = 10^6 eV. St. H.

Elektrooptika obuhvaća pojave, u kojima se očituje djelovanje stranog električkog polja na svjetlost. Pod stranim električkim poljem mislimo vanjsko električko polje, koje je primijenjeno u pokusu; time ga razlikujemo od unutrašnjeg atomskog polja i od električkog vektora svjetlosti. Tri su skupine elektrooptičkih pojava.

1. Strano električko polje djeluje na brzinu prostiranja svjetlosti, koja se u prozirnom izotropnom dielektriku širi okomito na pravac polja; takav dielektrik pod jakim električkim poljem postaje dvolomnim. To je *Kerrov elektrooptički efekt* ($\rightarrow$ Dvolom, 6).

2. *Starkov ili Stark-Lo Surdoov efekt* je djelovanje stranog električkog polja na emisiju svjetlosti iz atoma, koji se nalaze u tom polju. Ovo se djelovanje sastoji u promjeni titrajne frekvencije i u načinu polarizacije emitirane svjetlosti: svaka spektralna crta ciepa se u više komponenata. U Balmerovu nizu vodikova spektra, na kojem su J. Stark i A. Lo Surdo istodobno (1913) i nezavisno različitim metodama otkrili ovaj efekt, komponente su gotovo bez iznimke totalno polarizovane, ako se pojav promatra okomito na smjer polja.

Starkova metoda je metoda kanálnih zraka. U sl. 1. prikazan je glavni dio njegove kanalne cijevi oko njezine rešetkaste katode. Da bi se u cijevi moglo proizvesti jako električko polje (> 5000 volta/cm), nasuprot katodi, u razmaku 1 do 4 mm, nalazi se pomoćna elektroda C, pa se između nje i katode stavlja pomoćna

napetost, koja može prema katodi biti bilo pozitivna, bilo negativna. Na taj su način kanalne zrake, koje u ovom prostoru emitiraju svjetlost, podvrgnute električkom polju. Pobočni konički nastavak, zatvoren prozorčićem od kvarca ili fluorita, služi za promatranje.

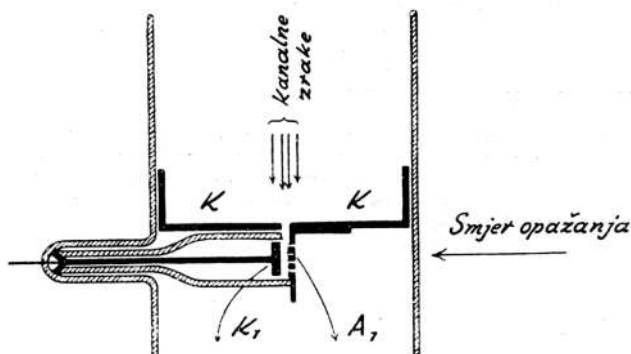
Lo Surdo je radio bez pomoćne napetosti. On je pojav otkrio i izrazio u svjetlosti iz t. zv. prvog katodnog sloja, koji u Geisslerovim cijevima pri znatnom razrjeđenju leži neposredno uz površinu katode između nje i Crookesova tamnog prostora. Već po sebi znatan ka-

todni pad napetosti u ovom sloju Lo Surdo je pojačao time, što je ciev izpred katode suzio na kapilaru. Pojav se promatra tangencijalno prema površini katode. Nedostatak je ove metode, što jakost polja i njezina razpodjela nisu kvantitativno poznati.

Nagaoka i Sugiura (1923) našli su Starkov efekt u vrlo tankom sloju plina pred anodnim kraterom u električkom luku među ugljenima ili među ugljenom i kovinom.

U najnovije vrijeme (1941) izradili su Jenckel i Kopfermann vanredno osjetljivu metodu za izraživanje vrlo slabih inverznih Starkovih efekata. Oni se služe absorpcijom u atomskom mlazu.

Pojav, koji se vidi kod opažanja iz pravca okomitog na pravac električkog polja, kako je to kod opisanih metoda Starka i Lo Surdoa, zovemo transverzalnim efektom, za razliku od longitudinalnog, koji vidimo opažajući u pravcu električkog polja. Prva opažanja longitudinalnog efekta izveo je Stark (1914) pomoću drugičije izgrađene kanalne cijevi. U sl. 2. prikazan je njezin dio oko katode. Katoda K ima samo jedan otvor, a kanalne zrake, koje su prošle kroza nj, ulaze u pomoćno električko polje okomito na pravac njihova gibanja. To je polje stavljeno između pomoćne katode K_1 i prorešetane pomoćne anode A_1 , koja je spojena s katodom K, a leži nasuprot K_1 u razmaku od nekoliko mm. Promatra se kroz otvore u anodi A_1 .



Sl. 2. Uređaj Starkove cijevi za opažanje longitudinalnog efekta

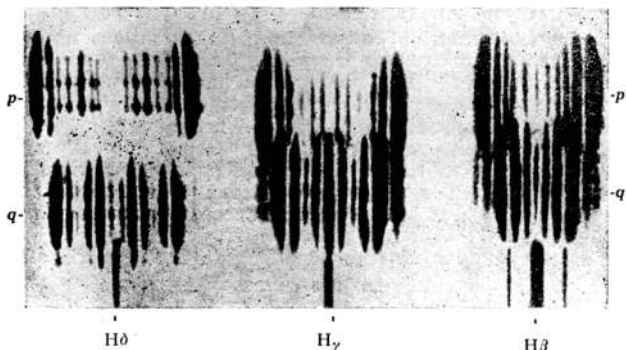
Za promatranje pojava upotrebljavaju se spektrografi s dosta velikom moći disperzije, većinom s optikom iz kvarca u svrhu opažanja u ultraljubičastom. Samo iznimno, za izraživanje diela okolice jedne spektralne crte ili za opažanje slabijeg Starkova efekta u absorpciji, upotrebljavaju se spektrografi s interferencijom. Da bi se povećala množina svjetlosti, koja ulazi u spektrograf, potrebno je izpitivati dio područja u električkom polju oštro projicirati pomoću leće s kratkom žarišnom daljinom na pukotinu spektrografa. Zbog toga ulaze u spektrograf i zrake, koje izlaze dosta koso prema pravcu gibanja atoma, koji emitiraju svjetlost, pa su spektralne crte i Starkove komponente više-manje razširene Dopplerovim efektom.

Kod transverznog efekta svjetlost u nekim polarizovanim komponentama titra paralelno s pravcem električkog polja; to su p-komponente. Kod druge skupine komponenata svjetlost titra okomito na pravac električkog polja; to su q-komponente. Da bi se razlučile jedne od drugih, stavljaju se u put svjetlosti izpred pukotine spektrografa kristal kalcita ili Wollastonova prizma tako, da im jedna ravnina titranja leži paralelno s pravcem električkog polja, a druga okomito na nj. U longitudinalnom efektu vide se od polarizovanih komponenata samo q-komponente kao nepolarizovana svjetlost, i to s istim titrajnim frekvencijama i s istim relativnim intenzitetima kao u transverzalnom efektu. Kako je longitudinalni efekt zbog manje dubine svetlog sloja teže vidljiv, a prema transverzalnom efektu ne daje ništa bitno novo, to je najveći dio izraživanja izveden na transverzalnom efektu.

Pukotina spektrografa može stajati okomito prema pravcu električkog polja; u tom slučaju svjetlost, koja ulazi u spektrograf, dolazi iz jednog ograničenog područja, u kome je električko polje približno homogeno, pa se kom-

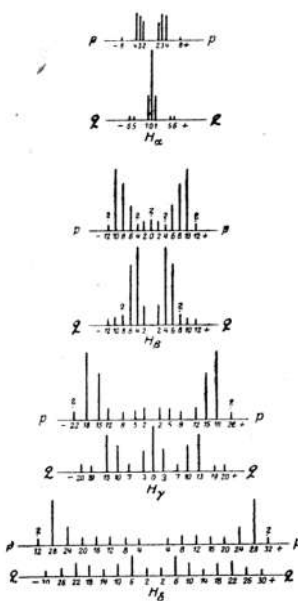
ponente Starkova efekta ocrstavaju u spektru kao paralelne crte (sl. 3). Ako je pak pukotina paralelna s pravcem polja, pripada svjetlost, koja ulazi u spektrograf, redom područjima s različitim jakostima polja prema njihovoj udaljenosti od elektrode. To vrijedi naročito za Lo Surdoovu metodu. U tom se slučaju komponente ocrstavaju kao lepeza savijenih crta (sl. 5).

Snimka u sl. 3 i shematska slika 4 prikazuju Starkov efekt u spektralnim crtama Balmerova niza (v.) u vodikovu spektru, gdje je on najjednostavniji i ponajbolje izražen. Do jakosti polja od kojih 100 kV/cm spektralne



Sl. 3. Starkov efekt vodikovih spektralnih crta H_δ , H_γ i H_β (p - i q -komponente) do jakosti polja 100 kV/cm

crte ovog niza ciepuju se u p - i q -komponente simetrično na obje strane. Simetrija je podpuna i u pogledu intenziteta i u pogledu polarizacije. U sl. 4 prikazana je shema p - i q -komponenta Starkova efekta do 100 kV/cm za spektralne crte H_α , H_β , H_γ i H_δ ovog niza, i to u pogledu



Sl. 4. Pregled Starkova efekta (p - i q -komponente) spektralnih crta H_α , H_β , H_γ i H_δ

H_β ima parcijalno polarizovanih komponenta; njima u raztvoru p i u raztvoru q pripadaju isti redni brojevi.

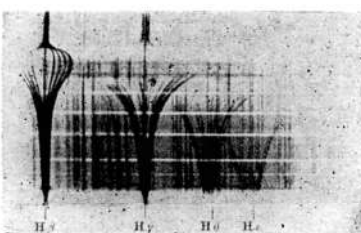
Mjerenja su pokazala, da razmak $\Delta\nu$ kod Balmerova niza raste linearno s jakošću električkog polja. Iznad jakosti 100 kV/cm počinje se javljati zavisnost o kvadratu jakosti. Prvu teoriju Starkova efekta izradili su istodobno (1916) Schwarzschild i Epstein na temelju starije kvantne teorije. Obje teorije dale su isti konačni rezultat, koji vrlo dobro odgovara eksperimentalnim rezultatima za Balmerov niz do 100 kV/cm; Starkovu efektu u spektrima drugih elemenata ne odgovara. Po toj je teoriji $\Delta\nu = \pm z\sigma E$, gdje je z t. zv. redni broj komponente, E je jakost polja u elstg-jedinicama, a σ ima značaj univerzalne konstante s

vrijednošću $\sigma = \frac{3h}{8\pi^2 em_0}$; ovdje je h Planckova konstanta,

e i m_0 su električki naboj i masa elektrona. Za z vrijedi izraz: $z = nn' \pm ss'$, gdje su n i s kvantni broj spektralne crte i kvantni broj spektralnog niza, dok su: $n' = 0, 1, 2, \dots$ ($n-1$), $s' = 0, 1, 2, \dots$ ($s-1$). Teorija daje jednostavno pravilo u pogledu polarizacije komponenta: za p -komponente je $(n-s) + (n'-s') = a$ paran broj, a za q -komponente a je neparan broj.

Starkov efekt u spektrima drugih elemenata s jedne je strane većinom mnogo slabiji nego u Balmerovu nizu vodikova spektra, s druge je strane obćenito nesimetričan i mnogo zamućeniji. Kod spektralnih crta iz glavnog i iz oštrog sporednog niza u spektrima atoma, nesličnih vodikovu ($\rightarrow$ spektri, atomski), nastaju u osrednjim jakostima polja jednostrani pomaci i nesimetrična ciepanja proporcionalno s kvadratom jakosti, a u jačim poljima prelazi ovaj kvadratni efekt u linearni simetrični efekt. Samo spektralne crte difuznog sporednog niza, naročito kod He i Li, daju efekt, sličan onome kod Balmerova niza. Često se javljaju zabranjene spektralne crte ($\rightarrow$ spektri, atomski), kojima intenzitet brzo raste s jakošću polja; naprotiv, neke redovite komponente u jačem polju oslabe ili izčeznu. Komponente su gotovo pretežno nepolarizovane. Ovakve nepravilnosti javljaju se to većma u Starkovu efektu atoma s velikim rednim brojevima.

U Starkovu efektu crta Balmerova niza iznad jakosti polja 100 kV/cm javlja se uporedo s kvadratnim porastom i pomak komponenta prema crvenome. Ovaj je to izrazitiji, što je kvantni broj spektralne crte veći. Kod daljeg povišavanja jakosti polja pridolazi i kubna zavisnost o jakosti polja (Starkov efekt 3. reda). Napokon kod vrlo velikih jakosti polja, reda 1000 kV/cm, izčezavaju sve komponente Starkova efekta, i to prije kod crta s većim kvantnim brojem. Ove pojedinosti pokazuje snimka u sl. 5.



Sl. 5. Starkov efekt vodikovih spektralnih crta H_β , H_γ , H_δ i H_ϵ u vrlo jakim poljima do 1140 kV/cm. Polje raste odozdo prema gore. Snimljene su i crte bez polja. Horizontalni bijeli potezi su linije jednake jakosti polja. Vidi se, da su Starkove komponente jače izbočene naliavo (crveno) nego nadesno; to je pomak prema crvenome. Uz neke jakosti polja one izčezavaju, i to kod H_ϵ uz nižu jakost polja nego kod H_δ , kod ove uz nižu jakost nego kod H_γ , i t. d. Nadalje, komponente iste spektralne crte, koje leže prema crvenome, izčezavaju uz nižu jakost polja nego one na strani prema ultraljubičastom. Snimka je od R. v. Traubenberga i suradnika

postaju nestalnim, pa atom emitira neke vrsti neprekidni spektar.

3. **Električki dvolom** je popratni pojav inverznog Starkova efekta. On je električki analogon magnetooptičkom Voigtovu efektu ($\rightarrow$ dvolom 7c). Dosada je iztražen samo kod inverznog Starkova efekta natrijeve D_2 crte kod velikih jakosti polja, a sastoji se u neznatnom dvolomu u najbližoj okolini njezinih Starkovih komponenta. Odkrili su ga Kopfermann i Ladenburg 1925.

LIT.: J. Stark, Berl. Ber. 47, 932, 1913, i Naturw. I, 1182, 1913; A. Lo Surdo, Lincei Rendic. 22, 665, 1913; J. Stark-G. Wendt, Ann. d. Phys. (4), 43, 983, 1914; P. S. Epstein, Phys. Zeitschr. 17, 148, 1916, i Ann. d. Phys. (4) 50, 489, 1916; K. Schwarzschild, Berl. Ber. 50, 548, 1916; E. Schrödinger, Ann. d. Phys. (4) 80, 468, 1926; C. Lanczos, Zeitschr. f. Phys. 62, 518, 1930, i 68, 204, 1931; H. Nagaoka-Y. Sugura, Nature 111, 431, 1923, i Jap. Journ. of Phys. 3, 45, 1924; L. Jenckel-H. Kopfermann, Zeitschr. f. Phys. 117, 145, 1941; F. Gabler, Phys. Zeitschr. 42, 67, 1941. — Pregledi o Starkovu efektu: Wien-Harms,

Handb. d. Exp.-Phys., XXI. 399–548 (J. Stark); Geiger-Scheel, Handb. d. Phys. XXI. 389–439 (R. Minkowski), XXIV/l. 403–429 (H. Bethe).

Elektroozmoza → Elektrokinetički pojavi.

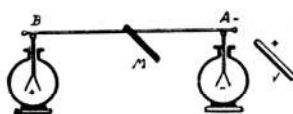
Elektroskopi, sprave veoma različite izvedbe za konstantiranje električnih naboja, odnosno električnih napetosti (napona). Na pr. kod *e-a* sa zlatnim listićima kroz grlo »kućišta« (u obliku boce s kovnim dnom ili kovne kutije sa staklenim prozorčićem za motrenje odklona) vodi električki pomno izolirano u unutarnjost sprave kovni, gore kuglicom snabdjeveni štapić, koji na donjem kraju nosi dva duguljasta listića gornjim krajevima pričvršćena i donjim slobodna. Listići su iz nade sve tanašne zlatne folije i, dok nema naboja, vise jedan do drugoga. No ako se opisani sustav električki nabije, listići se, zbog elektrostatskih sila između njih i kućišta, odklone razilazeći se ili *divergirajući*. Divergiranje je jače, ako je sustav jače pozitivno ili negativno nabijen u odnosu prema kućištu, i po tomu električki napon između sustava i kućišta veći. Bolje konstrukcije *e-a*, snabdjevene skalama za očitavanje odklona, prikladne su i za mjerenja i onda se zovu **elektrometri** (v.).

Elektrostatika je dio nauke o elektricitetu; obrađuje pojave elektriciteta u mirovanju, a ovi se odnose na razpored elektriciteta na elektriziranim tjelesima te na mehanička i električka djelovanja na okolinu. Terminologija, kojom se služimo u elektrostatiki, jest uobičajeni način izražavanja zaostao iz vremena teorije dvaju električnih fluida (→ elektricitet). Elektrostatički pojavi posljedica su lake gibljivosti t. zv. vodnih elektrona; tako nazivaju elektrone, koji su slabo vezani uz elektronsku ljusku atoma, pa lako prelaze od jednog atoma na drugi. Oduzmemo li tielu neku množinu vodnih elektrona, kažemo, da je tielo pozitivno električno ili da ima pozitivan električki naboj. Kod suviše vodnih elektrona na tielu kažemo, da je ono negativno električno ili da ima negativan električki naboj. Telo je električki neutralno, ako ima toliko elektrona, koliko odgovara broju njegovih atoma. Odatle izlazi neposredno osnovni zakon električkih pojava: kod svakog električkog pojava javljaju se jednake množine suprotnih elektriciteta. Taj su zakon za elektricitet trenjem postavili već Watson i Franklin (→ elektricitet). Vodni su elektroni osobito lako gibljivi u dobrim vodičima ili konduktorima elektriciteta; amo idu u prvom redu sve kovine. U izolatorima (jantar, staklo, ebonit, sumpor, i t. d.) oni imaju malo slobode kretanja; uzima se, da su vezani uz molekul.

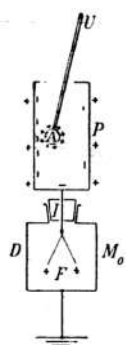
Osnovni je kvalitativni zakon elektrostatike, da se suprotni elektriciteti privlače, a istoimeni odbijaju. To zaključujemo odatle, što se tako vladaju lako gibljiva tjelešca, na pr. 2 kuglice od bagrove srčike, obješene na svilenim nitima, ako ih nabijemo suprotnim, dotično istoimenim elektricitetima. Mehanička sila *f*, kojom elektriciteti djeluju jedan na drugi, dana je Coulombovim zakonom: $f = \pm C \cdot ee_1/r^2$, gdje su *e* i *e*₁ dvije točkaste množine elektriciteta u međusobnoj udaljenosti *r*. *C* je konstanta proporcionalnosti; ona je *C* = 1, ako sve veličine izrazimo u jedinicama elektrostatskog cgs sustava. Elektrostatska cgs (elst-cgs-) jedinica množine elektriciteta jest ona množina, koja na jednaku množinu elektriciteta u daljini 1 cm u vakuumu djeluje silom 1 din. U praktičnom sustavu jedinica množine elektriciteta jest 1 kulon = $3 \cdot 10^9$ elst-cgs-jedinica.

Na dobrom vodiču (i na poluvodiču) nastaje pojav influencije ili dieljenja suprotnih elektriciteta, ako mu primaknemo elektrizirano tielo. Ako na pr. kovnom valjku, koji stoji na stalku od izolatora, primaknemo elektrizirani štapić, na bližem kraju valjka skupi se suprotni elektricitet, a na njegovu daljnjem kraju skupi se istoimeni elektricitet; negdje oko sredine valjka jest t. zv. neutralno područje, gdje nema slobodnog elektriciteta. Ako je influencirani vodič razstavljiv, pa ga razstavimo (sl. 1), odie timo time suprotne elektricitete. Spojimo li influencirani vodič sa zemljom, istoimeni influencirani elektricitet pođe zbog odbijanja u zemlju.

Uklonimo li tada spoj sa zemljom i udaljimo elektrizirani štapić, na vodiču ostaje samo suprotni elektricitet. Da su množine protivnih elektriciteta, oslobođenih influen-



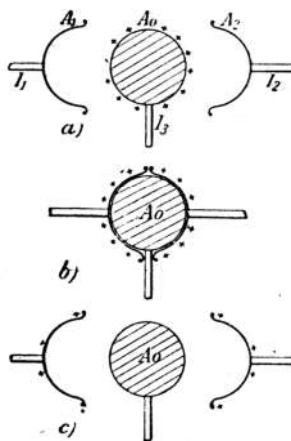
Sl. 1.



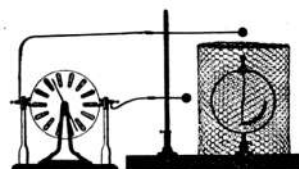
Sl. 2.

ništicu, a kad kuglicu izvučemo, nalazimo, da je i ona neelektrična.

Primaknemo li električno tielo izolatoru, u ovome nastaju električke promjene unutar molekula ili molekularnih agregata. Ove se sastoje u tome, da se protivni elektriciteti odie u molekulima, ili ako su molekuli električki dipoli, nastaje orijentacija dipola. To je dielektrička polarizacija (v.).

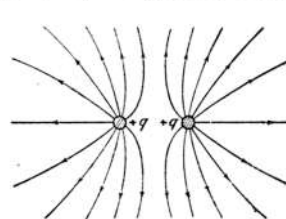


Sl. 3. Cavendishov pokus

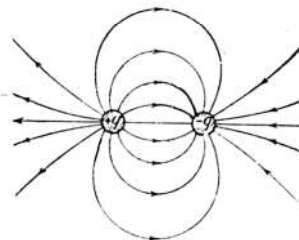


Sl. 4. ELEKTROMETAR ZAŠTIĆEN KOVNOM MREŽOM

površina jače zakrivljena. To možemo izpitati s pomoću kušalice, t. j. kuglice ili pločice na dugačkom izoliranom dršku, i elektrometra dodirujući takav vodič kušalicom u različitim njegovim točkama i donoseći svaki put elektricitet na kušalicu na štapić elektrometra. Ako izolirani elektrizirani vodič ima na sebi šiljak, najveća gustoća elektri-



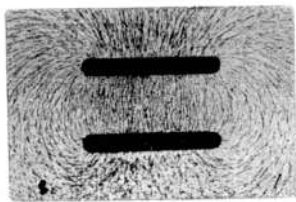
Sl. 6. TIEK SILNICA MEĐU DVJEMA KUGLAMA S JEDNAKIM MNOŽINAMA POSITIVNIM MNOŽINAMA ELEKTRICITETA



Sl. 5. TIEK SILNICA MEĐU DVJEMA KUGLAMA S JEDNAKIM MNOŽINAMA SUPROTNIH ELEKTRICITETA

citeta jest na šiljku, jer šiljak možemo smatrati nizom sve manjih kuglica s vrlo malenim polumjerima zakrivljenosti.

Električno tijelo djeluje influencijom i Coulombovom silom na vodiče u okolici kroz bilo koje okolno sredstvo, koje nije vodljivo, pa i kroz vakuum. Takav prostor oko električnog tijela, u najobičnijem slučaju zračni prostor, nalazi se u nekom osebnom stanju, koje se očituje spomenutim djelovanjima na vodiče. Zovemo ga električkim poljem električnog tijela. Pravac djelovanja električkog polja može se u najjednostavnijim slučajevima krupno izpitati verzorijem ($\rightarrow$ elektricitet); međutim svaki i malo veći vodič, donesen u iztraživano polje, kviri ga vlastitim poljem svojih influenciranih električkih naboja. Električko polje prikazujemo s pomoću električkih silnica. Silnica je krivulja, u kojoj bi se gibala u okolici vodiča slobodno pomična točkasta pozitivna množina elektriciteta; njezine tangente pokazuju pravac polja u različitim točkama. Uz takav dogovor pridajemo električkim silnicama i električkom polju njihov smjer pa kažemo, da silnice izlaze iz pozitivno električnog tijela, a uperene su prema negativno električnom tijelu. U električkom vodiču nema električkog polja. Teoretski bi električko polje trebalo sezati do bezkonačnosti; u stvari svršava se na okolnim vodičima, spojenim sa zemljom, ili na stijenama sobe. Tiek silnica da se prikazati pomoću smrvljenih kristalića gipsa na staklenoj ploči, pomoću suspenzije kininova sulfata u ter-

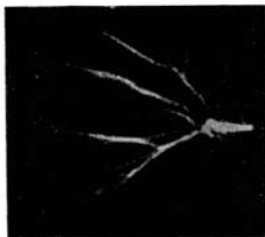


SL. 7. SILNICE MEĐU PLOČAMA KONDENZATORA (smrvljeni gips)

pentinskom ulju ili pomoću suspenzije smrvljenog životinjskog ugljena u parafinskom ulju (sl. 7).

Jakost polja u jednoj točki prostora oko električnog tijela jest sila, kojom bi polje djelovalo na jedinicu množine elektriciteta u toj točki. Mjerimo je električkom napetošću na razmaku 1 cm u okolici te točke pa je obično izražavamo voltima na 1 cm (V/cm). Jakost polja u okolici omanjeg električnog tijela proporcionalna je s množinom elektriciteta na njemu. Zato ona u neposrednoj najbližoj okolici nepravilna elektrizirana vodiča raste s gustoćom elektriciteta na obližnjem dielu površine, pa kod vodiča sa šiljkom najveće jakosti polja vladaju u okolici vrha šiljka.

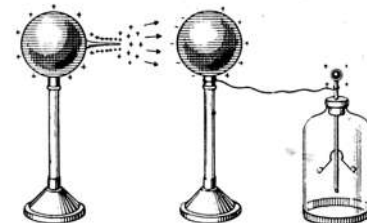
Na tome se temelje električki pojavi na šiljcima (Franklin, 1749). Izolirani vodič sa šiljkom daje se trajno nabiti samo do izvjestne granične napetosti. Ako jedan konduktor električkog stroja na influenciju nosi dobro zašiljen šiljak, ili ako mu dovoljno približimo takav šiljak, spojen sa zemljom, stroj daje slabe ili nikakve iskre. Spojimo izolirani vodič, koji na sebi ima šiljak, s elektroskopom pa mu primaknimo elektrizirani štap! Do neke daljine štapa od šiljka opažamo običnu influenciju: ako štap naglo odmaknemo, listići se elektroskopa naglo sklope. Ako štap postepeno primičemo, postepeno se povećava odklon listića; ali kod neke daljine štapa odklon se naglo povećava. Uklonimo li sada brzo štap, listići se polako sklapaju, ali se ne sklope sasvim, nego trajno ostaje neki granični odklon; to je granična napetost. Međutim taj je elektricitet na vodiču sa šiljkom istoimen s elektricitetom štapa. Čini se, kao da bi šiljak bio usisao istoimeni elektricitet s elektriziranog štapa. Obrnuto: kod gornjeg pokusa sa šiljkom na konduktoru električkog stro-



SL. 8. LAVINE IONA NA ŠILJKU U WILSONOVOJ KOMORI; a) na šiljku je pozitivan elektricitet; b) na šiljku je negativan elektricitet (H. Raether, 1935)

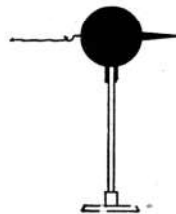
ja vodič, koji držimo još u znatnoj daljini od šiljka od prilike nasuprot njemu, nabije se elektricitetom istoimenim s onim na konduktoru, pa se čini, kao da je šiljak izaslao istoimeni elektricitet.

Električki pojavi na šiljku posljedica su ionizacije zraka u blizini šiljka. Do te ionizacije dolazi, kad jakost polja u blizini vrha šiljka prekorači neku graničnu vrijed-



SL. 9.

Na taj način stvaraju se u blizini vrha šiljka lavine iona (sl. 8), od kojih ioni protivnog predznaka dolaze na šiljak i neutraliziraju njegov elektricitet, dok istoimeni ioni odlaze od šiljka i povlačeći za sobom okolni zrak stvaraju t. zv. električki vjetar (slike 9 i 10). Tako je i pojav, da se konduktor sa šiljkom nabija elektricitetom, istoimenim s elektricitetom primaknutog elektriziranog štapa, samo prividno protivan influenciji. Na konduktoru prvobitno nastaje normalna influencija; ali kad primicanjem štapa jakost polja na šiljku prekorači graničnu vrijednost i dođe do stvaranja ionskih lavina, suprotni elektricitet, nakupljen na šiljku, bude neutraliziran istoimenim ionima, a ostane samo istoimeni elektricitet.



SL. 10. ELEKTRIČKI VJETAR



SL. 11.

Granična je napetost to niža, što je šiljak bolje zašiljen, jer se kod niže napetosti uzpostavlja potrebna velika jakost polja. Osim toga ona je nešto niža, ako je na šiljku negativan, nego ako je na njemu pozitivan elektricitet. Na reakciji električkog vjetra osniva se t. zv. Wilsonovo (Gordonovo) kolo. To je lak kovni štapić, savijen kao slovo z, kojemu su krajevi zašiljeni, a gibljivo je poduprt u svom težištu na šiljastom dršku; može biti i višestruk. Spojen s polom električkog stroja dolazi u vrtnju nasuprot smjeru šiljaka (sl. 11).

Pojavi na šiljku, promatrani u mraku, popraćeni su pojavama svjetlosti. I kod toga se opaža razlika između pozitivnog i negativnog elektriciteta. Ako je na šiljku negativan elektricitet, vidi se na njegovu vrhu svjetla crvenkasta točkica, a ako je na njemu pozitivan elektricitet, s vrha šiljka odlaze razgranjeni grimizni pramenovi.

ELEKTRET je dielektričko tijelo, koje je posebnim postupkom trajno električki polarizirano u svojoj unutrašnjosti. Naziv potječe od Heavisidea, koji je prvi (1892) zamislio takvo tijelo; oživotvorio ga je mnogo kasnije (1920) japanski fizičar M. Eguchi. U stvari se radi samo o usavršenju pojava, koji je opažao Wilke već 1762 na svojoj razstavljivoj lajdenskoj boci, gdje je polarizacija stakla trajala mjesecima. Eguchi je dao elektretu pločast oblik. Raztaljena smjesa jednakih dielova karnaubina voska i prirodne smole s nešto pčelinjeg voska ili bez njega ulije se u plitku kovnu zdjelicu obloženu iznutra staniolom, pa se na površinu raztaljene smjese spusti kovna ploča također obložena staniolom. Na zdjelicu i ploču stavimo stalnu visoku napetost tako odmjerenu, da među elektrodama vlada jakost polja od 10 do 15 kV/cm, pa tu napetost održavamo, sve dok smjesa ohlađivanjem ne stvrdne. Tim je elektret formiran. Ohlađenu smjesu umotamo u staniol, koji otvaramo samo kod mjerenja.

Svježe napravljeni elektret pokazuje u početku na svojim plohama površinske naboje protivnog predznaka nego

upotrebljena napetost. Oni dolaze od prostornih naboja u blizini površine i izčežu iza nekoliko dana. Nakon toga počne se javljati na ploham električki naboj, istoimen s upotrebljenom napetosti, koji u daljnjih nekoliko dana polako naraste do nekog maksimuma, a očituje se jakim električkim poljem u blizini ploha, kad uklonimo staniolnu obvoj. Ovakvo stanje ostaje nepromijenjeno godinama, ako se elektret čuva u suhom zraku umotan u staniolu. Gustoća ovoga površinskog naboja znatno nadilazi najveće gustoće naboja na površini izolatora, koji se najjače dadu elektrizirati trenjem, a jakost električkog polja u zraku u neposrednoj blizini površine iznosi do 8/13 najveće jakosti, koja se da u zraku ostvariti.

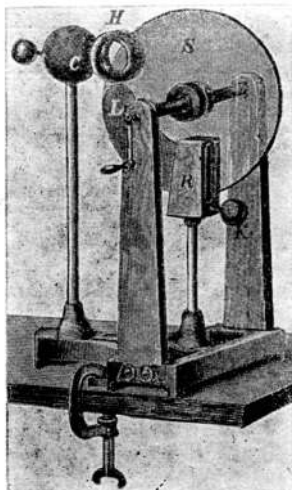
Površinski naboj elektreta privremeno oslabi ili izčezne, ako ga obasjamo rentgenskim zrakama, ako mu površinu raztalimo plinskim plamenom ili ako je ostružemo. Isto tako nestaje naboja, ako elektret dulje vremena ostavimo bez staniolnog obvoja. U svim ovim slučajevima naboj se opet vrati približno do iste visine u toku nekoliko dana, ako elektret umotamo u staniol.

Elektret obćenito smatraju električkim analogonom permanentnom magnetu. Po tom shvaćanju električko polje posljedica je permanentne orijentacije dipolnih molekula ili kristaloidnih agregata od takvih dipola u cijelom tijelu dielektrika u smjeru prvobitnog električkog polja. Možda ima kod toga neku ulogu i piezoelektricitet.

LIT. (za elektret): M. Eguchi, *Philosophical Magazine* (6) 49, 178, 1925; A. Gemant, *Phil. Mag.* (7) 20, 929, 1935; P. A. Thiessen, A. Winkel, K. Herrmann, *Physik. Ztschr.* 37, 511, 1936. M. K.

Elektrostatski strojevi ili munjila služe za dobivanje većih množina električkih naboja. Upotrebljavaju se kao školske sprave i kod naučnih izraživanja. Mogu se podijeliti u 2 skupine: 1. munjila trenjem (*Reibungselektroskopmaschine, machine électrique à frottement, frictional electric machine*); 2. munjila na influenciju (*Influenzelektroskopmaschine, machine à l'induction statique, electric influence machine*).

1. Izumiocem munjila trenjem smatraju O. Guerickea. Njegov »stroj« načinjen je oko g. 1670; sastojao se od sumporne kugle, koja se okretala oko željezne osovine. Kao tarivo služila je topla ruka eksperimentatora. Drži se, da je Newton bio prvi, koji je sumpornu kuglu zamijenio staklenom. Za sabiranje električkog naboja načinili su kasnije poseban kovni »konduktor« u obliku izoliranog valjka ili ciev (Bosc, 1742). J. H. Winkler upotrebljavao je



Sl. 1. WINTEROVO MUNJILO

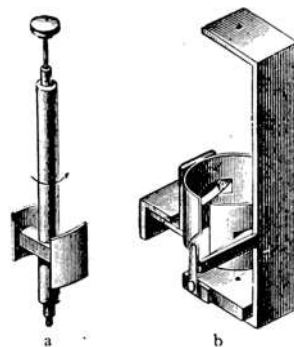
kao tarivo kožnati jastučić (1744). J. Ramsden je načinio prvo munjilo sa staklenom pločom, s kožnatim tarivom i s kovnim češljevim upijačima (1768). Slijedio je znatan broj slično sagrađenih strojeva. Sredinom 19. st. konstruirao je bečki tehničar Winter poznato munjilo, koje se u našim krajevima mnogo upotrebljavalo kao školska sprava.

Dielovi toga aparata (sl. 1) jesu: staklena ploča S, kožnato tarivo posuto cinkovim amalgamom R, kovna kugla C (konduktor), upijači H. Na tarivu učvršćena svilen krila L prijanjaju na staklenu ploču s obje strane. Vrtanjem postaje staklena ploča pozitivno električna, a tarivo i s njim vezan pomoćni konduktor K negativno električni. Djelovanjem šiljaka-upijača prelazi pozitivan naboj sa staklene ploče na konduktor C.

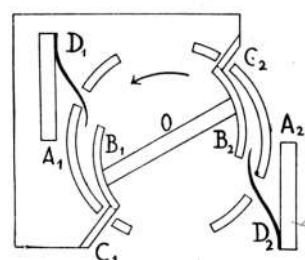
Munjila trenjem daju razmjerno malene električke naboje, rade s malenom korisnom snagom pa su već dugo vremena zamijenjena izdašnjim izvorima elektriciteta, strojevima na influenciju.

2. Poviestni predteče strojeva na influenciju jesu elektrostatski multiplikatori (duplikatori). Pomoću njih se može početni električki naboj uvećati dva ili više puta, kod čega se električka energija dobiva na račun mehaničke

radnje. Prvi duplikator potječe od izumioea elektroskopa s listićima A. Benneta (1786). Druge sprave ove vrste načinili su Nicholson (revolving doubler, 1788), Cavallo (1795),

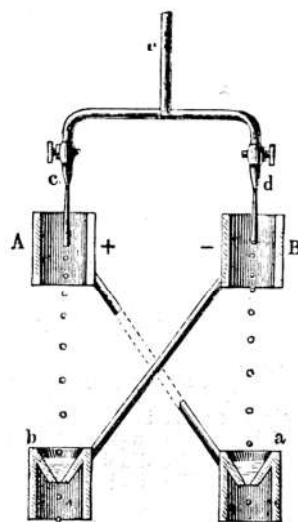


Sl. 2. THOMSONOV REPLENISHER: a induktori; b prenosilac



Sl. 3. NACRT THOMSONOVA REPLENISHERA

znatne množine elektriciteta. Thomson je upotrebljavao ovu spravu za nadoknađivanje gubitka naboja lajdenske boce, koja je bila ugrađena u njegov kvadrantni elektrometar. Sprava je služila i kod brzojava kabelom, kod registriranja atmosferskog elektriciteta i drugdje. — Sl. 4 pokazuje Thomsonov multiplikator s vodenim kapljicama (water dropping influence machine, 1860). Ulogu prenosioa električkih naboja vrše ovdje mlazovi vode, koji stalno teku. Dva vertikalna mlaza kapljica izlaze iz krajeva horizontalne ciev c e d, prolaze kroz kovne valjke A, B i padaju na kovne lievke b, a. Između A—a te između B—b načinjeni su električki vodljivi spojevi. Dama li na pr. valjku A slab početni pozitivni naboj, padat će radi učinka influencije na lievak b negativno elektrizirane kapljice. Njihov se naboj razdieli među vodičima b, B. Valjak B djeluje sada influencijom na desni mlaz, koji svojim pozitivnim nabojem pojačava slab naboj vodiča A—a. Izmjenično međusobno pojačavanje slijedi dalje, dok među vodičima (A—a), (B—b) nastane napetost, koju još izolacija dopušta. Načinjene su i sprave, kod kojih mjesto mlaza vode dolazi struja pjeska.



Sl. 4. MUNJILO S VODENIM ULAZOM (po W. Thomsonu)

Belli (1831), W. Thomson (1867) i dr. Thomsonovu spravu, nazvanu »replenisher« (nadopunivač), prikazuju sl. 2, 3. Na ploči od izolatora učvršćeni su »induktori«, t. j. dvie valjkasto svinute kovne pločice za uzbuđenje A_1, A_2 (sl. 3).

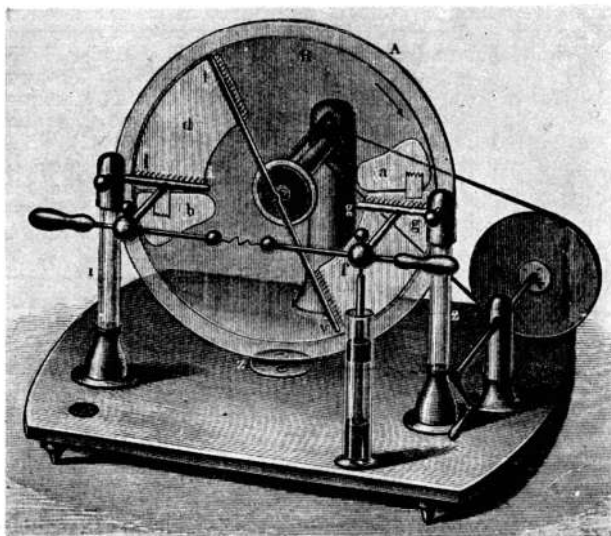
Među njima može se okretati oko osi O prenosilac (carrier) s dvie uže svinute ekscentrično postavljene pločice B_1, B_2 spojene prečkom od izolatora. Kod zakretanja označenim smjerom dotiče pločica B_1 redom pera C_1, D_2 , a pločica B_2 pera C_2, D_1 . Maleni suprotni električki naboji, predani pločicama A_1, A_2 , djeluju influencijom na pločice B_1, B_2 .

U časovima dodira prenosioa s perima C_1, C_2 , koja su međusobno vezana žicom, neutraliziraju se influencijom pobuđeni slobodni naboji, a kod dodira s perima D_1, D_2 pojačavaju se početni naboji pločica A_1, A_2 .

Proces se ponavlja, dok se na tim pločicama skupe znatne množine elektriciteta. Thomson je upotrebljavao ovu spravu za nadoknađivanje gubitka naboja lajdenske boce, koja je bila ugrađena u njegov kvadrantni elektrometar. Sprava je služila i kod brzojava kabelom, kod registriranja atmosferskog elektriciteta i drugdje. — Sl. 4 pokazuje Thomsonov multiplikator s vodenim kapljicama (water dropping influence machine, 1860). Ulogu prenosioa električkih naboja vrše ovdje mlazovi vode, koji stalno teku. Dva vertikalna mlaza kapljica izlaze iz krajeva horizontalne ciev c e d, prolaze kroz kovne valjke A, B i padaju na kovne lievke b, a. Između A—a te između B—b načinjeni su električki vodljivi spojevi. Dama li na pr. valjku A slab početni pozitivni naboj, padat će radi učinka influencije na lievak b negativno elektrizirane kapljice. Njihov se naboj razdieli među vodičima b, B. Valjak B djeluje sada influencijom na desni mlaz, koji svojim pozitivnim nabojem pojačava slab naboj vodiča A—a. Izmjenično međusobno pojačavanje slijedi dalje, dok među vodičima (A—a), (B—b) nastane napetost, koju još izolacija dopušta. Načinjene su i sprave, kod kojih mjesto mlaza vode dolazi struja pjeska.

3. W. Holtz i A. Toepler istodobno su načinili (1865) i znatno usavršili dva temeljna oblika strojeva na influenciju. Prema tome, ne treba li ili treba dati stroju početni električki naboj, razlikujemo strojeve sa samouzbuđenjem i bez njega.

Holtzov stroj ima 2 okrugle uzporedne staklene ploče A, B (sl. 5) prevučene raztopinom šelaka. Na nepokretnu ploču A s izrezanim rupama a, b prilijepljeni su papirnati oblozi c, d s nazubljenim nastavcima od ljepeke. Pred pločom B, koja se pomoću transmisije stavlja u brzu

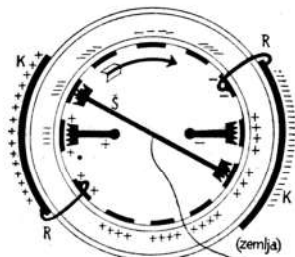


SI. 5. HOLTZOV STROJ NA INFLUENCIJU

vrtnju, nalaze se kovni češljevi-upijači *g*, *i* vezani na elektrode ili polove munjila. Ploča *A* zove se ploča uzbuđenja, a *B* kotva-ploča (Ankerscheibe, analogija s dinamo strojem). Kod stavljanja u pogon treba u svrhu uzbuđenja jedan oblog ploče *A* dotaći natrtim staklom ili ebonitom.

Sa samouzbudjenjem radi Toeplerovo munjilo, koje nema izreznih obloga na nepokretnoj ploči. Oblozi od papira i staniola imaju oblik kružnih kvadrata. Na ploči, koja se vrti, nalazi se blizu oboda red kovnih pločica s pucetima. Za tumačenje djelovanja zgodno je, da se ovaj stroj shvati kao složeni elektrofor sastavljen od 2 kolača i nekoliko poklopaca, koji rotiraju oko zajedničke osi. Ulogu elektroforovih kolača vrše oblozi na učvršćenju, a ulogu poklopaca kovne pločice na pokretnoj ploči munjila.

Neka su u shematskoj slici 6 *K*, *K* elektroforovi kolači jedan s početnim pozitivnim, drugi s negativnim nabojem. Mimo njih neka se kreće u krugu označenim smjerom nekoliko poklopaca. Nešto prije, nego što poklopac izađe iz polja jednog kolača, dolazi on u vezu s kovnim štapom *S*, koji ima na krajevima kovne češljeve ili metlice. Taj je štap u vezi s kovnom podlogom stroja (»zemljom«), a zove se poprečni ili diagonalni (pomoćni) konduktor. On neutralizira slobodne naboje poklopaca, koji nastaju influencijom. Kod daljeg zakretanja ostaje na poklopcu naboj protivnog predznaka. Djelovanjem uređaja za regeneriranje prelazi nešto elektriciteta s poklopca na drugi kolač. Kratka svinuta



SI. 6. SHEMA TOEPLEROVA STROJA

žica *R* tog uređaja spaja na čas kolač s poklopcem. Poslije toga dolazi poklopac preko češlja-upijača u vezu s jednim polom stroja. Nastavkom vrtnje sliede redom veze poklopca s drugim krajem diagonalnog konduktora, s drugim uređajem za regeneriranje i s drugim polom munjila. Na polovima skupljeni naboji mogu se sabrati na dvije priključene ladjenske boce.

4. Kod Wimshurstova stroja (sl. 7) vrte se obje ploče protivnim smjerovima jednako brzo. Na vanjskim stranama ploča, u blizini ruba, nalazi se velik broj uzkih pruga od staniola. U polovici visine ploča, nasuprot staniolnim prugama, namješteni su češljevi-upijači spojeni s polovima munjila. Wimshurstovo munjilo s pločama od ebonita vrlo je razšireno radi male osjetljivosti na atmosferske prilike i radi jednostavne konstrukcije.

Holtz je radio i s munjilom bez ikakvih kovnih obloga na pločama. Takav stroj, nazvan Holtzovim strojem druge vrste, vrlo je osjetljiv na atmosferske prilike i

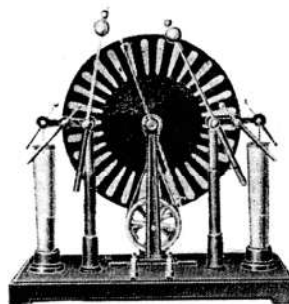
može lako zatajiti. No on je dokaz, da se dielektrikum polarizira jednako kao njegovi oblozi.

5. Sl. 8 pokazuje munjilo na influenciju, koje je konstruirao hrvatski profesor V. Pavlat (1893). Dio stroja, koji se vrti, sastoji se od 12 plosnatih limenih ciev (s dimenzijama $30 \times 3,3 \times 0,7$ cm) učvršćenih na ebonitnim kotačima. S gornje i s donje strane tiela, koje se okreće, nalaze se po dvije slipljene ebonitne ploče (30×12 cm), među koje je uložen list od staniola. Aparat ima 2 para kovnih četkica, koje na čas diraju kovne cieve. Četkice jednog para vode do staniolnih obloga, a druge 2 četkice do polova munjila. Pavlatovo munjilo radi sa samouzbudjenjem. Tumačenje djelovanja na osnovu sl. 6.

6. Strojevi na influenciju vrlo su osjetljivi na prašinu. Elektricitetom nabijene ploče munjila privlače čestice prašine i dima. Sabrane čestice smetaju radi higroskopičnosti to više, što je zrak vlažniji. Munjilo, koje u toploj prostoriji sigurno radi, može na hladnom mjestu zatajiti.

Da se postignu što jači učinci, načinjena su Toeplerova i Wimshurstova munjila s mnogo ploča. Munjilo od 60 ploča s promjerom 26 cm, zatvoreno u ormariću, u kojem je tlak zraka 4 atm., daje 30 cm duge iskre.

7. U novije vrijeme postignut je znatan napredak konstrukcijom kondenzator-munjila (Wehrsen, Wommelsdorf). U sl. 9 shematski je nacrtano Wommelsdorffovo kondenzator-munjilo, kod kojeg se okreću 4 ploče. Čvrste i pokretne ploče sliede naizmjenice poput ploča kondenzatora. Oblozi su umetnuti u masu ploča još prije procesa vulkaniziranja kaučuka. Za primanje naboja služe četkice, koje, stružući po žliebu duž ruba pokretne ploče, dolaze u kontakt s uložnim oblozima. Ebonitne ploče stroja prevučene su bakielom (umjetnim jantrom), kojemu ni svjetlost ni razvijeni ozon ne kvare izolaciju. Dosegnuta iskra iznosi oko $\frac{2}{3}$ promjera ploče. Stupanj djelovanja, t. j. omjer između korisne i potrošene snage,

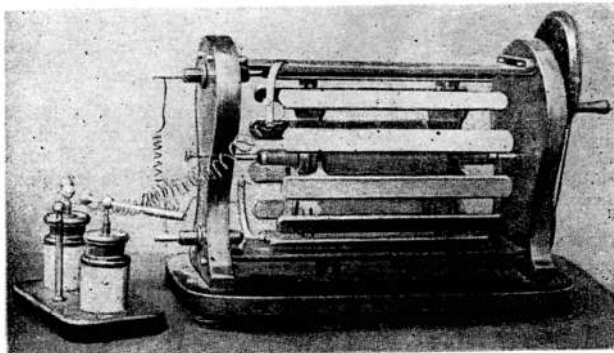


SI. 7. WIMSHURSTOVO MUNJILO

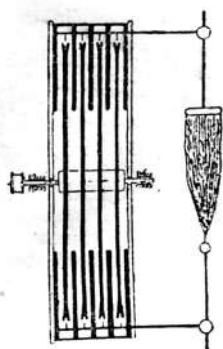
iznosi od 12 do 22%. Pod potrošenom snagom razumieva se razlika između snage, kad je motor munjila opterećen, i snage kod praznog pogona. Rezultate izpoređenja Wimshurstova i Wommelsdorffova stroja pokazuje sliedeća tablica (prema Elektrotechnische Zeitschrift, 1914, sv. 3):

	Wimshurstov stroj			Wommelsdorffov stroj		
Promjer ploče (cm)	35	45	55	41	45	55
Broj ploča, koje se okreću	2	2	2	8	1	3
Dužina iskre (cm)	15	19	22	17	29	35
Struja u miliamperima	0,04	0,06	0,07	0,11	0,45	0,60
				1,6		2,5

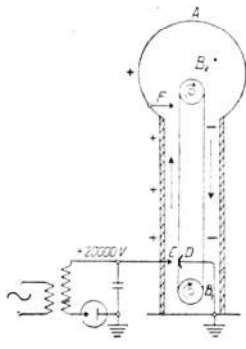
8. Elektrostatski generatori za visoke napetosti. Razvoj nove atomistike zahtievao je, da se načine uređaji za vrlo visoke električne napetosti. Jedno rješenje toga problema daje elektrostatski generator van den Graaffa (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA,



SI. 8. ELEKTROFORNI STROJ (po Pavlatu)



S. 9. SHEMA ZA WOMMELSDORFOVO MUNJILO



SL 10. SHEMA ELEKTROSTATSKOG GENERATORA (po van den Graaffu)

1931). Shema za jednu polovicu generatora nacrtana je u sl. 10. Vrpca bez kraja od svile ili čvrstog papira omata bubnje B_1 , B_2 . Bubanj B_1 stavlja se pomoću motora u brzu vrtnju. Bubanj B_2 nalazi se u velikoj šupljnoj kugli A , koja je dobro izolirana. Pozitivni naboji, koji izlaze iz šiljka C , putuju s vrpcom uvis do bubnja B_2 . Djelovanjem češlja sa šiljcima (F) prelaze ovi naboji iz unutrašnjosti na površinu kugle A . Za uzdržavanje šiljka na visokom potencijalu (na pr. 20 000 volta) služi izpravljač. Nasuprot šiljku C na drugoj strani vrpce nalazi se kovna pločica D spojena sa zemljom. Djelovanjem pomoćne negativne napetosti na dio vrpce, koji se spušta, može se dobiti dvaput jača struja nabijanja kugle A . Pomoću simetričnog uređaja za drugu polovicu generatora nabija se u isto vrijeme druga kugla na negativni potencijal. Napetost se povisuje, dok se gubitci radi nesavršene izolacije i izbijanja u atmosferu izjednačuju s dovedenim nabojima. Aparatura može raditi i bez pomoćnih napetosti.

Maksimalna struja elektrostatskog generatora (i) može se izraziti kao umnožak širine vrpce (a), brzine njezina gibanja (v) i plosne gustoće naboja na njezinoj površini (σ):

$$i = a v \sigma.$$

Kao normalnu komponentu električkog polja u blizini vrpce možemo uzeti vrijednost probojne čvrstoće zraka

obične gustoće $E = 30\,000$ volt/cm. Iz $E = \frac{30\,000}{300} = 4\pi\sigma$ slijedi $\sigma = \frac{100}{4\pi} = 8$ el. st. jed./cm² = $2,7 \cdot 10^{-9}$ kulona/cm².

Dobivamo $i = 2,7 a v \sigma \cdot 10^{-9}$ ampera (A).

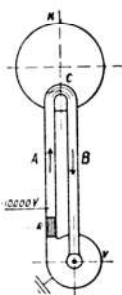
Kao praktički dostiživa vrijednost uzima se

$$\sigma' = 0,5 \sigma \text{ do } 0,7 \sigma.$$

Primjer: $a = 300$ cm, $v = 2\,000$ cm/sek,

$$\sigma' = 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ kulona/cm}^2, i = 8,4 \cdot 10^{-4} A.$$

S najvećim strojevima, uz dvie pomoćne napetosti, sa širokim višestrukim vrpčama, postigli su struju 2 do 3 miliampera. Nekoliko osobito velikih elektrostatskih generatora izgradili su u posljednje vrijeme u Americi (Cambridge, Washington, Pittsburg, Wisconsin) i Evropi (Pariz). Sl. 11 pokazuje stroj van den Graaffa i suradnici. Između pozitivne i negativne kugle u slobodnom uzduhu dobiva se napetost 5 000 000 volta. Maksimalna struja oko 1,1 miliampera. Stupanj djelovanja $\sim 40\%$. Visina generatora 14 m.



SL 12. SHEMA ZA GENERATOR SA STRUJOM PRAŠINE

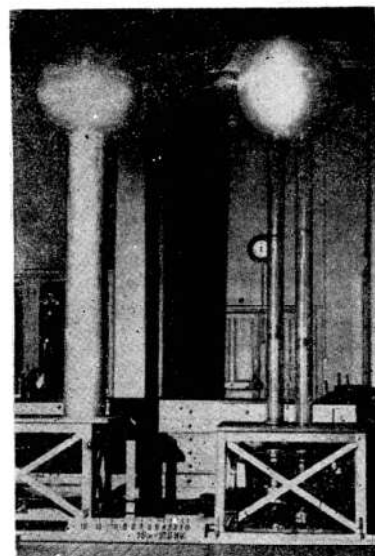
Na strojeve, koji rade na slobodnom uzduhu, znatno utječe vlaga i smeta im prašina. Dolazi lako do nutrašnjeg proboja električkih naboja, a iza toga se maksimalna napetost jako snizi. Stavljanjem stroja u zatvoren kovni oklop (»tank«) sa stlačnim zrakom postizava se visoka napetost kod mnogo manjih dimenzija. Aparatura u valjku dužine 6 m s promjerom 1,7 m kod tlaka 6 atm. daje napetost 2 000 000 volta. Stupanj djelovanja iznosi oko 20%.

G. 1937 izgradili su F. Joliot i suradnici za svjetsku izložbu u Parizu elektrostatski generator za napetost 5 000 000 volta. Visina stroja 14 m, promjer kugala 3 m. 22 m duga vrpca pomicala se brzinom 70 km na sat. Cijela aparatura zaštićena je elektrostatski golemim Faradayevim kavezom, koji je 20 m visok i 20 m širok.

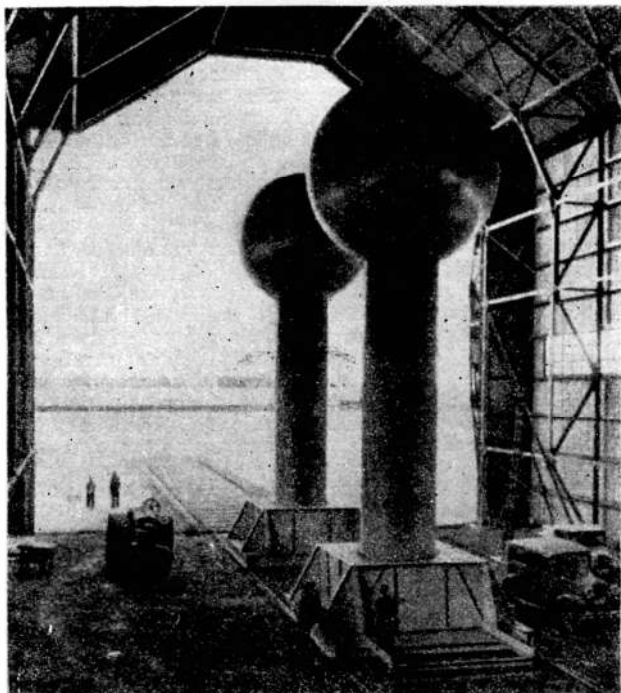
Elektrostatski generatori, kao i drugi uređaji za vrlo visoke napetosti ($\rightarrow$ ciklotron), služe u svrhe atomske fizike za dobivanje umjetno-radioaktivnih elemenata, brzih protona, deutona i sl.

9. M. Pauthenier i gđa Moreau-Hanot konstruirali su elektrostatski generator, kod kojeg električke naboje prenosi struja prašine (générateur à courants gazeux, 1937). Shemu stroja daje sl. 12. Ventilator V tjera kroz zatvoreni krug cijevi $VACB$ uzduh i prašinu. Prašina ulazi najprije u prostor multicelularnog ionizatora R . Taj je prostor razdijeljen u uzke šesterostrane kanale s kovnim stijenama. Ionizacija prašine iz-

vodi se procesom električkog izbijanja, koji se označuje kao pojav »krune« (effet couronne, Koron-entladung). Na izoliranim vrlo tankim žicama u kanalima ionizatora, koje su spojene s negativnim polom dovoljno velike napetosti, opaža se niz svijetlih točki-ća nazvan »kruna«. Čestice prašine putuju iz ionizatora kroz staklenu cijev A u centrifugalni kolektor C . To je svinuta cijev s nutrašnjim pregradama, kojima ionizirane čestice prašine predaju potpuno svoje naboje. Kroz drugu staklenu cijev B vraća se prašina u ventilator. Kolektoru pre-



SL 13. ELEKTROSTATSKI GENERATOR S PRAŠINOM



SL 11. ELEKTROSTATSKI GENERATOR (van den Graaff i suradnici)

dani naboji prelaze na površinu velike šuplje kugle K . Kao druga elektroda služi jednako velika kugla spojena sa zemljom. Napetost generatora zavisi o brzini struje zraka, o stupnju ionizacije, o polumjeru kugle K , o obliku kolektora, a ne zavisi o veličini čestica prašine. Upotrebljava se pepeo od ugljena, kod kojeg najveće čestice imaju promjer 50μ .

Sl. 13 pokazuje generator, koji daje napetost 1 200 000 volta i struju 0,12 miliamp. Brzina zračne struje 50 m/sek, promjer kugle 75 cm. Za izložbu u Parizu 1937 sagrađeni generator daje napetost 1 800 000 volta.

LIT.: L. Graetz, *Handbuch der Elektrizität u. d. Magnetismus* I., 1918; V. Pavlat, *Nastavni Vjestnik* I., 1893; A. Bouwers, *Elektrische Höchstspannungen*, 1939; *Journal de Physique et Radium* VII., 8., 193., 1937.

Elektrostrikcija se očituje kao promjena volumena dielektričkog sredstva u kondenzatoru, kad se ovaj stavlja na stalnu napetost. Prema tomu, uvećava li se dimenzija dielektričkog sredstva u smjeru električkog polja ili umanjuje, uzima se, da je e. pozitivna, odnosno negativna. U skladu s Maxwellovom teorijom elektriciteta zavisi e. o dielektričkoj konstanti i o elastičnosti sredstva. Ovaj pojav postoji kod čvrstih, tekućih i plinovitih izolatora. Na temelju termodinamičkih razmatranja izvodi se formula

$$\Delta V_{p,T} = -V \left(\frac{d\epsilon}{dp} \right)_T \frac{E^2}{8\pi}$$

u kojoj ΔV znači promjenu volumena V kod stalnog tlaka p i stalne temperature T , E jakost električkog polja, ϵ dielektričku konstantu.

Kao prvi opažači e-e spominju se Fontana (1831), Volpicelli (1856) i Govi (1866). Prva kvantitativna izražavanja na staklu izvodio je Quincke (1880). U svrhu demonstracije izveo je Röntgen 1880 pokus s napetom prugom od kaučuka, kojoj su međašne poprečne plohe bile prevučene grafitom. Kad su grafitnim oblozima doveli električku napetost od polova munjila, pruga se raztegla po pilici za 1/50 dužine.

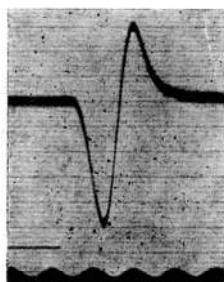
Jak pojav e-e pokazuju piezoelektrički leđci (kvarc, turmalin i dr.). Iz kvarcova leđca zgodno izsječena pločica, položena među kondenzatorske obloge električkog kruga titranja, može se uzбудiti na jako longitudinalno titranje. Promjena obujma ovih leđaca razmjerna je s prvom potencijom jakosti električkog polja. Piezoelektrički leđci služe za uzbuđenje ultrazvučnih titraja s vrlo stalnom frekvencijom u tekućinama i plinovima ($\rightarrow$ akustika 3; $\rightarrow$ Chladni). Primjena u tehnici: ura s kvarcom; kvarcstabilizator; kvarc-rezonator.

Djelovanje e-e pokazuju leđci Seignetteove soli ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) pojav, koji odgovara histerezi feromagnetne tvari. Kod određenog područja frekvencija imaju ovi leđci dielektričku konstantu $\epsilon > 2 \cdot 10^4$. Kod toga se odnošaj između električke polarizacije i gustoće električkog naboja za prazan kondenzator predoduje jednom krivuljom histereze.

LIT.: G. Mie, *Lehrbuch d. Elektrizität u. d. Magnetismus*, 2. izd., 1941; Müller-Pouille, *Lehrbuch der Physik*, 11. izd., IV/1., 1932. D. P.-č.

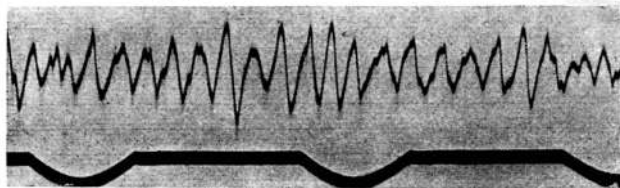
II. ELEKTRIKA U MEDICINI: Elektricitet mišića, 730: Elektrode za podraživanje, 730. Elektrodiagnostika, 731. Elektrofiziologija, 731. Elektrogimnastika, 736. Elektrokardiografija, 736. Elektroakustika, 737. Elektrokoagulacija, 737. Elektroliza u liječenju, 737. Elektromasaža, 737. Elektronarkoza, 737. Elektropatologija, 737. Elektroterapija, 737.

Elektricitet mišića. Zdrav, potpuno miran i mlohav mišić ne pokazuje nikakvih električkih potencijala, ako razna mjesta njegove površine spojimo s osjetljivim galvanometrom. No ako s galvanometrom spojimo jedno mjesto zdrave površine i jedne ozliedeno mjesto mišića, pokazuje galvanometar tok slabe električke struje s napeću do 0,05 volta i takvog smjera, da je ozliedeno mjesto (presjek) električki negativno prema površini. Ta se električka pojava zove struja mirovanja ili demarkaciona struja. Električke struje mišića možemo ustanoviti i tako, da dva zdrava mjesta mišića, ili jedno mjesto mišića, a drugo u njegovoj okolini, spojimo s galvanometrom, a mišić počne raditi, pa se njegova vlakna makar i najmanje napnu ili skrate. Takve struje zovemo akcionim strujama, jer su u vezi s radom ili akcijom. Dok je struja mirovanja gotovo stalna i dok vrlo polagano mjenja svoju napetost tokom čitavih sekunda ili minuta, akcione struje su kratkotrajne, a oblik im zavisi o vrsti mišićnog rada i o mjestu odvođenja. Tako možemo ustanoviti jednostavnu jednosmjernu struju



SL. 1. DVOFAZNA AKCIONA STRUJA MIŠICA

trajanja od nekoliko tisućinki sekunde i napetosti od nekoliko die-
lova milivolta do nekoliko milivolta kao najjednostavniji oblik akcione struje (jednofazna akciona struja); od tog oblika imamo preko oblika, kod kojeg sliede jedna iza druge dvie kratkotrajne struje protivnog smjera i jednakog trajanja (dvo-
fazna akciona struja; sl. 1), sve prielaze do oblika s mnogo promjena napetosti, smjera i trajanja, te tako nastaje nepravilna izmjenična struja (sl. 2). Trajanje akcione struje jednog mišićnog vlakna zavisi o njegovoj vrsti i brzini rada. Gladki mišići, koji rade polagano, pokazuju akcione struje u trajanju od nekoliko desetaka sekunda, prugasti mišići proizvode te kraće akcione struje, što brže mogu raditi. Akcione struje najbržih mišića traju tek nekoliko tisućinki sekunde. Budući da su naši tjelesni mišići sastavljeni iz mnogo vlakana, nastaje kod svake hotimične kretanje mnogo akcionih struja pojedinih mišićnih vlakana. Te se struje zbrajaju i interferiraju međusobno, pa je rezultanta uvijek nepravilna izmjenična struja s napeću od nekoliko milivolta i 20 do 120 izmjena smjera u sekundi. Broj izmjena smjera (frekvencija) zavisi o jačini napinjanja mišića: kod sasvim slabog je oko 20, a kod najjačeg do 120 u sekundi, dok se visina električkog potencijala mjenja mnogo manje. No i sama pomisao na mišićni rad ili predočba o tome, da smo pokrenuli jednu mišićnu grupu ili izveli neku kretanju, proizvodi u dotičnim mišićima akcione struje, slične kao i samo napinjanje ili faktični rad, samo slabijeg intenziteta i manje frekvencije. Takve iste struje proizvode i nehotične i reflektorne pro-



SL. 2. AKCIONA STRUJA HOTIMICNOG NAPREZNJA — IZMJENIČNA STRUJA

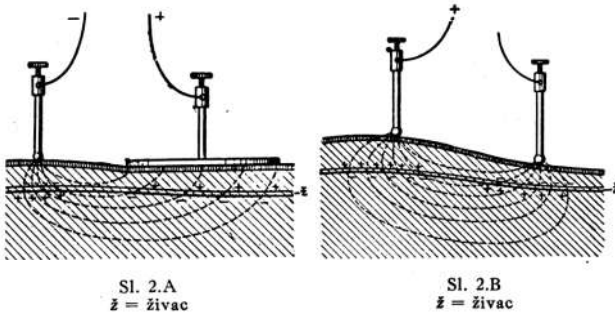
mjene napetosti mišića, koje se u našim mišićima stalno zbivaju. Prema tome naši mišići stalno proizvode slabe akcione struje i onda, kad su prividno sasvim mirni. Akcione struje nastaju uvijek nešto prije nego sam vidljivi početak napinjanja ili skraćivanja mišića te su bitni sastavni dio samog uzbuđivanja mišića, t. j. prielaza iz stanja mirovanja u stanje rada ($\rightarrow$ elektrofiziologija). Postoji i stezanje mišića usljed kemijskih upliva bez akcionih struja. Dok akcione struje naših mišića pokazuju električke potencijale od nekoliko milivolta te su samo popratna pojava uz mišićni rad, mogu električki organi nekih riba ($\rightarrow$ ribe), koji su nastali posebnom pretvorbom iz mišića, proizvesti električke napetosti od nekoliko stotina volta mjesto mehaničkog mišićnog rada.

R. H.

Elektrode za podraživanje su naprave, kojima se u fiziologiji služimo za podraživanje mišića i živaca električnom strujom. U svojoj biti služe ove naprave tome, da se preko njih i preko podraženog organa premosti i zatvori krug električne struje. Kod neposrednog podraživanja nekog organa služimo se obično *Cl. Bernardovom* elektrodom za podraživanje (sl. 1), kod koje su šiljci elektroda, koje postavimo u dodir s organom, građeni obično iz platine. Da bi se podraženo mjesto što više ograničilo ili proširilo, dadu se spomenuti šiljci približiti odnosno razmaknuti jedan od drugoga. Kod posrednog podraživanja električnom strujom, t. j. podražujemo li neki mišić ili živac preko kože, to krivulje toka električne struje prolaze i kroz okolno tkivo ulazeći i izlazeći iz mišića ili živca, koje želimo podražiti. Ako su elektrode na mjestu ulaza struje u kožu jednake veličine, onda krivulje toka struje teku, kako je prikazano u sl. 2B. — Želimo li u ovim slučajevima električki podražaj u organu



SL. 1.

Sl. 2.A
ž = živecSl. 2.B
ž = živec

što više ograničiti, služimo se elektrodama, kojih su dodirne plohe s kožom različite veličine. Kako je gustoća krivulja toka struje veća kod elektroda s manjom dodirnom plohom (sl. 2A), to se i podražaj električkom strujom ograničuje na podražni dio pod elektrodom s manjom dodirnom plohom (potanje → elektrofiziologija). P. J.

Elektrodiagnostika je nauka, koja se bavi izpitivanjem razlika u reakcijama na električki podražaj sa svrhom, da se ustanovi bolest ili oštećenje pojedinih organa, sistema ili čitavog organizma. Izpitivanje se vrši uglavnom na motornim živcima i mišićima. Kadkada se vrše pretrage senzibilnih i vazomotornih živaca, te se izpituje i otpor struje u koži. Ponekad se izpituju i reakcije osjetila, no te su pretrage od male praktične koristi. Kod pretrage motornih živaca i mišića izpitujemo ili direktno dražeći mišić ili indirektno dražeći njegov motorni živec. Pretrage izvodimo jednom aktivnom elektrodom veličine 1.5 do 3 cm u promjeru, koja se nalazi na dršku s prekidačem, te jednom inaktivnom elektrodom veličine 10×15 cm. Aktivnu elektrodu stavljamo na motoričku točku živca ili na mišić, koji pretražujemo, dok inaktivnu elektrodu mećemo uvijek na isto mjesto, i to ili na sredinu leđa ili prsiju. Pretrage vršimo galvanskom i faradičkom strujom te izbijaanjem kondenzatora. Kod oštećenja perifernog neurona nastupa t. zv. degenerativna reakcija (Entartungsreaktion). Kod elektrodiagnostičkih pretraga potrebno je ponekad odrediti t. zv. kronaksiju, t. j. vrijeme, koje je potrebno,

AKCIONE STRUJE ZA VRIEME
SKRACENJA DVOGLAVOG
MIŠIĆA.
(W. Holzer, Physik. Medizin)

da se minimalni trzaj mišića izazove dvostrukom jakošću galvanske struje, koja je bila upravo dovoljna, da izazove jedva vidljiv trzaj. Na koncu, u novije doba služimo se u elektrodiagnostici i grafičkim prikazom akcionih struja mišića, t. zv. elektromiografijom. J. Bu-k.

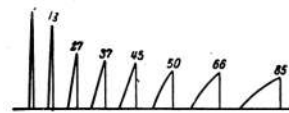
Elektrofiziologija je dio fiziološke ili obće biološke nauke, koji proučava odnos između živog organizma i elektriciteta. Prema tome se bavi s jedne strane promatranjem pojava, koje nastaju, ako električka energija djeluje na živi organizam ili njegove organe, a s druge strane električkim pojavama, koje nastaju u samom organizmu. E. počinje, kao i čitava moderna nauka o elektricitetu, s pokusom Galvanija, koji je g. 1776 otkrio, da se žablji kraci, obješeni bakrenom žicom o željeznu ogradu, trgnu, ako se slobodnim krajem dotaknu ograde. Galvani je mislio, da je podrijetlo tog trzaja u električkoj napetosti, koja nastaje u živom tkivu, i da je time otkrio životni elektricitet. Volta je to mišljenje izpravio i dokazao, da uzrok električkoj struji u tom slučaju nije život tkiva, nego dodir dviju kovina s tekućinom (elektrolitom) tkiva. Iz Voltina tumačenja toga pojava razvila se posebna nauka, kao što i primjena elektriciteta, dok su stvarno postojanje struja u živom organizmu kasnije dokazali A. v. Humboldt, Matteucci i Du-Bois-Reymond.

Električke pojave u živom tkivu možemo podijeliti u dvije skupine: 1. pasivno električke pojave, koje nastaju, ako izvana privedena električka energija djeluje na živo tkivo, i 2. aktivno-električke pojave, t. j. nastajanje električke energije u organizmu ili organima bez dovodjanja električke energije izvana. Kod pojava prve skupine promatramo organizam kao potrošača, a kod pojava druge skupine kao proizvađača električke energije.

I. PASIVNO-ELEKTRIČKE POJAVE. Električka energija, dovedena izvana u organizam ili u neki organ u dovoljnoj količini, s dovoljnom napetošću ili s dovoljnom jakošću i u zgodnom obliku, djeluje kao podražaj i uzbuđuje živu tvar. Organi prelaze iz stanja mirovanja u stanje djelovanja: živec se uzbuđi i vodi uzbuđenje, mišići se skraćuju, žlijezde izlučuju, u oku nastaje osjet svjetla, u nutarnjem uhu osjet vrtoglavice i šuma, živčani centri osjećaju ili daju impulse i t. d. Ti se učinci mogu proizvesti i mehaničkim, toplinskim, kemijskim i drugim podražajima, ali električko podraživanje najbolje oponaša spontana uzbuđenja i daje se najbolje mjeriti. Radi toga se električko podraživanje u pokusima i najviše upotrebljava i najbolje je proučeno, osobito na živcima. Električko podraživanje izvodi se: a) stalnom strujom istoga smjera i različitog trajanja, od nekoliko sekunda do nekoliko minuta; b) pojedinim udarcima električke struje različitog oblika i trajanja, kao što su udarci induktora, izbijanje kondenzatora, prekidanje stalne struje s pomoću mehaničkih ili elektronskih prekidača ili slično; c) izmjeničnim strujama raznog oblika i frekvencije. Takvim podraživanjem ustanovljeni su ovi osnovni zakoni podraživanja:

A. 1. Stalna struja podražuje samo na mjestu, gdje ulazi u tkivo ili izlazi iz njega, dakle u području elektroda, anode (+), gdje ulazi, i katode (—), gdje izlazi, i to obično samo u času otvaranja i zatvaranja strujnog kruga. To je zakon polarnog podraživanja po Pflügeru. Najslabije struje podražuju samo u času zatvaranja, i to na katodi (katoda-zatvor KZ), nešto jače struje i u času otvaranja na anodi (anoda-otvor AO), još jače struje i na anodi kod zatvora (AZ), a najjače i na katodi kod otvora (KO). Prema tomu, s obzirom na jakost struje, kod normalnoga tkiva nastaje uzbuđenje ovim redom: KZ-AO-AZ-KO (Waller).

2. Osim samog podraživanja proizvodi stalna struja elektrotonus, t. j. promjene podražljivosti i vodljivosti u tkivu, u prvom redu u živcu. Te se promjene sastoje u povećanju podražljivosti i vodljivosti u području katode od časa, kad se struja zatvori, kroz sve vrijeme, dok struja teče (pozitivni katelektrotonus) i u istovremenom smanjenju istih svojstava u području anode (negativni anelektrotonus). U času, kad se prekine struja, okreću se te pojave tako, da nastaje smanjenje podražljivosti i vodljivosti ondje, gdje je bila katoda, a povećanje na mjestu anode. Elektrotonus je to jači, što je jača struja, i ako je ona dovoljno jaka, traju te promjene još nekoliko sekunda, kad je već struja prestala teći. Umanjenje vodljivosti na anodi za vrijeme toka struje ili na katodi

Sl. 1a. KRATKOTRAJNI
UDARCI STRUJE S JEDNA-
KIM DJELOVANJEM.

Visina označuje napetost, širina
trajanje, brojke množinu
elektriciteta

Sl. 1b. OVISNOST KORIST-
NOG VREMENA O OBLIKU
ELEKTRICKOG PODRAŽAJA.
Crtano je koristo vrijeme; ono
je najkraće kod elektr. podra-
žaja izbijanjem kondenzatora (a
i b) i postaje sve veće kod
podražaja, koji postepeno rastu
do svoje najveće jakosti (e)

iza prekida može biti tako jako, da kroz to mjesto živca ne može proći uzbuđenje, kao da je živec prekinut (blokada živca).

3. Vrlo polagano, postepeno pojačavanje u početku sasvim slabe struje ne dovodi do uzbuđenja živog tkiva.

B. Podraživanje pojedinačnim udarcima električke struje pokazalo je, da nastup uzbuđenja ne ovisi o količini elektriciteta, koji puštamo da djeluje na tkivo, nego o obliku električkog podražaja, o njegovu trajanju i visini električkog potencijala, a osim toga mnogo i o vrsti tkiva, koje se podražuje (v. sl. 1). Tako na pr. prugasti mišići kralježnjaka i njihovi živci, dakle i čovječji, reagiraju na pojedinačne udarce inducirane struje, koji traju samo nekoliko tisućinki sekunde, i to prije na udarce kod otvora nego kod zatvora, dok gladki mišići i njihovi živci na njih ne reagiraju, nego treba da tok struje kroz njih bude znatno duži. Ako se pokuša odrediti najmanji intenzitet struje, koji je potreban za uspješni podražaj, ili najmanju električku napetost k tome, onda svakom tom intenzitetu ili napetosti uvijek pripada i određeno najkraće vrijeme, u koje mora struja toga najmanjeg intenziteta teći kroz tkivo,

da nastane uzbuđenje. Takvo vrijeme zove se *korisno vrijeme*, a značajno je za svaku vrst živoga tkiva. Još bolje nego korisnim vremenom mogu se značajna svojstva nekog tkiva odrediti time, da se ispita njihova *kronaksija* (Chronaxie Lapicque, 1910; *χρόνος* »vrijeme«, *ἀξία* »vriednost«). Kronaksija je najkraće vrijeme, u koje treba kroz tkivo teći električna struja s dvostrukom reobazom, da nastane upravo (najslabije) zamjetljivo uzbuđenje. Reobaza (*ῥέω* »tečem«, *βάσις* »osnova«) je najmanja napetost električne struje, koja još upravo podražuje kod dugog toka struje. Najprije se određuje reobaza dugim tokom slabe struje, a zatim se reobaza podvostruči povišenjem napetosti ove električne struje na dvostruko, te određuje kronaksija s pomoću izbijanja kondenzatora ili s pomoću prekidača, koji puštaju kroz tkivo stalnu struju za točno određeno vrijeme. Reobaza je promjenljiva i ovisi o prilikama pokusa i o slučajnostima, dok je kronaksija vrlo stalna i značajna za svako normalno tkivo. Kod udaraca struje u trajanju kronaksije količina je električke energije (produkt vremena s kvadratom napetosti $E = t \cdot V^2$) najmanja. Baš ova pojava, da je kod električkih struja o trajanju kronaksije moguće podražiti tkivo s najmanjom količinom električke energije, kao i to, da su vlastite struje tkiva (vidi dalje) vremenski vrlo slične kronaksiji, daje kronaksiji veliku vrijednost. Kronaksija je to kraća, što peko tkivo brže reagira. Polazeći od biljaka preko gladih mišića nižih životinja, mekušaca, do motoričkih živaca i mišića sisavaca nalazimo kronaksije u trajanju od nekoliko desetaka sekunda do dijelova tisućinke sekunda. Prema Lapicque i Bourguignonu postoji *izokronizam*, t. j. jednakost kronaksije između mišića i njegova motoričkog živca, pa se uzbuđenje može u organizmu prenositi od jednog diela na drugi samo onda, ako imaju slične kronaksije. Čovječji mišići mogu se prema Bourguignonu svrstati u tri grupe s kronaksijama 0,06 do 0,14, zatim od 0,16 do 0,34 i od 0,40 do 0,70 s (σ = tisućinka sekunde). Kronaksije živaca i mišića mijenjaju se kod djelovanja lijekova i otrova, te kod bolesti mišića i živaca tako, da se može svaka zasebno produžiti ili skratiti. Unutar živčanog sustava imaju pojedini dijelovi svoju osnovnu kronaksiju, koja se može mijenjati pod utjecajem pobuda iz viših dijelova ili s periferije i tako prilagoditi kronaksiji onih dijelova, u koje treba provesti uzbuđenje (kronaksija subordinacije).

C) Djelovanje izmjeničnih struja ovisi o broju izmjena u jednoj sekundi. Već prema vrsti tkiva djeluje najjače, t. j. s najmanjom napetošću struje, s različitim frekvencijom. Čovječji živci i mišići najosjetljiviji su za izmjenične struje od 80 do 200 Hz. Struje s manjim brojem izmjena djeluju već nešto slabije. Kod 50 Hz. (obična izmjenična struja električke centrale kod nas) potreban je za 10 % veći intenzitet nego kod 100 Hz, kod 3 000 Hz za 100%, a kod 10 000 Hz potreban je intenzitet struje 10 puta veći nego kod 100 Hz, da proizvede jednako djelovanje. Prema Nernstu djelovanje struje je razmjerno s njenom jakošću, a obrnuto razmjerno s drugim korijenom iz broja izmjena: $D = \frac{i}{\sqrt{Hz}}$.

Ovo pravilo vrijedi u određenom području. Iz ovih pojava daje se zaključiti, kako zapravo djeluje električka energija u organizmu. Tkiva tiela sastoje se od stanica, kojih se stvar sastoji od bjelancevina i otopina soli, elektrolita. Stanice su međusobno odijeljene membranama, koje ne propuštaju jednako sve ione elektrolita, nego samo ili pozitivno nabijene, katione, ili samo negativno nabijene, anione. Dovođenjem elektriciteta u tkivo nastaje u stanicama električko polje, i u tom električkom polju putuju ioni elektrolita prema polovima. Kako anioni i kationi putuju različitim brzinama, i kako membrane ne propuštaju pojedine ione, to na njima nastaje poremećenje ionske ravnoteže i nakupljanje aniona na jednoj i kationa na drugoj strani. Ovo poremećenje ionske ravnoteže u samoj stanici, osobito, prema mišljenju većine fiziologa, nakupljanje kationa, uzrok je uzbuđenju žive tvari. Nakupljanju iona na staničnim granicama opire se difuzija, sila, koja nastoji sve ione jednolično porazbacati i razdijeliti po čitavoj otopini. Do poremećenja ravnoteže će doći, ako je električko polje dosta jako, da nadvlada difuziju i da nakupi dovoljno istovrstnih iona na jednomo mjestu. Budući da i brzina difuzije raste s povećanjem razlike u koncentraciji iona, dakle je proporcionalna s ja-

činom električkog polja, to struje, koje polagano povećavaju svoju jakost, ne će djelovati, jer ne mogu dosta brzo nakupiti istovrstnih iona na jednom mjestu, da time izazovu toliko poremećenje koncentracije iona, koliko je potrebno za uzbuđenje. Isto tako izmjenične struje s velikim brojem izmjena ne će djelovati kao podražaj, jer svaka izmjena smjera struje tjera ione u drugom pravcu i time poništava djelovanje prijašnje faze struje, a za vrijeme jedne faze, ako ona traje prekratko vrijeme, na pr. samo $\frac{1}{200.000}$ sek. kod 100 000 Hz, ne dolazi do poremećenja ionske ravnoteže, a prema tome ni do uzbuđenja, jer ioni u stanici ne dospiju prevaliti dovoljan put. Poremećenje ionske ravnoteže unutar stanice i nakupljanje iona na granicama stanice ili na granici dvaju dijelova stanice s različitim građom i prema tome različitim propustljivošću ili topljivošću za pojedine ione, uzrok je i stvaranju električkog potencijala unutar samog tkiva (vidi dalje). Ako je to nakupljanje nastalo pod djelovanjem električke struje, onda ga nazivamo polarizacijom.

Živo tkivo pokazuje prema prolazu električke struje kroza nj pojave električkog otpora, električke polarizacije i električkog kapaciteta, koji su različiti prema vrsti struje, koja djeluje na tkivo, i prema vrsti tkiva. Najveći kapacitet pokazuje koža, i to od 0,01—0,05 μF za 1 cm^2 . Isto tako pokazuje koža i najveći otpor, koji je veoma promjenljiv. Otpor čitavog tiela može iznositi od nekoliko tisuća ohma do samo 200 oma, već prema vrsti struje i prema mjestu dodira s vodičem. Radi kapaciteta kože, koji se nabija u samom početku prolaza struje kroz tkivo, struja je u prvoj desetstisućinki sekunde mnogo puta jača nego nešto kasnije; u toku prvih nekoliko tisućinki sekunde razvija se polarizacija, i radi nje se naglo smanjuje dovedena stalna struja, ako napetost stalne struje nije prevelika, čak i na samih 10% početne jakosti. Kod velikih napetosti nastaje probijanje polarizacijom nastalih slojeva, i otpor naglo pada.

Radi pojave električke polarizacije, koja nastaje različitim brzinom, već prema vrsti tkiva, nastaje za neko vrijeme nakon početka prolaza struje nova ravnoteža iona u stanici, i stalna struja djeluje samo kod zatvora, kad dovodi do poremećenja ionske ravnoteže, ili u času otvora, kad se počinju izjednačivati strujom i polarizacijom nastale promjene u rasporedu iona. Izmjenične struje manje frekvencije, do nekoliko tisuća Hz, djeluju kod svake izmjene smjera kao novi podražaj, jer svakom izmjenom ukidaju polarizaciju prijašnje faze, a u svakoj fazi imaju ioni vremena da dosta promijene svoj položaj u stanici. Slabe električke struje djeluju dakle kao podražaj na organizam i uzbuđuju na rad organe, kroz koje prolaze. Potreban intenzitet struje za podražaj kod pojedinih tkiva vrlo je različit, iznosi nekoliko milijuntinki ampera do dijelova tisućinke ampera.

Jače električke struje ne samo da podražuju tkivo, nego ga mogu oštetiti i usmrtiti čitav organizam. Kod njihova djelovanja na čitav organizam dolazi u prvom redu u obzir djelovanje na centralni živčani sustav i na srce. Ako kroz vodu, u kojoj se nalaze životinje (pražniti, mekušci, račići ili ribe) puštamo stalnu električku struju, postavljaju se te životinje u određen položaj prema smjeru struje ili čak putuju prema jednom polu. Ta se pojava naziva *galvanotaksija*. Životinje s uzdužnim središnjim živčanim sustavom, kao na pr. ribe, postavljaju se glavom prema anodi. Jače struje, koje teku smjerom od glave prema repu (silazna struja), dovode do *galvano-narkoze*, a obratnog smjera (uzlazna struja) uzbuđuju. Kod još veće jakosti uzlazna struja proizvodi obćenite grčeve i podpunu ukočenost. Te pojave nastaju kod sisavaca, pa i kod čovjeka, kad stalna struja prolazi uzduž mozga i hrbtenice. Galvano-narkoza upotrebljava se za omamljivanje životinja, na pr. svinja, na klaonicama prije klanja. Kod čovjeka se galvano-narkoza ne primjenjuje radi opasnosti djelovanja struje na živčane centre, važne po život.

Razlika između zamjetljive i štetne jakosti struje dosta je velika. Kod istosmjerne električke struje potrebna je, da je osjetimo na koži, prosječno napetost od najmanje nekoliko volta, koja kroz otpor kod kože šalje struju jakosti od 0,2 do 0,5 mA. Na jeziku možemo osjetiti i napetost od dijelova volta (džepna baterija). Kod izmjenične struje 50 Hz (struja iz centrale) dostaje napetost od 2 do 3 volta, kadkad i manje (ako je dovodimo kroz vlažnu kožu na prstima), da proizvede podražaj osjetnih organa kože ili

nehotično stezanje mišića djelovanjem na motoričke živčane okrajke. Radi vrlo različitog otpora kože jakost je struje uz istu napetost vrlo promjenljiva, pa zato struje veće napetosti (kod izmjenične struje kadkad i samo 50 volta) mogu uz posebne prilike i usmrtiti. Kod slučajnog dodira sa vodičem ovisi djelovanje električne struje o tome, kroz koje dijelove tiela prolazi, kako je jaka i kako dugo traje. Suha koža, osobito gruba na dlanu i prstima, daje velik otpor struji, te dodir vodiča izmjenične struje, pa i 220 volti napetosti, obično uzrokuje nagli trzaj sveg mišića, kroz koje je prošla. Izmjenična struja naime nagoni mišiće na jaki grč, jer ih podraži sa sto podražaja u sekundi. Taj nagli trzaj najčešće je uzrokom, da se prekine dodir s vodičem struje, i djelovanje struje prestane, a da jakost struje i njezino trajanje nisu bili dovoljni, da oštete tielo. No vlažna koža (zbog znoja ili vodom ovlažena) daje mnogo puta manji otpor nego suha, pa ako netko na pr. stoji na vlažnom podu kupaoine ili u samoj kadi i mokrom rukom dotakne električni vodič, struja će proći kroz tielo tolikim intenzitetom, da može nastupiti smrt. Ako jaka izmjenična struja prolazi kroz tielo samo perifernim živcima i mišićima, nastaje grč svih pogođenih mišića te osjet boli radi grča mišića i radi podražaja osjetila za bol u tom dijelu tiela. No ako struja prolazi na pr. kroz obje ruke, to na svom putu zahvaća produžje srca, pa može nastati kljenut srca zbog jakog podražaja živca, koji obustavlja njegov rad (N. vagus), ili zbog treperenja mišića srčane klietke. To nastaje najčešće kod jakosti struje od 25–100 mA, i ako vrijeme prolaza struje traje najmanje jednu sekundu. Ako struja prolazi kroz lednu moždinu ili kroz dio glave, gdje se nalaze pokretni živčani centri, nastaje tonički grč mišića čitavog tiela.

Prolaz struje kroz koru velikog mozga uzrokuje pomućenje ili prestanak svijesti, već prema jakosti i trajanju struje, ali radi djelovanja na moždanu koru i na dublje dijelove mozga mogu nastati i promjene važnih tjelesnih funkcija, u prvom redu krvnog tlaka. Prolaz struje kroz stražnji dio lubanje dovodi do kljenuti centra za disanje i drugih centara, važnih za život, pa nastupa smrt. Vrlo jake struje, od nekoliko ampera dalje, ne oštećuju srce trajno, nego ono stoji samo, dok struja prolazi kroza nj, a kasnije opet može ili spontano ili na podražaj početi radom. Smrt zbog nezgoda od električne struje nastupa dakle ili radi treperenja srca ili radi kljenuti živčanog centra za disanje samo kod struja određene jakosti.

Iste pojave i oštećenja kao izmjenična struja proizvodi i stalna struja, ali njena jakost mora biti 4 puta veća.

Radi svog djelovanja na živčani sustav upotrebljava se izmjenična struja određene jakosti (nekoliko desetinki mA do nekoliko mA) i za izazivanje t. zv. *elektro-šoka* kod liečenja nekih duševnih bolesti; mienjanjem jakosti struje i njena trajanja (po nekoliko sekunda) daje se proizvesti razno djelovanje: od časovitog pomućenja svijesti do potpune nesvjestice i grčeva. Struja se pušta kroz glavu.

Ondje, gdje struja naiđe na otpor, pretvara se električka energija u toplinu. Zato mogu na koži nastati opekline, jer je ona mjesto najvećeg otpora. No smrtnost struje i opekline ne stoji u vezi. Uz teške opekline može čovjek ostati živ, ako put struje kroz tielo nije dovoljno jakošću pogodio srce ili centar disanja, a drugi put može nastupiti smrt bez ikakve opekline na koži, ako je otpor kože bio malen. Struje visoke napetosti od nekoliko tisuća volta stvaraju gotovo uvijek opekline na koži, i to radi preskakanja iskara prije samog dodira ili kod prekida dodira s vodičem. Bar jedan dio električne struje, koja prolazi kroz tielo, pretvara se uvijek u toplinu. Količina topline jednaka je umnošku otpora i kvadrata jakosti struje $q = i^2 W$. Izmjenične struje vrlo visoke frekvencije (preko 100 000 Hz) ne djeluju više kao podražaj, već se sva njihova energija pretvara u toplinu. Stoga ih možemo primieniti s dosta velikom jakošću i time umjetno grijati pojedine dijelove tiela ili čitavo tielo. Taj se postupak naziva *diatermija* sa strujama od 500–1000 KHz (1 KHz = 1000 Hz) ili *diatermija kratkim valovima*, ako se radi sa strujama od 25 000–50 000 KHz. Kod struja ove vrste daje koža radi svog kapaciteta (mali otpor izmjeničnoj struji) daleko manji otpor nego duboki dijelovi tkiva, pa nezgodnom primjenom može doći do dubokih opekline, a koža ostaje neoštećena.

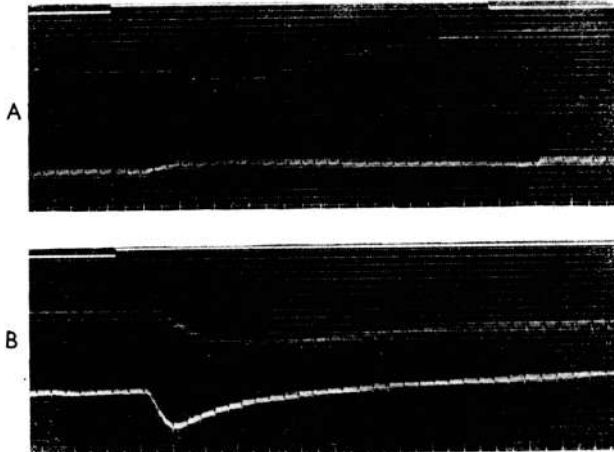
Elektrodiagnostika kod čovjeka je izpitivanje reakcije mišića i živaca s pomoću električne struje prema obćim

tizioložkim pravilima. Dovođenje struje vrši se kroz kožu s pomoću dviju elektroda razne veličine. Jedna od njih, nedjelatna ili indiferentna elektroda, jest limena ploča veličine oko 12×6 cm, omotana tkaninom namočenom u slanu vodu, i dolazi na koje god mjesto kože, a druga, diferentna ili podražajna elektroda, jest kovna kuglica 12 do 15 mm promjera, isto tako omotana mokrom tkaninom, koja se s pomoću držka lagano pritisne na mjesto, koje želimo izpitati (i pod kojim se nalazi podražajna točka mišića ili živca). Izpituje se: 1. Stalnom strujom. Normalno postoji red KZ-AO-AZ-KO; intenzitet minimalne struje 0,2–0,5 mA. 2. Udarcima induktora: udarac kod otvaranja djeluje normalno prije, t. j. kod slabije struje, nego udarac zatvaranja primarne struje. 3. Faradičnom strujom, t. j. nesimetričnom, prekidanom, izmjeničnom strujom induktora; normalno djeluje prije nego pojedinačni udarci induktora. 4. Mjeri se kronaksija perifernih živaca i mišića tako, da je diferentna elektroda katoda, a indiferentna anoda, koja mora biti bliže prema trupu od katode, t. j. struja mora biti silazna. Bolestni mišići pokazuju obrat galvanske podražljivosti, AZ nastaje prije KZ, udarac zatvaranja induktorske primarne struje djeluje prije udarca otvaranja, a faradička struja može biti i bez djelovanja; kronaksija se produžuje od 0,08–0,7 s na 50–70 s.

II. AKTIVNO-ELEKTRICKE POJAVE. Ako dva mjesta jednog organa, koji miruje, spojimo s galvanometrom, on ne pokazuje odklon; između ta dva mjesta nema razlike električkog potencijala. No ako spojimo s galvanometrom jedno mjesto površine organa i jedno ozliedeno mjesto, na pr. presjek mišića ili živca ili žlijezde sa zdravom površinom, pokazuje se između ta dva mjesta razlika električkog potencijala tako, da je ozliedeno mjesto uvijek električki negativno prema površini. Veličina električke napetosti može doseći 0,05 volta, kadkad i više. Isto tako pokazuju se razlike električke napetosti, čim se neki organ ili dio organa uzbudi i prije iz stanja mirovanja u stanje aktivnosti. Već prema vrsti organa nastaju električki potencijali raznog oblika, trajanja i visine, koje nazivamo *akcionim potencijalima*, a jer ih obično dokazujemo aparatima, koji pokazuju struju, zovu se često *akcionim strujama*. Nastajanje tih električkih potencijala nije do danas potpuno razjašnjeno, ali je vjerojatno, da nastaju ovako: Spomenuto je prije, da se stanice sastoje od bjelancevine u otopini soli, elektrolita, i da su odijeljene međusobno membranama, koje su građene drugačije nego same stanice. Prema Michaelisu te membrane imaju pukotine, pore, kroz koje ne mogu prolaziti svi ioni jednako. Već prema veličini pora i prema vrsti električkog naboja membrane prolaze neki ioni, na pr. kationi, lako, a drugi, na pr. anioni, teško ili nikako kroz membranu. Time nastaje na membrani sielo električke napetosti, jer se na jednoj strani membrane nakupi više aniona, i ta je strana membrane prema tome električki negativna, a na drugoj će biti više kationa, koji će joj dati pozitivni električki naboj. Drugo je tumačenje električkog potencijala u tome, da se stanične membrane, a i dijelovi same stanice sastoje od masti i mastima sličnih tvari, lipoida, u kojima se soli, što se nalaze u stanici, tope drugačije nego u vodi. Prema dosadašnjim izpitivanjima vjerojatno je, da su stanične membrane građene od takvih masti, i to kadkada tako, da je uzdužna osovina dugačkih molekula u jednom sloju, debelom četiri do pet milijuntinki milimetara, postavljena okomito na ravninu membrane, kao što stoji na pr. vlasi na koži ili trava na livadi. Molekule masti pokazuju svojstvo električkih dipola, t. j. jedan im je kraj izrazito polaran, a uz to pokazuje i afinitet prema vodi (kiselinska skupina), dok drugi kraj nema tih svojstava. Radi te kemijske nejednakosti vlada se ovakav sloj različito prema kationima i anionima. Ako je takav sloj masti postavljen na staničnoj granici tako, da su polarni krajevi molekula svi jednako okrenuti ili prema unutra ili prema vani, tada će na nutarnjoj strani membrane ostati na pr. slobodni anioni, a na vanjskoj strani slobodni kationi. Nutrina stanice je negativna, površina pozitivna. Prema tome je različita topljivost aniona i kationa u mastima stanične membrane uzrok električkim potencijalima (Beutner): No u stanicama se vrše životni procesi, oksidacije i redukcije, a i ovi su procesi vezani s pojavom električke napetosti, koje se javljaju i zato, što bjelancevine stanice, već prema kiselosti otopine, vežu na sebe iz solne otopine ili anione ili katione (Donnan).

Predočbe o staničnim membranama prema Michaelisu ili Beutneru tumače nam pojavu električkih potencijala između površine i presjeka organa. Normalno je čitava površina pozitivna, dok je nutrina stanice negativna. Ozliedimo li tkivo, došli smo u dodir s negativno nabijenom nutrinom stanice, pa se pokazuje razlika električkih potencijala, kojoj je sielo na staničnoj membrani druge, neozliedene strane stanice: površina pozitivna, nutrina negativna. Takvi su *potencijali mirovanja* ili *ozljede* dosta stalni i smanjuju se polagano u toku nekoliko minuta, jer ozliedene stanice ugibaju ili uzpostavljaju nove granice. Kad se dogodi jedno ili drugo, prestaju razlike u električkoj napetosti. No i za tumačenje, kako nastaju električki potencijali, kod uzbuđenja zdrave stanice služe opisane predočbe o membranama. U uzbuđenom tkivu vrše se životni procesi; sastavljeni spojevi velikih molekula, na pr. masti i bjelancevine, razpadaju se na manje molekule jednostavnijih spojeva, koji se prema ionima vladaju sada drugčije nego prije. Vrše se oksidacije, oslobađaju ioni vezani na bjelancevine i masti, nastaje kisela reakcija s oslobađanjem iona vodika i t. d. Svi ti procesi mienjaju propustljivost stanične granice i poremećuju ionsku ravnotežu, a time se mienja i električki naboj stanične granice, pa to mjesto tkiva mora pokazati razliku električkog potencijala prema drugome mirnome mjestu, na kojem postoji stabilna ravnoteža. O posebnim svojstvima svakoga tkiva ovisi, kakve su vrsti kemijski procesi, koji se u njemu kod uzbuđenja vrše i kojom se brzinom odvijaju, pa su zato i akcioni potencijali različiti i značajni za svako tkivo.

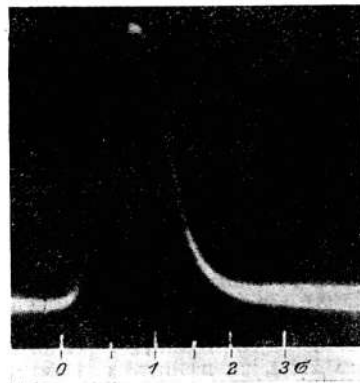
Koža. Površina kože pokazuje prema ozliedenom mjestu ili prema sluznici uvijek negativni električki potencijal, kojega visina ovisi u prvom redu o mjestu i stanju kože, količini soli u njoj (zbog izparivanja znoja), dobi dana, stanju živčanog sustava i t. d., kojemu se visina polagano mienja. To su t. zv. potencijali tonusa (Keller). Osim toga pokazuje se, ako se spoje s galvanometrom dva mjesta kože ili jedno mjesto kože i jedno neutralno mjesto (ozljeda, sluznica), kod kakva god uzbuđenja živčanog sustava smanjenje otpora kože (Veraguth) i posebno brže kolebanje električkih potencijala, kod kojeg koža postaje obično jače negativna (Tarhanov). Ta se pojava naziva *psihogalvanski refleks* (sl. 2), a s pomoću nje pokušavali su na pr. izpitati, nastaje li uzbuđenje



Sl. 2. PSIHOGALVANSKI REFLEKS REGISTRIRAN ISTOVREMENO SA DVA RAZLIČITO UGRIJANA MJESTA KOŽE. Kod A odklon prema gore znači negativitet kože, kod B obratno. Pomak biele crte na gornjem rubu je čas podražaja jakim zvukom, razmak crtica na donjem rubu je 1 sek. Sitni zubi u krivulji su akcione struje srca. Kod B jednostavni oblici, kod A gore višefazni oblik

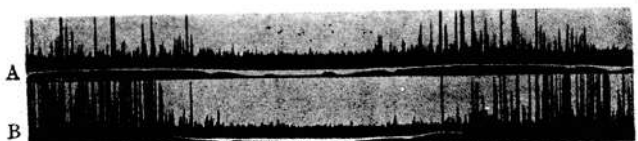
opažanika kod izazivanja stanovitog sjećanja. Za registraciju te pojave osnovani su i aparati, t. zv. detektori istine, koji su trebali pokazati vjerodostojnost iskaza obtuženih ili svjedoka. Jedan dio tih potencijala kože potječe od polarizacije samih kožnih stanica zbog uzbuđenja, a drugi je dio akciona struja kožnih žlijezda znojnice. I druge žlijezde, u prvom redu žlijezde slinovnice, pokazuju kod uzbuđenja akcione potenciale, vrlo slične psihogalvanskom refleksu kože; oni su osim toga različiti, već prema tomu, je li aktivnost žlijezde izazvana podražajem simpatičkih ili parasimpatičkih živaca.

Živci. Akciona struja živca najviše je proučavana radi toga, jer se drži, da je istovjetna s fiziološkim uzbuđenjem živca, t. j. samo je uzbuđenje, koje živac prenosi od jednog do drugog svog kraja, elektricitet akcione struje. To se mišljenje među ostalim osniva na sljedećem: Uzbuđenje u živcu putuje istom brzinom kao i akcione struje. Svi utjecaji, koji mienjaju brzinu i jakost uzbuđenja u živcu, mienjaju jednako i tok akcione struje živca. Električka svojstva živca stoje u stalnom odnosu prema njihovoj anatomske gradi. Živci s mielinskom ovojnicom vode uzbuđenju brže, i to razmjerno s debljinom živčanog vlakna; što su deblja vlakna, to je veća brzina. Živci bez ovojnice vode znatno polakše. Brzina vodljivosti ujedno je brzina širenja akcione struje, pa prema njoj možemo razdijeliti živce u tri grupe: A-vlakna vode brzinom od 50 do 80 m u sekundi, kadkad i brže (do 120 m/sek), B-vlakna od 15 do 35 m/sek i C-vlakna od 1 do 2 m u sekundi. Putovanje akcione struje u živcu može se protumačiti ili kao predavanje električkih naboja od jednog mjesta živca na susjedno mjesto, kao u sistemu kondenzatora ili električkim strujama, koje teku između



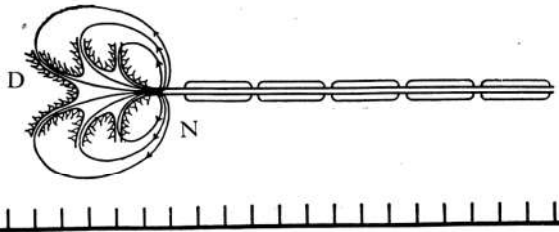
Sl. 3. AKCIONI POTENCIAL JEDNOG ŽIVČANOG VLAKNA. Ukupna visina 30 mV, vrijeme u tisućinkama sekunde (6)

uzpon i trajanje akcione struje duži su ili kraći, ali su uvijek u stalnom odnosu prema brzini vodljivosti tog živca, a uzpon akcione struje pokriva uvijek oko 20 mm dugu prugu živca. Vrijeme uzpona akcione struje odgovara približno dužini kronaksije. Nakon ovakve akcione struje pokazuje živac još i naknadni potencijal: najprije kratki i slabi obratnog smjera, a zatim znatno duži istoga smjera kao i početni potencijal. Taj iznosi svega 5% visine početnog potencijala, ali traje deset do dvadeset puta tako dugo. Većina je živaca sastavljena od vlakana razne debljine i prema tomu razne brzine vodljivosti, pa akciona struja u živcu postaje to kompliciranija, s više zubaca, što je dalje od mjesta podražaja registriramo. Tom su metodom otkrivene i različite brzine vodljivosti pojedinih vlakana (Gasser). Ovakve akcione struje dobivamo umjetnim podraživanjem. Živci, koji su u vezi s centralnim živčanim sustavom ili s osjetnim organima, dobivaju od njih električke impulze, pa ih vidimo u obliku akcionih struja živaca, od kojih svaka pojedina ima izgled kao gore; one sliede jedna iza druge u ritmu, koji ovisi o jakosti impulza, od nekoliko na sekundu do 120/sek. Živčane stanice naime, spontano uzbuđene ili umjetno podražene, šalju svoje impulse u živce uvijek ritmički. Nikad nema samo jedan impuls, nego uvijek nekoliko njih najprije u brzem, a kasnije sve polaganijem sliedu. Prema Gesellu nastaju, radi posebne građe živčanih stanica, u njima električke struje, koje teku između



Sl. 4. AKCIONE STRUJE U ŽIVCU (N. VAGUS) USLIED PODRAŽIVANJA OGRANAKA TOG ŽIVCA U PLUĆIMA, KOD MIRNOG DISANJA (A) I KOD DUBOKOG DISANJA (B). Na početku i kraju slike udisaj, u sredini izdisaj

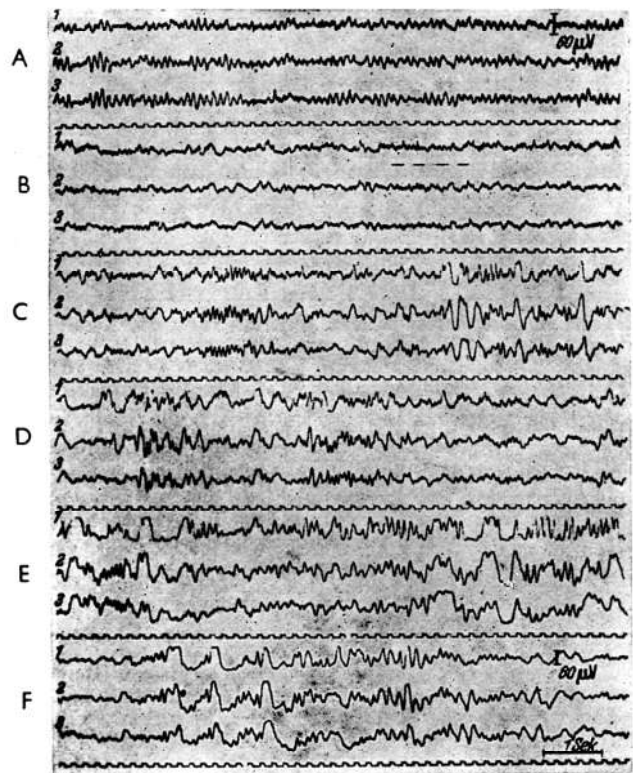
kratkih nastavaka živčane stanice (dendrita) i početka njena dugog nastavka (neurita) tako, da je početak neurita katoda. Te struje podražuju neurit, koji je početak živca, pa on reagira izbijanjem čitavog nakupljenog električkog naboja u obliku akcione struje, šalje dakle jedan impuls. Sad treba neko vrijeme, da se procesima mienne tvari u živcu ponovno nakupi električki naboj, kad se nakupi, ponovno će se izbiti radi istog uzroka kao i prvi put; to se stalno ponavlja, i na taj način živčane stanice šalju ritmičke impulse. Kod svakog impulza potroši se čitava nakupljena energija u živčanom (a i u mišićnom) vlaknu, pa je potrebno neko vrijeme, koje ovisi o svojstvima te žive stanice ili vlakna (kronaksija!), da se mienom tvari stvori nova razlika električke energije u obliku naboja za sljedeći impuls. Radi toga su pojedine



Sl. 5. PREMA GESELLU SHEMA ŽIVČANE STANICE SA STRUJAMA, KOJE TEKU U STANICI OD KRATKIH NASTAVAKA-DENDRITA (D) PREMA DUGOM NASTAVKU-NEURITU (N), ZBOG KOJIH NASTAJU ŽIVČANI IMPULZI U RITMU OZNACENOM NA DONJEM RUBU SLIKE

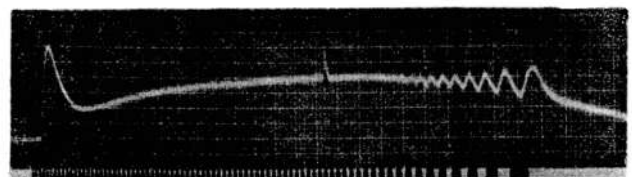
akcione struje u jednom živčanom vlaknu, bez obzira na ritam i jakost impulza, uvijek jednako velike, no budući da se živac sastoji od mnogo vlakana, a kod promatranja akcionih struja odvodimo uvijek akcione struje s više živčanih vlakana najednom, to nastaje zbrajanje i interferencija akcionih struja pojedinih vlakana, i slika akcionih struja postaje složena. Umjetno podraženi živci slijede ritam podražaja već prema svojoj brzini vodljivosti, neki do 100/sek, a neki čak do 300/sek; kod podraživanja bržim ritmom nastaju akcione struje tek na svaki drugi ili treći i t. d. podražaj. Ta se pojava naziva alterniranje.

Akzione struje mozga. Od 1925 (Berger) poznate su one i pod imenom *elektroencefalogram* — EEG (grč. *εγκεφαλος* »mozak«), ako se snimanje struje vrši s glave, ili *elektrokortikogram* — ECG (lat. cortex »kora«), ako se odvođenje struje vrši barem jednim polom izravno s moždane kore. Potencijali, koje dobivamo, kreću se od 0,01 do 0,1 mV, dakle su jedva jedna stotinka akcionih potencijala živca, i imaju uvijek složeni oblik. Sastoje se od izmjeničnih struja nejednakih intervala i jakosti, u kojima se mogu razlikovati stalne grupe s određenom frekvencijom. Najstalniji su t. zv. α -valovi sa 6 do 10 Hz, nadalje ima β -valova s kojih 25 Hz; osim toga nastupaju i valovi s 35 do 50 Hz kao γ -valovi, dok za vrijeme sna nastaju polagani titraji sa samo 0,5 do 6 Hz kao δ -valovi. Najveće električke potencijale daje zatiljni režanj mozga. Pojedini dijelovi mozga daju, osobito, ako su podraženi, međusobno različite ECG-e, koji po granicama odvođenja odgovaraju razdiobi moždane kore prema građi i funkciji. S obzirom na to postoji mogućnost, da se u budućnosti ispituju i prepoznaju oboljenja pojedinih dijelova mozga iztraživanjem promjena ECG ili EEG. Današnje znanje o tim potencijalima još je nepregledno i ne može se upotrebiti u praktične svrhe, kao što se može ispitivanje EKG. α -valovi tipični su za mozak u budnom i mirnom stanju. Svaki podražaj ili rad mozga obustavlja te valove, a vidljivi postaju β - i γ -valovi s manjom amplitudom i većom frekvencijom (sl. 6), dok se u snu, ali i kod pomanjkanja kisika, a vrlo često i kod djece u budnom stanju, javljaju polagani visoki valovi sa 3 do 6 Hz. Akcioni potencijali čovječjeg mozga u principu su jednaki akcionim potencijalima životinjskog mozga, pa možemo naći velike sličnosti čak i s akcionim potencijalima centralnog živčanog sustava vrlo jednostavnih organizama. Jedni i drugi mjenjaju se na dosta tipičan način pod utjecajem podražaja osjetnih organa, rada živčanog sustava, umora, sna, lijekova i otrova, zbog pomanjkanja kisika i t. d. Isto tako nastaju značajne promjene EEG kod promijenjenog rada mozga, kao što je to slučaj za vrijeme napadaja grčeva kod padavice ili kod umjetno proizvedenih grčeva.



Sl. 6. AKCIONI POTENCIJALI ČOVJEČJEG MOZGA ISTOVREMENO SNIMANI ODVOĐENJEM S ČEONOG (1), TJEMENOG (2) I ZATILJNOG (3) REZNJA; ZAJEDNIČKA ELEKTRODA NA USKI. Kod A opažanik svjež, ujutro, kod B umoran, navečer. Kod C početak sna, D, E i F sve dublji san. Okomita crtica blizu kraja kod A i F označuju 60 milijuntinki volta

Akzione struje oka (elektroretinogram — ERG). Mirno, neozliedeno oko pokazuje razliku električkog potencijala između prednjeg i stražnjeg pola, kod čega je stražnji dio oka negativan. Isto tako odvođenje struje s prednje i stražnje strane mrežnice (retina) pokazuje, da je njena stražnja strana negativna. Kod bezkralježnjaka ta je pojava obrnuta, i vanjska je strana mrežnice pozitivna, no kod njih imaju osjetni elementi mrežnice i obratni položaj nego kod kralježnjaka, pa je to ujedno i dokaz, da struja mirovanja oka ima svoje sielo u osjetnom epitelu same mrežnice. Visina je takvog potencijala mirovanja oko 0,5 mV. Ako oko bude podraženo svjetlom, javlja se akciona struja mrežnice, kod čega se struja mirovanja pojača i mjenja u posebno značajnom obliku. Kod kratkotrajnih i slabih podražaja nastaju jednostavne kratke akcione struje, slične onima u živcu, a kod dužeg stalnog osvjetljenja oka ili kod slabih podražaja u brzom slijedu akciona struja posebnog oblika, za koju je značajno da pokazuje stalna tri zuba i slabo pojačanje negativiteta vanjske strane mrežnice, kad prestane djelovanje svjetla (sl. 7). Ovaj oblik ERG-a, čini se, nastaje interferencijom triju akcionih struja jednostavnog oblika, ali različitog smjera i trajanja, a svaka od njih se daje zasebno ukloniti raznim uvjetima pokusa. Jedna od njih, t. j. glavna komponenta ERG-a, djeluje kao podražaj na vidni živac i izaziva u njem akcionu struju,



Sl. 7. AKCIONI POTENCIJAL RETINE USLIED PODRAŽAJA SVJETLOM. Razmak tankih vodoravnih crtica 0,01 volt, razmak okomitih 1/5 sek. Kratkotrajni svjetleni podražaji, označeni na donjem rubu slike, u brzom slijedu, djeluju kao stalni podražaj, a kod polaganijeg ritma, prema desnom kraju slike, svaki pojedini podražaj izazivlje pojedinačnu akcionu struju.

a ta opet akcione struje u daljnjim dielovima živčanog sustava.

Od akcionih potencijala ostalih organa vrijedno je spomenuti, da pužnica unutarnjeg uha, podražena električkim strujama zvučne frekvencije, t. j. od nekoliko stotina do nekoliko tisuća Hz, pokazuje akcione struje točno iste frekvencije i istog oblika kao struja, kojom je podražujemo (Wever-Brayov efekt). No slušni živac, koji iz pužnice vodi u centralni živčani sustav, pokazuje akcione struje kao i svaki drugi osjetni živac, t. j. ne može svojim akcionim strujama slijediti frekvencije veće od oko 100/sek. Prema tomu je Wever-Brayov efekt vjerojatno fizikalnog podrijetla.

Biljke pokazuju također potencijale mirovanja, a isto tako i akcione potencijale. Potencijale mirovanja nalazimo uvijek između dielova, koji različito brzo rastu ili imaju različit intenzitet miene tvari. Tako postoji stalna razlika u potencijalu između vrška klice i korijena, ili između rebra jednoga lista i ostale površine, ili između osvijetljene i tamne strane lista. Akcioni potencijali vide se osobito dobro kod biljaka s pomičnim i podražljivim lišćem, kao što su mesožderne biljke. Akcioni potencijali lista mesožderne biljke za vrijeme probave donekle su i slični akcionim potencijalima želudčane stienke. Električki potencijali kod biljaka vrlo vjerojatno imaju važnu ulogu kod protjecanja i tjeranja sokova kroz biljni organizam.

LIT.: Bernstein, *Elektrobiologie*, Braunschweig 1912; *Handbuch der normal. u. pathol. Physiologie* VIII/2, Berlin 1926; *Traité de physiol. norm. et pathol.* VIII., Pariz 1929; Boruttau-Mann, *Handbuch der ges. mediz. Anwendung der Elektrizität*, sv. I. i II., Leipzig 1909—11; Altenburger u. *Handbuch der Neurologie* III., Berlin 1937; Schäfer, *Elektrophysiologie*, Beč 1942; Lapicque, *L'excitabilité en fonction du temps*, Pariz 1926; Bourguignon, *La chronaxie chez l'homme*, Pariz 1923. R. H.

Elektrogimnastika (bergonizacija) je terapijski zahvat, koji je uveo Bergonie 1895, a sastoji se u tomu, da se valovitom istosmjernom ili izmjeničnom strujom podražuje uzet mišić u stanovitom ritmu. Na svaki ovakav podražaj reagira mišić skraćanjem. Ovim načinom možemo sačuvati mišić od propadanja (degeneracije). Elektrogimnastika se provodi kod uzetih mišića bez obzira na to, što je uzrok uzetosti.

J. Bu-k.

Elektrokardiografija (od grč. *ἤλεκτρον* »jantar«, *καρδία* »srce«, *γράφω* »pišem«) novija je metoda kliničke laboratorijske pretrage, kod koje s pomoću posebne naprave, t. zv. *elektrokardiografa*, snimamo *elektrokardiogram*. E. se razvila zadnjih godina u posebnu granu interne medicine, a bavi se proučavanjem *elektrokardiograma* uz tehničko usavršavanje aparature.

ELEKTROKARDIOGRAM (= Ekg ili ceg = elektrokardiogramma ili electrocardiogramma [grčki *γραφμα* »pismo«]) jest krivulja akcionih struja srca, koju registriramo elektrokardiografom. Ta se naprava s vremenom sve više usavršavala, a danas je to maleni aparat, koji se može prenositi.

Akzione struje, koje je tako nazvao E. du Bois-Reymond, nastaju kod rada mišića, živaca, žlijezda, mrežnice i t. d., pa i u akcionom mišiću srca kod kontrakcije miokarda. Njihova elektromotorna snaga može iznositi i do 20—45 mV. Elektrokardiografom označujemo razlike u napetosti električke struje kod mirnog i djelatnog srca, a time neizravno i normalni ili abnormalni postanak podražaja kroz neuromuskularni autonomni sistem srca, kao i kontrakcije pojedinih dielova srca te način protjecanja krvi kroz vjenčaste arterije. Ukratko rečeno, ekg-om možemo ustanoviti, je li rad srca normalan ili abnormalan.

Osnovi e-e potječu već od elektrofizioloških pokusa Matteuccija (1845), na temelju kojih su Kölliker i Müller (1856) ustanovili akcione struje kod rada žablje srca.

Marey je prvi fotografski registrirao varijacije spomenute struje, a A. D. Walleru je g. 1888 uspjelo i kod čovjeka snimiti akcione struje srca odvođene s površine tijela. Otkriće galvanometra s niti od holandskog fiziologa u Leidenu Willema Einthovena (1903) bio je velik napredak u e-i. Taj je galvanometar najvažniji sastavni dio elektrokardiografa, a sastoji se uglavnom od niti iz posrebnog kremenca ili iz platine, 2—3 μ tanke, koja je nategnuta između dva pola elektromagneta. Prolazi li struja kroz nit, tad se ona odklanja u okomitom smjeru prema magnetskim silnicama. Kretanje se odklona niti mogu fotografirati i mikroskopski mjeriti.

Akcionu struju srca odvodimo s površine tijela preko obje ruke ili preko jedne ruke i jedne noge s pomoću elektroda od metala (platine, nikla, olova), koje se ne polariziraju.

Prema tome razlikujemo po Einthovenu obično tri odvoda (derivacije): I. odvod: desna ruka — lijeva ruka; II. odvod: desna ruka — lijeva noga; III. odvod: lijeva ruka — lijeva noga. Izuzetno snimamo i IV. odvod (torakalna ili prekordialna derivacija): lijeva noga i predio srca.

Bolestnika snimamo ležećke obično poslije mirovanja ili prema potrebi poslije opterećenja radom, što znači poslije dvadeset čučnjeva ili poslije uzlaženja od šestdeset stepenica.

Normalni ekg (v. sl.) ima pet oscilacija, i to tri pozitivne »iznad 0-crte« (izoelektričke crte) i dvije negativne izpod 0-crte. Sada ih označujemo slovima P, Q, R, S i T. Kod normalnog srca najbolje su izražene oscilacije u II. odvodu. P-val odgovara stezanju predkletke (atrija), a ventikularni kompleks, Q-R-S zubac, spojica S-T i T-val podražaju i stezanju kletke (ventrikula) srca. Q-R-S zubac, koji odgovara provodu podražaja u mišiću kletke srca, nazivamo i inicialnom oscilacijom (početnim titrajem) ventikularnog kompleksa, dok se spojica S-T i T-val, ovisna o stanju samog mišića, naziva finalnom oscilacijom (konačnim titrajem) ventikularnog kompleksa. Odlomak pak T-P odgovara stanki srca, odnosno djelomično diastoli kletke.

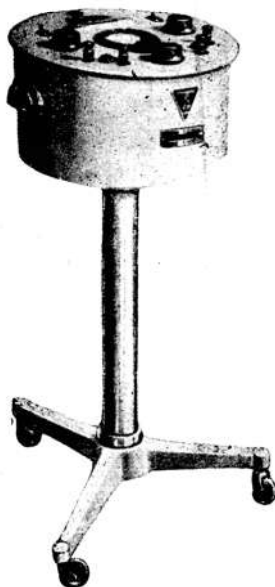
Prema različitim morfoložkim i ritmičnim promjenama ekg-a, t. j. prema smjeru i visini oscilacija s obzirom na izoelektričku crtu, a osim toga prema obliku zubaca i valova, te prema razmjeru visine i udaljenosti pojedinih zubaca u različitim odvodima, možemo ustanoviti slijedeće glavne funkcionalne i patološke procese srca: oštećenja mišića srca (laesio myocardii, myocardiopathia i t. d.); ubrzan ili usporan rad srca (sinustachycardia, tachycardia paroxysmalis, sinusbradycardia i t. d.); razne aritmije srca bilo povremene ili trajne, koje nastaju radi abnormalnog postanka podražaja ili zbog otežanog provoda podražaja kroz autonomni neuromuskularni sustav srca (extrasystolae; titranje i treperenje predkletke — fibrillatio et undulatio atriorum cum arrhythmia absoluta; različite vrste disocijacija kao parcialni i totalni blok s Adams-Stokesovim kompleksom simptoma i t. d.); nadalje funkcionalne i anatomske promjene vjenčastih arterija (angina pectoris vasomotoria i vera, insufficientia aa. coronarium, thrombosis i embolia a. coron. cum infarctu myocardii uzrokovane od arterioskleroze, sifilisa, žarištnih infekcija, sepse i t. d.) i napokon položaj samog srca (dextrocardia, situs cordis inversus), a napose njegove uzdužne osi, prema kojoj možemo razlikovati različite normalne ili patološke oblike srca (typus laevis i dexter, prema poprečno i okomito (kapljasto srce) položajem srca, odnosno prema aortično i mitralno konfiguriranom srdu i t. d.).

E. je prieko potrebna, često nenadoknadiiva praktična metoda laboratorijskog pretraživanja, važna ne samo za dijagnozu bolesti cirkulatornih organa (srca i žila), nego i za njihovu prognozu i terapiju. Ekg možemo izpravno procijeniti i koristno upotrebiti jedino skupa s nalazima drugih metoda kliničke pretrage.

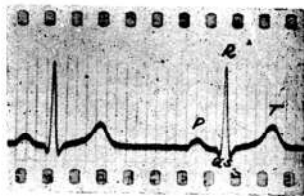
V. V-ć.

ELEKTROKARDIOGRAFIJA KOD DOMAĆIH ŽIVOTINJA.

Nörr je prvi uveo e-u u veterinarsku medicinu, i to već u prvoj polovini drugoga desetljeća ovoga stoljeća. On je



Aparat za elektrogimnastiku



izradio metode rada, prikazao ekg zdrava konja i registrirao velik broj srđanih aritmija kod te životinje. U toku vremena e. se razširila i ušla u brojne veterinarske zavode i klinike. Kod nas se ponajviše upotrebljavaju ova tri odvodna mjesta kod konja: predlopatično područje, područje srđanog šiljka i ravno crijevo. Aparatura je jednaka onoj kod čovjeka. Iako se e. u veterinarskoj medicini ne upotrebljava toliko, koliko kod ljudi, ipak je ona i kod domaćih životinja važno diagnostičko pomagalo i ujedno sredstvo, koje je veoma potrebno za izražavanje kliničke patologije srđca. To se odnosi u prvom redu na konja, kod kojega se nepravilnosti u srđčanom radu razmjerno najčešće pojavljuju. Nepravilnosti u radu srđca često se sigurno prepoznaju samo e-fski. L. B-ć.

Elektrokaustika → Galvanokaustika.

Elektrokoagulacija ili diatermokoagulacija je lokalno, destruktivno djelovanje diatermije (v.). Kod upotrebe dviju nejednako velikih elektroda sav se toplinski učinak usredotoči na *maloj* ili aktivnoj *elektrodi*. Velika je elektroda indiferentna. Na mjestu, gdje aktivna elektroda dotiče tkivo, albuminoidi trenutno koaguliraju (bezkrvni zahvat). Ovo svojstvo, počevši od Doyena, upotrebljavamo za uništavanje karcinomatozne stanice. Elektrodom poput igle kauteriziramo (nakon predhodne anestezije) bradavice, madeže, epiteliome i druge manje izrasline na koži, kao i promjene lupusa. Isto tako odstranjujemo polipe nosa, grla, mjehura i pristupačne izrasline maternice. Metodu kirurzi također primjenjuju za destrukciju inoperabilnog raka. S. K.

Elektroliza u liječenju upotrebljava se, da se njom razaraju bradavice, sunčane pjege, papilomi, suvišne dlake,



Elektroda za elektrolizu

igla, nalazi se na negativnom polu, a jakost struje 2–10 mA za vrijeme od 1 do 5 minuta. J. Bu-k.

Elektromasaža je izraz, koji se upotrebljava u laičkim krugovima, u prvom redu za teslinizaciju (ili darsonvalizaciju), t. j. djelovanje visokofrekventnim strujama, a pnda za vibracionu masažu, koja se izvodi različitim aparatima. J. Bu-k.

Elektronarkoza je stanje, koje mnogo naliči na narkozu, a izaziva se galvanskom strujom. Može se primijeniti kod nižih životinja, i to samo onda, ako je tok struje usmjeren u pravcu od centralnog živčanog sistema prema krajevima nogu, t. j. anoda (pozitivan pol) na glavu, a katoda (negativan pol) na noge. J. Bu-k.



Zaba u narkozi izazvanoj galvanskom strujom. Strjelica označuje tok struje, a izcrtkana polja elektrode. (F. Screminzky, iz W. Holzer, *Physikalische Medizin*)

skę svrhe. G. 1744 imamo već i prvo liečničko izvješće od Kratzensteina o povoljnom terapijskom djelovanju električne struje. Veratti iz Bologne izvješćuje 1748 o liječenju ishiasa i reumatičkih bolesti. Liječenje električkom strujom



Sl. 1. APARAT ZA LIEČENJE ELEKTRICKIM STRUJAMA: GALVANSKOM I FARADICKOM

dobiva među tadanjim liečnicima sve više pristaša, pa se među njima najviše iztiču Privati, De Sauvages, Deshayes, Smyth Carmichael i drugi. Najdalje dodoše tada na tom području Mauduyt i Jean-Paul Marat, koji su zapravo već neke vrste specijalisti za elektroterapiju.

Voltinim otkrićem baterije g. 1800 i Faradayevim otkrićem indukcije 1831 postavlja se elektroterapija na savim nove temelje, jer su dotadašnji strojevi za dobivanje električne struje davali struju, kojoj se jakost i napetost stalno mienjala, pa je radi toga količina električne struje bila često nedovoljna, da proizvede terapijsko djelovanje.

Eru elektroterapije prije pronalazka baterije možemo nazvati erom sugestivnog djelovanja.

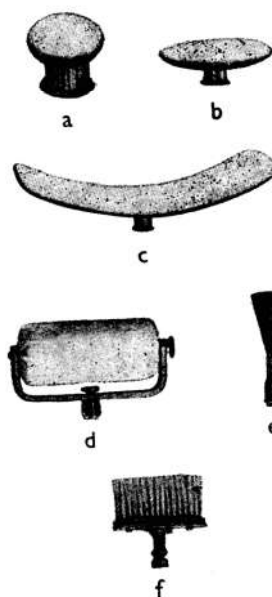
Elektroterapija u pravom smislu rieči počinje pojavom Duchennea (1806–1875), Remacka (1815–1865), Du Bois-Reymonda (1818–1896), Erba (1840–1921) i mnogih drugih, koji unesoše novo svjetlo u bit djelovanja električne energije na pojedine organe i čitav organizam.

G. 1865 konstruirao je Vilim Holtz stroj za influenciju, koji Schwanda 1868 i Fischer 1869 upotrebljavaju u terapijske svrhe. Holtzov stroj usavrši kasnije Whimshurst. Whimshurstov stroj s nekim manjim promjenama upotrebljava se i danas.

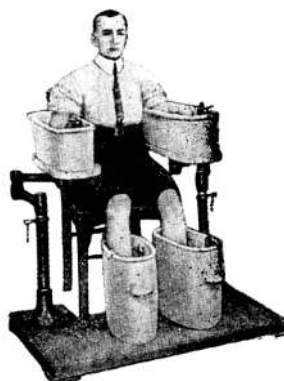
1881 modificirao je Morton tehniku primjene Franklinovih struja, koje nazvaše Hertzovom franklinizacijom. Tu se zapravo već radilo o strujama, koje spadaju u područje kratkih valova. G. 1891 predlaže Tesla primjenu visokofrekventnih struja u svrhu liječenja, a 1892 D'Arsonval započinje liječenjem. G. 1908 izlazi publikacija Zeyneka o diatermiji. Najzad u ožujku 1929 započinje liečnik Schliephacke primjenu kratkih valova, i za nepune dvie godine bila je ta vrsta liječenja uvedena na svih pet kontinenta.

Struje, koje se upotrebljavaju u elektroterapiji, dijele se:

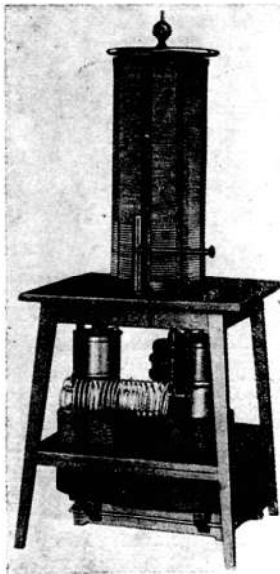
- A. na istosmjerne struje, u koje se ubrajaju:
 - a. Franklinova struja (→ franklinizacija);
 - b. galvanska struja (→ galvanizacija);
 - c. Leducova struja (v.)



Sl. 2. ELEKTRODE, POTREBNE KOD ELEKTRIZIRANJA



Sl. 3. ČETVEROSTANICNA ELEKTRICKA KUPELJ



Sl. 4. ARSONVALOV APARAT ZA LIECENJE TESLINIM STRUJAMA

brže od iona kalijeva, klorova ili jodova.

Drugi razlog promjenama u kemijskoj konstituciji tkiva, koje su najjače izražene na membranama, nastaje radi toga, jer membrane neke ione uobče ne propuštaju.

Osim razlike u koncentraciji na membranama dolazi do razlike u koncentraciji na granici protoplazme i tkivnog soka, kako je to Nernst pokazao, a do te razlike dolazi zato, jer se različni ioni u različitim tekućinama kreću različnom brzinom.

Osim promjena kemijske naravi jedan dio kinetičke energije, prouzrokovane elektromotornom silom, pretvara se u toplinu. Ta toplina nastaje radi

B. na izmjenične struje, u koje spadaju a. niskofrekventne struje, i to: 1. sinus struja ($\rightarrow$ faradizacija); 2. faradička struja ($\rightarrow$ faradizacija);

b. visokofrekventne struje, i to 1. Mortonova struja (v.); 2. Teslina struja (v.); 3. diatermija; 4. kratki valovi (v.).

Pustimo li električku struju kroz vodenu otopinu, to će ona dielove otopljenе tvari, nazvane ioni, staviti u pogon, te će oni putovati u pravcu od jedne elektrode k drugoj. Tako radi premještanja iona u organizmu dolazi do promjena kemijske i fizikalne naravi, te tako i do terapeuskog djelovanja. Do tih promjena dolazi u prvom redu radi toga, što se različni ioni kreću različitim brzinom. Tako se ion vodikov pod istim uvjetima kreće sedam puta brže od iona natrijeva i pet puta

trenja iona između sebe i neutralnih atoma. Kod primjene galvanske struje jakosti 20 mA za vrijeme od 10 minuta doći će do povišenja temperature u čitavom tijelu za 0,012 C. Kod diatermije i kratkih valova u istom vremenu može doći do povišenja temperature od 0,5 C.

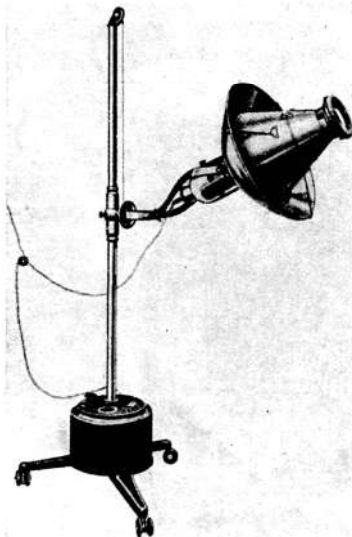
Svaka od spomenutih struja može se primijeniti ne samo lokalno, t. j. na pojedini dio tijela, nego i obćenito, t. j. na čitavo tijelo. Struje uvodimo u tijelo pomoću elektroda. Elektrode mogu biti kovne ili tekuće. Kod primjene galvanske struje radi jakog elektrolitičkog djelovanja mećemo pod metalne elektrode četverostruku tkaninu namočenu u običnu, ili bolje, slanu vodu. Kod svih ostalih struja mećemo kovne elektrode izravno na tijelo; jedino kod kratkih valova nalazi se obično između elektrode i tijela izolaciono tvorivo. Tekućim se elektrodama služimo kod tako zvanih dvostaničnih i četverostaničnih kupaka. Obću primjenu istosmjernih struja niske napetosti i niskofrekventnih izmjeničnih struja dajemo u kupki, dok obću primjenu ostalih struja dajemo specijalnim, u tu svrhu građenim elektrodama.

Djelovanje se vrši najčešće jedanput dnevno, uzastopce svaki dan 15 do 20 puta, i svaki put traje 15 do 20 minuta, a nekad i duže. Elektroterapijom se mogu liečiti uglavnom sve akutne i kronične bolesti upalne naravi.

(Slike za ovaj članak uzete su iz djela: J. Grober, *Physikalische Therapie*, Jena 1934.) J. Bu-k.



Sl. 5. APARAT ZA LIECENJE ULTRA-KRATKIM ELEKTRIČKIM VALOVIMA



Sl. 6. SOLLUX-ELEKTRIČKA SVJETILJKA ZA LIECENJE TOPLIM SVIETLOM



Sl. 7. APARAT ZA LIECENJE ULTRAVIOLETNIM ZRAKAMA

III. ELEKTRIKA U TEHNICI (ELEKTROTEHNIKA) obrađena je u VI. sv. HE.

KONAC V. SVEZKA.

Tiskanje dovršeno 2. svibnja 1945

