



# VAKUUMIST

ČASOPIS ZA VAKUUMSKO ZNANOST, TEHNIKO IN TEHNOLOGIJE, VAKUUMSKO  
METALURGIJO, TANKE PLASTI, POVRŠINE IN FIZIKO PLAZME



56 let  
DVTS

LJUBLJANA, OKTOBER 2015

ISSN 0351-9716

LETNIK 35, ŠT. 2

UDK 533.5.62:539.2:669-982

JEOL PROPOSES A NEW ANALYTICAL TEM

# JEM | 2800

HIGH THROUGHPUT ELECTRON MICROSCOPE



Quick Turn Around Time

Full automation

- Auto contrast / brightness
- Auto sample height control
- Auto crystal orientation alignment
- Auto focus control
- Auto stigmator control

All-in-one for easy use  
by anyone

[www.jeol.com](http://www.jeol.com)



SCAN d.o.o., Preddvor  
Nazorjeva 3 · SI-4000 Kranj · Phone +386-4-2750200  
Fax +386-4-2750420 · [info@scan.si](mailto:info@scan.si)



# VAKUUMIST 35/2, oktober 2015

## VSEBINA

### ČLANKI

<b>Upogibna trdnost korundne keramike pri enoosnem in dvoosnem preizkusu</b> Milan Ambrožič, Tomaž Kosmač, Tjaš Savarin . . . . .	4
<b>Razvoj vakuumskih tehnologij po shemi Toynee-Kuhn-Južnič (Ob Unescovem letu, posvečenem svetlobi in z njo povezano tehnologijo)</b> Stanislav Južnič . . . . .	10

### DRUŠTVENE NOVICE

<b>Naše društvo bo organiziralo združeni konferenci JVC-16 in EVC-14 v juniju 2016</b> Janez Kovač . . . . .	21
<b>Sporočilo za javnost – Pfeiffer Vacuum praznuje 125-letnico</b> . . . . .	23
<b>Pregled konferenc v preostanku leta 2015 in v letu 2016</b> . . . . .	25

## VAKUUMIST

Časopis za vakuumsko znanost, tehniko in tehnologije, vakuumsko metalurgijo, tanke plasti, površine in fiziko plazme

Izid publikacije je finančno podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz naslova razpisa za sofinanciranje domačih znanstvenih periodičnih publikacij

**Glavni in odgovorni urednik:** doc. dr. Miha Čekada

**Uredniški odbor:** dr. Matjaž Finšgar, dr. Jože Gasperič, prof. dr. Monika Jenko, dr. Stanislav Južnič, prof. dr. Marta Klanjšek Gunde, doc. dr. Janez Kovač, prof. dr. Urška Lavrenčič Štangar, dr. Peter Panjan, mag. Andrej Pregelj, dr. Drago Resnik, doc. dr. Alenka Vesel, prof. dr. Franc Zupanič

**Tehnični urednik:** Miro Pečar

**Lektor:** dr. Jože Gasperič

**Korektor:** dr. Matjaž Finšgar

**Oblikovanje naslovnice:** Ignac Kofol

**Tisk:** Littera picta, d. o. o., Rožna dolina, c. IV/32–36, 1000 Ljubljana

**Naklada:** 350 izvodov

Vakuumist on-line: <http://www.dvts.si/arhiv>

Letna naročnina: 25 EUR

ISSN 0351-9716

UDK 533.5.62:539.2:669-982

Izdaja Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije

Teslova 30

1000 Ljubljana

Tel. (01) 477 66 00

E-pošta: [info@dvts.si](mailto:info@dvts.si)

Domača stran društva: <http://www.dvts.si>

Številka transakcijskega računa pri NLB: 02083-0014712647

## Uredništvo Vakuumista

doc. dr. Miha Čekada

glavni in odgovorni urednik Vakuumista

Institut »Jožef Stefan«

Jamova 39

1000 Ljubljana

e-pošta: [miha.cekada@ijs.si](mailto:miha.cekada@ijs.si)

tel.: (01) 477 38 29

faks.: (01) 251 93 85

# UPOGIBNA TRDNOST KORUNDNE KERAMIKE PRI ENOOSNEM IN DVOOSNEM PREIZKUSU

Milan Ambrožič<sup>1</sup>, Tomaž Kosmač<sup>2</sup>, Tjaš Savarin<sup>3</sup>

ZNANSTVENI ČLANEK

<sup>1</sup>Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Koroška 160, 2000 Maribor

<sup>2</sup>Institut »Jožef Stefan«, Jamova 39, 1000 Ljubljana

<sup>3</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Jadranska 19, 1000 Ljubljana

## POVZETEK

Izmerjene upogibne trdnosti keramičnih vzorcev se navadno zelo dobro ujemajo z Weibullovo porazdelitveno funkcijo. Izmerili smo upogibne trdnosti korundne keramike, in sicer s štiritočkovno metodo za vzorce v obliki kvadrov in z dvoosnim preizkusom za okrogle ploščice. Weibullova parametra smo ocenili z metodo momentov, linearno regresijo in metodo maksimalne verjetnosti. Ugotovili smo, da porazdelitev trdnosti res dobro ustreza Weibullovi porazdelitvi in da metode dajo podobne, čeprav ne povsem enake vrednosti njenih parametrov. Povprečna trdnost paličastih vzorcev je manjša kot pri okroglih ploščicah in prav tako relativna standardna deviacija trdnosti. Weibullov modul za paličaste vzorce je bistveno večji kot pri okroglih ploščicah.

**Ključne besede:** korundna keramika, upogibna trdnost, enoosni preizkus, dvoosni preizkus, Weibullova porazdelitev

## Bend strength of alumina ceramic in uniaxial and biaxial test

### ABSTRACT

Measured values of the bend strength of ceramic samples usually agree very well with the Weibull distribution function. We measured the bend strength of alumina ceramics, using the four-point method for rectangular samples and biaxial test for discs. The Weibull parameters were evaluated with the momentum method, linear regression and maximum likelihood method. We found that the strength distribution fits the Weibull distribution well and the three methods give similar, but not equal parameter values. The mean strength of rectangular samples is smaller than for discs, and the same holds for the relative standard deviation of strengths. The Weibull modulus for rectangular samples is significantly larger than that for discs.

**Keywords:** alumina ceramics, bend strength, uniaxial test, biaxial test, Weibull distribution

## 1 UVOD

Weibullova porazdelitev je znana že od sredine prejšnjega stoletja in je osnovana na principu »najšibkejšega člana«, to je, material oz. izdelek se zlomi, ko popusti njegov najšibkejši del [1]. Pri značilnih upogibnih preizkusih se izmerjene trdnosti vzorcev navadno zelo dobro ujemajo z Weibullovo porazdelitveno funkcijo, ki jo karakterizirata dva parametra: Weibullov modul in umeritveni parameter [2–12]. Zavedati pa se moramo, da so rezultati meritev v splošnem odvisni ne le od materiala samega in končne priprave vzorcev (npr. brušenja in poliranja), temveč v manjši meri tudi od preizkusne metode.

Znano je, da vzdržijo strukturni keramični materiali za velikostni red večje tlačne napetosti od nateznih. Torej so pri vsakdanjih aplikacijah keramičnih izdelkov lahko kritične predvsem natezne napetosti.

Ker se pri upogibnem preizkus v vzorcu pojavijo tako tlačne kot natezne napetosti, ni vseeno, kako preizkus izvedemo in kakšni so njegovi geometrijski parametri. Med seboj se bistveno razlikujeta enoosni in dvoosni upogibni preizkus: pri prvem ima diagonalizirani napetostni tenzor samo en od nič različen diagonalni element, pri dvoosnem pa sta takšna dva elementa, navadno enako velika [13]. Povedano poenostavljeno, pri enoosnem preizkus se v vsaki točki vzorca napetosti (npr. natezne sile na ploščinsko enoto) pojavljajo v eni smeri, pri dvoosnem preizkus pa v dveh smereh (natančneje v celi ravnini po smereh). Pri keramiki z relativno nizko vrednostjo Weibullovega modula pa je ključen geometrijski parameter tudi efektivni volumen obremenjevanja vzorcev [14].

Zaradi primerjave rezultatov trdnosti za obe vrsti preizkusa smo izdelali keramične vzorce iz korundne keramike (aluminijevega oksida,  $Al_2O_3$ ) v obliki kvadrov (paličk) in valjev (ploščic). Po priporočilih standardov smo izdelali po 30 vzorcev obeh oblik [15]. Po meritvi trdnosti smo podatke statistično analizirali in izračunali oba Weibullova parametra s tremi različnimi metodami: z metodo momentov, linearno regresijo in metodo maksimalne verjetnosti. Nazadnje smo primerjali tudi efektivna volumna vzorcev pri obeh upogibnih preizkusih, enoosnem za paličke in dvoosnem za okrogle ploščice. Razliko v povprečni trdnosti vzorcev pri obeh preizkusih se da delno razložiti z različnima efektivnima volumnoma. Vendar pa moramo zaradi različne priprave vzorcev (predvsem gre za različno geometrijo kalupov pri enoosnem stiskanju prahov pred sintranjem) pričakovati tudi vsaj nekoliko različno porazdelitev mikroskopskih napak pri končnih vzorcih obeh vrst, le-te pa določajo Weibullov modul.

## 2 PRIPRAVA VZORCEV

Uporabili smo prah (granulat) iz aluminijevega oksida APA RTP SB proizvajalca Sasol North America Inc. Za vzorce v obliki paličk smo odtehtali po 1,70 g, za tiste v obliki ploščic pa po 2,00 g, potem pa smo jih enoosno stisnili v jeklenem kalupu s tlakom 100 MPa (paličke) oziroma 150 MPa (ploščice). Vzorce obeh vrst smo sintrali v enakih razmerah: štiri ure pri temperaturi 1450 °C (zrak,  $p = 1$  bar). Po sin-

tranju smo vzorce zbrusili in polirali, velikost abrazivnih delcev v končni stopnji poliranja pa je bila  $1 \mu\text{m}$ .

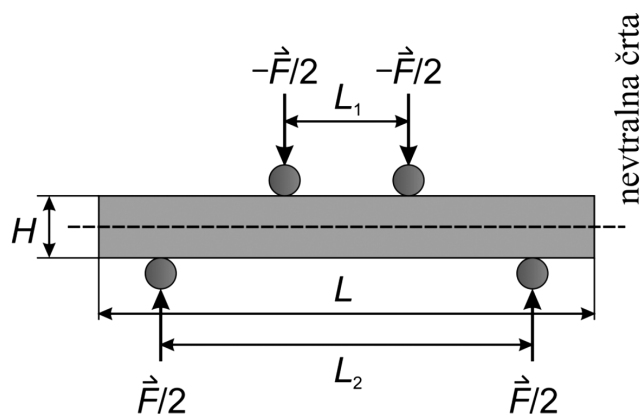
### 3 MERITEV TRDNOSTI

Trdnost je fizikalna količina, ki opisuje odpornost materiala ali vzorca proti mehanski napetosti. Pri keramičnih vzorcih jo je najlažje meriti z upogibnim preizkusom, saj je npr. enoosni natezni preizkus precej zahtevnejši [16].

#### 3.1 Upogibni preizkus paličastega vzorca

Obravnavajmo upogib palice. Ta ima obliko kvadra z dolžino  $L$ , širino  $W$  in višino  $H$ . Pri preizkusnem upogibanju palice uporabimo štiritočkovno metodo. Pri njej postavimo vzorec na dva valjasta podstavka, tako da sta postavljena simetrično blizu levega in desnega konca palice. Nato z zgornje strani pritisnemo na vzorec preko valjev, ki sta bližje skupaj kot spodnja valja (sliki 1 in 2). Palica se ob tej obremenitvi elastično deformira, dokler je sila v elastičnem območju. V njej se pojavijo napetosti zaradi notranjih sil v materialu, ki nastanejo kot odziv na zunanje sile preko valjev. Ko silo na zgornji valj povečujemo do mejne napetosti v palici, le-ta počne. Pri računanju napetosti v vzorcu iz značilne krhke keramike lahko aproksimiramo linearno elastično vedenje snovi prav do sile zloma.

Palico na sredi njene višine  $H$  v mislih prerežemo z vzdolžno ravnino. To ravnino v dvodimenzionalnem prerezu prikažemo kot črto, imenujemo pa jo nevtralna črta brez napetosti (slika 1). Seveda se ta črta nahaja na sredini le takrat, ko je palica homogena. Ob obremenitvi palice se pod nevtralno črto pojavijo natezne sile, nad njo pa tlačne.



Slika 1: Štiritočkovni upogibni preizkus (dvodimenzionalni prerez)

Zgornja dva valja sta oddaljena za  $L_1$ , spodnja dva pa za  $L_2$ . Upogibno trdnost vzorca  $\sigma$  izračunamo iz lomne sile  $F$  po enačbi:

$$\sigma = \frac{3F(L_2 - L_1)}{2WH^2} \quad (1)$$

Dolžina vzorca  $L$  se v enačbi (1) ne pojavi, seveda pa mora veljati  $L > L_2$ .

Za statistično porazdelitev trdnosti je pomemben tudi efektivni volumen pri upogibu. To je del vzorca, ki občuti napetosti. Pri štiritočkovnem upogibnem preizkusu je efektivni volumen tisti del vzorca, ki ga omejujeta spodnji dve podpori, kot razberemo s slike 1. Seveda napetost občuti (skoraj) cel vzorec, vendar so te napetosti največje in najpomembnejše za zlom med spodnjima podporama. Zato prevzame spodnji del vzorca največji delež pri računu efektivnega volumna. Smiselna enačba za oceno efektivnega volumna pri splošni obliki vzorca je:

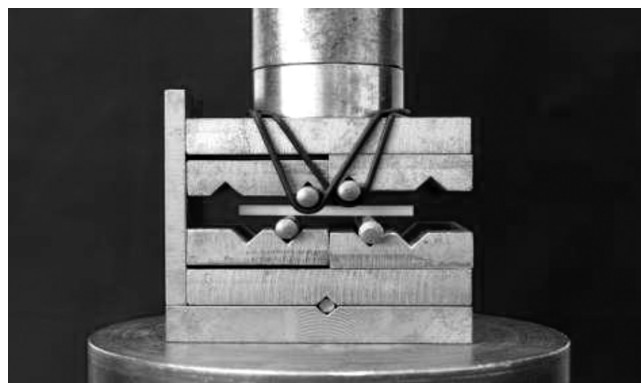
$$V_{\text{ef}} = \int \frac{\sigma}{\sigma_{\text{max}}} dV \quad (2)$$

Integriramo le po tistem delu prostornine vzorca, kjer se pri preizkusu pojavijo natezne napetosti. V enačbi (2) se natezna napetost  $\sigma$  spreminja po prostornini vzorca, s  $\sigma_{\text{max}}$  pa označimo največjo napetost v vzorcu.

Efektivni volumen pri enoosnem upogibnem preizkusu za paličko je:

$$V_{\text{pal}} = \frac{WH(L_1 + L_2)}{8} \quad (3)$$

Enačbo (3) izpeljemo iz splošne enačbe (2), če integriramo le po spodnji polovici vzorca na sliki 1. Pri tem upoštevamo, da se napetost po debelini vzorca povečuje linearno od nevtralne ploskve do spodnjega roba vzorca, medtem ko se v vzdolžni smeri linearno zmanjšuje od območja pod bližnjima valjema do vrednosti nič na mestih spodnjih podpornih valjev. To pomeni tudi, da je napetost levo od levega spodnjega valja in desno od desnega spodnjega valja enaka nič;



Slika 2: Fotografija štiritočkovnega upogibnega preizkusa



zato se dolžina vzorca  $L$  ne pojavlja v enačbah (1) in (3).

### 3.2 Upogibni preizkus za okroglo ploščico

Ploščice smo lomili z metodo »bat na tri kroglice« (sliki 3 in 4). Pri tej metodi se presekanji stožec vpne v premerično os naprave, nosilec vzorca pa je posodica s tremi vdolbinicami. V te se pred meritvijo vstavi tri majhne kroglice. Te so postavljene na enaki razdalji med seboj, tako da oblikujejo oglišča enakostraničnega trikotnika. Prav je, da se vzorec centrira tako, da so vse kroglice enako oddaljene od zunanjega roba ploščice. Ploščica največkrat počni tako, da nastanejo trije kosi ali več, le včasih dva. Čim večje je število kosov, tem večje so vrednosti upogibne trdnosti. Pri samo dveh kosih so navadno izmerjene trdnosti precej slabše. Upogibno trdnost ob lomni sili  $F$  izračunamo takole [13]:

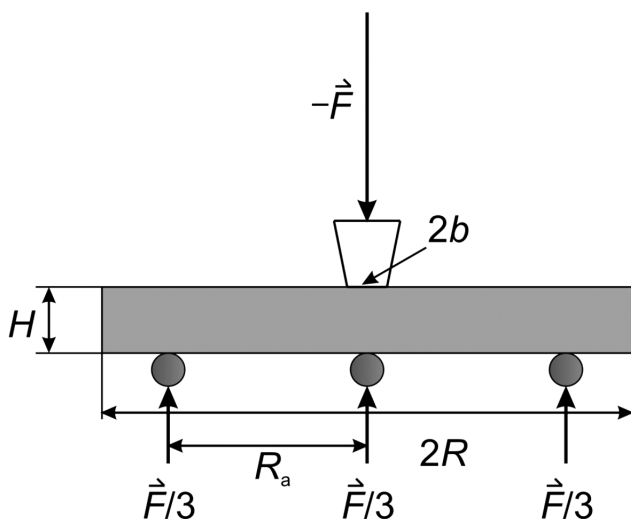
$$\sigma = \frac{3F(\xi - \lambda)}{2\pi H^2} \quad (4a)$$

kjer sta brezdimenzijska parametra:

$$\xi = (1 + \nu) \ln\left(\frac{b}{R}\right) + \frac{1 - \nu}{2} \left(\frac{b}{R}\right)^2 \quad (4b)$$

$$\lambda = (1 + \nu) \left[ 1 + \ln\left(\frac{R_a}{R}\right) \right] + (1 - \nu) \left(\frac{R_a}{R}\right)^2 \quad (4c)$$

Pri tem sta  $H$  in  $R$  debelina in polmer ploščice,  $R_a$  oddaljenost kroglic od geometrijske osi ploščice,  $b$  pa



**Slika 3:** Shema upogibnega preizkusa »bat na tri kroglice«: pogled s strani. Kar je videti kot pravokotnik, je v resnici valj z navpično geometrijsko osjo. Tri spodnje kroglice niso v isti liniji, temveč so razporejene v oglišča enakostraničnega trikotnika. Razdalja  $R_a$  je razdalja kroglic od geometrijske osi valja. Zgoraj pritiska s silo velikosti  $F$  na ploščico bat v obliki presekanega stožca. Zaradi simetrije prevzame spodaj vsaka podporna kroglica tretjino te sile.

je polmer kontaktne površine bata s ploščico. Enačbe (4) so samo semi-analitični približek, ki so ga preverili z numerično metodo končnih elementov.

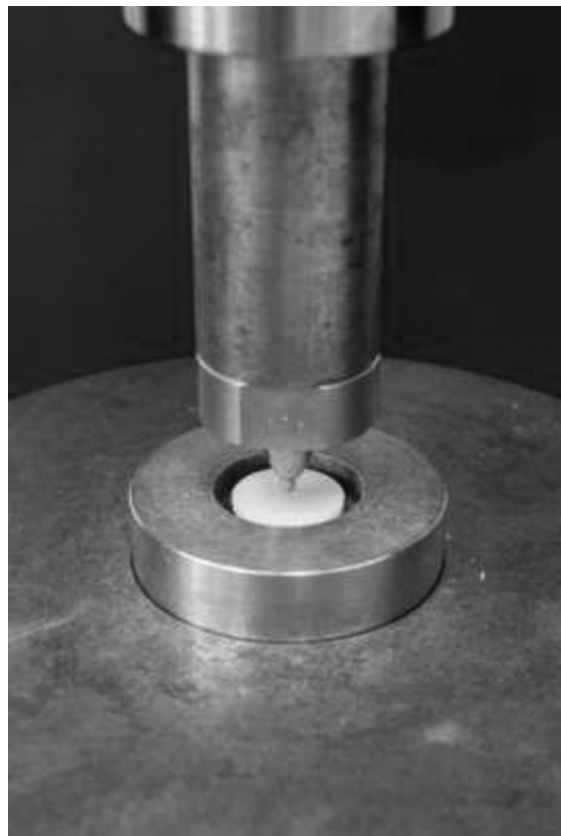
Enačba za efektivni volumen ploščice pri tem preizkusu je:

$$V_{\text{plo}} = \frac{\pi H}{4} \left[ R_a b + \frac{(R_a - b)^2}{3} \right] \quad (5)$$

Izračunamo ga iz enačbe (2), tako da integriramo le po spodnji polovici vzorca, privzamemo radialno simetrično porazdelitev napetosti ter grob približek, da se napetost linearno povečuje od srednje ravnine ploščice do spodnje ploskve (podobno kot pri paličkah), v radialni smeri pa se linearno zmanjšuje od roba bata do kroga z nosilnimi kroglicami.

### 4 WEIBULLOVA PORAZDELITEV IN IZRAČUN NJENIH PARAMETROV

Naredimo samo kratek povzetek Weibullove porazdelitve in bistva uporabljenih metod za izračun Weibullovih parametrov, saj smo že obširneje pisali v prejšnjih številkah Vakuumista [11, 17]. Naša ključna spremenljivka je upogibna trdnost  $\sigma$ . V računih uporabimo obe porazdelitveni funkciji: verjetnostno gostoto  $p(\sigma)$  in kumulativno verjetnostno funkcijo:



**Slika 4:** Fotografija dvoosnega upogibnega preizkusa; kroglice so skrite pod vzorcem

$$P(\sigma) = \int_0^{\sigma} p(x) dx$$

Pri dvoparametrični Weibullovi porazdelitvi sta obe verjetnostni funkciji  $p$  in  $P$ :

$$p(\sigma) = \frac{m}{\sigma_0} \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{m-1} \cdot \exp \left( - \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right) \quad (6a)$$

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left( - \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right) \quad (6b)$$

z Weibullovim modulom  $m$  in karakterističnim (umeritvenim) parametrom  $\sigma_0$ . Za izračun obeh Weibullovih porazdelitev (v bistvu gre za statistično oceno njihovih najverjetnejših vrednosti) smo uporabili tri dobro znane metode: linearno regresijo (LR), metodo največje verjetnosti (v literaturi: ML = *maximum likelihood*) in metodo momentov (MM). Pri LR lineariziramo funkcijo (6b) in iščemo premico, ki se najbolje prilega eksperimentalnim podatkom. Pri ML uporabimo funkcijo (6a) in maksimiramo logaritem produkta vrednosti funkcije pri vseh izmerjenih trdnostih. Pri MM pa izračunamo Weibullova parametra s primerjavo eksperimentalne in teoretične vrednosti povprečne trdnosti in njene standardne deviacije. Pričakujemo, da bodo za zelo veliko številov vzorcev vse tri metode dale enake vrednosti parametrov; ne sme pa nas čuditi, če se pri številu vzorcev  $N = 30$ , ki je s statističnega vidika še dokaj majhno, izračunane vrednosti predvsem parametra  $m$  znatno razlikujejo. Omenimo še, da smo pri metodi LR uporabili obe značilni različici: pri »x-regresiji« (xLR) pri iskanju najprimernejše premice  $y = kx + n$  minimiziramo vsoto kvadratov »vodoravnih« razdalj med premico in  $N$  točkami  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1 - N$ . Nasprotno minimiziramo pri »y-regresiji« (yLR) vsoto kvadratov »navpičnih« razdalj.

## 5 REZULTATI IN DISKUSIJA

### 5.1 Trdnost paličk

Dimenzije paličk so bile približno:  $L = 35$  mm,  $H = 4$  mm,  $W = 2,5-3$  mm, pri vsaki posebej pa smo dimenzije pri preizkusu natančno izmerili. Razmika med valji sta bila:  $L_1 = 10$  mm,  $L_2 = 20$  mm [16]. Od

**Tabela 1:** Izračunana Weibullova parametra za 30 podatkov trdnosti za paličke

Metoda	$m$	$\sigma_0$ /MPa
xLR	8,59	292,74
yLR	6,81	297,84
ML	6,15	298,10
MM	7,02	296,82

30 meritev je bila najmanjša trdnost 221,14 MPa, največja pa 372,80 MPa. Vrednosti trdnosti so za korundno keramiko dokaj skromne. Povprečna vrednost trdnosti je bila  $\langle \sigma_{\text{pal}} \rangle = 277,69$  MPa, standardna deviacija pa  $\delta \sigma_{\text{pal}} = 47,35$  MPa. Weibullova parametra, izračunana po vse štirih metodah (LR ima dve različici), sta prikazana v **tabeli 1**.

Weibullov modul  $m$  je dokaj majhen, saj je za skrbno izdelano keramiko navadno precej večji od 10. Različne metode dajo precej različne vrednosti  $m$ , medtem ko je ocena umeritvenega parametra veliko bolj zanesljiva.

### 5.2 Trdnost okroglih ploščic

Dimenzije ploščic so bile približno:  $2R = 16,7$  mm,  $H = 1,8$  mm. Tako kot pri paličkah, smo posebej natančneje izmerili dimenzije vsake ploščice. Posebej previdno in natančno je treba izmeriti debelino  $H$ , saj je tako pri ploščicah kot pri paličkah v izrazu za upogibno trdnost kvadrat debeline; enačbi (1) in (4a). Debeline vzorcev so namreč majhne, da jih laže zlomimo, pri nenatančnem merjenju pa je lahko relativna napaka meritve debeline velika. Po priporočilih smo debeline ploščic izmerili po zlomu: če se je npr. ploščica zlomila na tri kose, smo izmerili debeline vseh treh blizu središča in izračunali povprečje debelin. Premer kroglic je bil 2 mm (nepomemben podatek za enačbo (4), da le kroglice niso prevelike), drugi ključni podatki za izračun trdnosti pa so bili še:  $2R = 16,70-16,81$  mm,  $2R_a = 11$  mm,  $2b = 1,4$  mm. Od 30 meritev je bila najmanjša trdnost 197,20 MPa, največja pa 533,06 MPa. Povprečna vrednost trdnosti je bila  $\langle \sigma_{\text{plo}} \rangle = 338,39$  MPa, večja kot pri paličkah, standardna deviacija pa  $\delta \sigma_{\text{plo}} = 86,77$  MPa. Relativna standardna deviacija je večja kot pri paličkah, kar kaže na še manjši Weibullov modul pri ploščicah, pa čeprav je povprečna trdnost večja. Weibullova parametra za ploščice sta prikazana v **tabeli 2**.

**Tabela 2:** Izračunana Weibullova parametra za 30 podatkov trdnosti za ploščice

Metoda	$m$	$\sigma_0$ /MPa
xLR	5,27	365,54
yLR	4,78	369,58
ML	4,13	371,86
MM	4,50	370,81

Pozorni smo bili tudi na to, na koliko kosov se pri preizkusu zlomi ploščica: pri naših preizkusih od dva do štiri. Po pričakovanju so imeli vzorci, ki so se zlomili na tri ali štiri kose, precej večje trdnosti od tistih, ki so se zlomili samo na dva kosa. Zanimivi so tudi koti, pod katerimi so se vzorci zlomili (središčni koti kosov): ti koti kažejo tendenco k trištevni simetriji zaradi geometrije preizkusa, vsaj pri zlomu na dva ali tri kose. Simetrija ni bila popolna, vendar smo pri zlo-

mu vzorcev na tri dele opazili preferenčni kot  $120^\circ$ , pri zlomu na dva kosa pa preferenčna kota  $120^\circ$  in  $240^\circ$ . Pri zlomu na dva kosa je bil namreč en kos vedno večji od drugega in ni bilo primera, da bi bila oba središčna kota vsaj približno enaka  $180^\circ$ .

Vzroki za to, da je predvsem Weibullov modul tako majhen in pri ploščicah še manjši kot pri paličkah, so lahko različni. Najprej gre za pripravo vzorcev že pri pazljivosti nasipavanja prahov v kalupe, poravnavanju in ročnem stiskanju. Že v tej prvi fazi priprave lahko nastane razlika v kakovosti različnih oblik vzorcev (paličk in ploščic v našem primeru), ker so pri stiskanju zelo pomembne nehomogenosti tlaka po prostornini vzorca. Dalje, pomembni so parametri sintranja pa tudi končno oblikovanje (brušenje in poliranje) vzorcev pred upogibnimi preizkusi.

Omenimo še, da na končne rezultate, predvsem gre za relativno standardno deviacijo trdnosti in izračunani Weibullov modul, vplivajo tudi napake pri sami meritvi. Ne gre toliko za nenatančnost merjenja lomne sile, saj je merilna naprava zelo zanesljiva. Na napake morda najbolj vpliva morebitna površnost pri merjenju debeline vzorcev, saj je v obeh ključnih enačbah, (5) in (7 a), v imenovalcu izraza kvadrat debeline. Na rezultate vpliva tudi prevelika nehomogenost debeline, ki je lahko posledica nepravilnega nasipavanja in stiskanja v kalupih pred sintranjem. Gre pa tudi za poravnavo vzorcev v nosilcu, predvsem dobro centriranje ploščic. Vendar pa so računske simulacije na osnovi metode končnih elementov pokazale, da je vpliv takšnih napak zanemarljiv v primerjavi z inherentnimi razlikami med vzorci zaradi naključno porazdeljenih strukturnih napak, če le nismo pri merjenju preveč površni [18].

### 5.3 Primerjava efektivnih volumnov paličk in ploščic

Nazadnje primerjajmo vrednosti efektivnega volumna za ploščice in paličke. Efektivni volumen za paličke izračunamo po enačbi (6) in meri  $V_{\text{pal}} = 44,1 \text{ mm}^3$ . Efektivni volumen za ploščice pa je po enačbi (8) enak  $V_{\text{plo}} = 16,75 \text{ mm}^3$ . Iz teorije zloma, ki izhaja iz statistične porazdelitve (mikro)napak v vzorcih, sklepamo, da je pri Weibullovi porazdelitvi trdnosti vzorcev povprečna trdnost odvisna ne samo od kakovosti materiala, temveč tudi od efektivnega volumna pri upogibnem ali kakem drugem preizkusu trdnosti [14]. Čim večji je ta volumen, tem manjša je povprečna trdnost. Če med seboj primerjamo povprečno trdnost dveh skupin vzorcev iz sicer enakega materiala, a pri različnem načinu merjenja, lahko uporabimo enačbo:

$$\frac{\langle \sigma_{\text{plo}} \rangle}{\langle \sigma_{\text{pal}} \rangle} = \left( \frac{\langle V_{\text{pal}} \rangle}{\langle V_{\text{plo}} \rangle} \right)^{1/m} \quad (7)$$

Enačba (7) dobro velja za enotno vrednost Weibullovega modula  $m$ . Ker je potenčni eksponent pri razmerju volumnov na desni strani enačbe enak  $1/m$ , je očitno, da čim večja je vrednost modula  $m$ , tem šibkejša je odvisnost povprečne trdnosti od efektivnega volumna pri preizkusu. Če pa so vrednosti  $m$  skromne kot pri naših meritvah, utegne različen efektivni volumen pri obeh preizkusih precej vplivati na razliko v povprečni trdnosti. V našem izračunu smo za Weibullov modul  $m$  vzeli kar njegovo povprečno vrednost iz tabel 1 in 2 za obe vrsti preizkusa in za vse metode. To sicer ni povsem pravilno, saj sta modula pri obeh vrstah preizkusov precej različna med seboj, a vseeno nam bo račun dal neko kvalitativno oceno. Po enačbi (7) dobimo teoretični rezultat za razmerje povprečnih trdnosti ploščic in paličk 1,18, medtem ko je eksperimentalno razmerje enako:

$$\langle \sigma_{\text{plo}} \rangle / \langle \sigma_{\text{pa}} \rangle = (338,39 \text{ MPa}) / (277,69 \text{ MPa}) = 1,22.$$

Rezultata sta si relativno blizu, tako da je zelo verjetno delni vzrok za različni povprečni trdnosti pri obeh preizkusih različen efektivni volumen vzorcev. Zagotovo pa so vzroki za različne parametre Weibullove statistike tudi »notranje« narave (različna porazdelitev napak), saj različen efektivni volumen ne more razložiti zelo različna Weibullova modula pri obeh skupinah vzorcev.

## 6 SKLEP

Pri vzorcih v obliki okroglih ploščic in ravnih paličk iz korundne keramike smo izmerili upogibno trdnost z dvoosnim in enoosnim preizkusom. Ugotovili smo, da je povprečna upogibna trdnost okroglih ploščic večja kot pri paličkah in prav tako relativna standardna deviacija. To pomeni, da je Weibullov modul pri ploščicah bistveno manjši kot pri paličkah. Razlika v obeh Weibullovih modulih najverjetneje izhaja iz razlik v pripravi vzorcev. Medtem ko je pri paličkah zveza med lomno silo in upogibno trdnostjo preprosta, potrebujemo pri ploščicah za izračun trdnosti semianalitične modele, ki izhajajo iz numeričnih simulacij (metoda končnih elementov). Pri dejanski aplikaciji keramičnih izdelkov pa je dvoosna napestostna obremenitev verjetno bolj realna od enoosnega opisa. Večjo povprečno trdnost pri ploščicah v primerjavi s paličkami se da samo delno razložiti z manjšim efektivnim volumnom obremenjevanja.

## 7 LITERATURA

- [1] W. Weibull, *J. Appl. Mech.*, 18 (1951), 293
- [2] P. Kittl, G. Diaz, *Res. Mech.* 24 (1988), 99
- [3] N. Orlovskaja, H. Peterlik, M. Marcevski, K. Kromp, *J. Mater. Sci.*, 32 (1997), 1903
- [4] R. Danzer, T. Lube, P. Supancic, *Z. Metall.*, 92 (2001), 773
- [5] D. Wu, Y. Li, *Chem. Eng. Sci.*, 56 (2001), 7035
- [6] I. J. Davies, *J. Mater. Sci.*, 39 (2004), 1444



- [7] D. Wu, J. Zhou, Y. Li, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 26 (2006), 1099
- [8] M. Ambrožič, L. Gorjan, *J. Mater. Sci.*, 46 (2011), 1862
- [9] L. Gorjan, M. Ambrožič, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 32 (2012), 1221
- [11] M. Ambrožič, L. Gorjan, *Vakuumist*, 32 (2012) 3, 12
- [12] M. Ambrožič, L. Gorjan, M. Gomilšek, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 34 (2014), 1873
- [13] A. Borger, P. Supancic, R. Danzer, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 22 (2002), 1425
- [14] R. Danzer, P. Supancic, T. Lube, *Z. Metall.*, 92 (2001), 773
- [15] ASTM C 1239 – 95: Standard practice for Reporting Uniaxial Strength Data and Estimating Weibull Distribution Parameters for Advanced Ceramics, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1995
- [16] ASTM C 1161 – 94: Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994
- [17] M. Gomilšek, M. Ambrožič, L. Gorjan, *Vakuumist*, 33 (2013) 4, 4
- [18] A. Borger, P. Supancic, R. Danzer, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 24 (2004), 2917

# RAZVOJ VAKUUMSKIH TEHNOLOGIJ PO SHEMI TOYNBEE-KUHN-JUŽNIČ (Ob Unescovem letu, posvečenem svetlobi in z njo povezano tehnologijo)

Stanislav Južnič

ZNASTVENI ČLANEK

Univerza v Oklahomi, Oddelek za zgodovino znanosti, Norman, Oklahoma, ZDA; Arhiv Slovenske jezuitske province, Ljubljana

## POVZETEK

Prispevek opisuje razvoj vakuumskih tehnik v petstopenjski shemi. Osredinja se na tri poglobitve izume: živosrebrni vakuumski barometer, vakuumsko črpalko in katodno elektronko. Posebno zadnja je med najbolj vplivnimi iznajdbami do sedaj. Za konec je ponujena še projekcija prihodnjega razvoja vakuumskih tehnik pod taktirko drugačnih moči, ki bodo sledile novim vakuumistom iz meščanskih, kmečkih in ženskih okolij v prihodnjih dosežkih nebelih raziskovalcev vakuumskih tehnologij. Ob Unescovem letu, posvečenem svetlobi in z njo povezano tehnologijo, je predstavljena krivulja razvoja fizikalnega raziskovanja optičnih pojavov s posebnim poudarkom na vakuumskih tehnikah.

**Gljučne besede:** zgodovina vakuumskih tehnologij, vakuumski živosrebrni barometri, vakuumske črpalke, katodne elektronke

## Development of vacuum technologies according to Toynbee-Kuhn-Južnič's model

### ABSTRACT

The development of vacuum techniques in a five-step scheme is illustrated. It focuses on three major inventions: vacuum mercury barometer, air pump, and cathode ray tube. Especially the last one turns out to be one of the most influential inventions of all times. For conclusion, the projection of future development of vacuum techniques is given under the guidance of new incoming research powers. The future contributions of non-white researchers of vacuum technologies will join recently advanced vacuum techniques researchers from middle-class, rural, and female environments. On the UNESCO's year dedicated to light and involved technologies a chart is published showing the development of physical optics on the basis of vacuum technologies.

**Keywords:** history of vacuum technologies, vacuum mercury barometers, air pumps, cathode ray tubes

## 1 UVOD

Raziskovanja praznega so stara kot svet sam; gre za razmišljanja o neskončno majhnem in neskončno velikem, ki sta obenem temelja infinitezimalnega računa. Seveda razglabljanja o obstoju vakuuma v naravi sprva niso bila podprta s posebno prepričljivimi poskusi.

Enotna antična fizika se je razdelila na osnovne, danes klasične panoge v razmeroma dolgem obdobju med letoma 1600 in 1785, med Galileijem in francosko revolucijo. S prepovedjo jezuitske družbe se je leta 1773 formalno končalo sholastično poučevanje po Aristotelovih osmih knjigah fizike, za katerimi so uporabljali še dele knjig: *O nebu*, *O nastajanju in propadanju*, *Meteorologika* ter *O duši*.

Dokončnost, po S. Toulminovem mnenju pa dodatno še mirovanje kot naravno stanje Aristotelove znanosti namesto sodobne dinamike, sta bili Aristotelovi srednjeveški prednosti in obenem renesančni slabosti. Postali sta oviri sprememb in napredka.<sup>1</sup> Aristotel je kot znanstvenik obdržal prestiž predvsem v biologiji, kjer ga je spoštoval Charles Darwin, leta 1842 pa je Johannes Müller dokazal dolgo dvomljiva Aristotelova opazovanja poroda morskih mačk.<sup>2</sup> Podobno se je A. Kircherjeva znanstvena verodostojnost obdržala predvsem v akustiki. Sholastično in še posebej Kircherjevo nekonvencionalno kritiziranje teoretskih posledic razvoja vakuumskih tehnologij je zaznamovalo ljubljanske izobražence predvsem pod vplivom jezuitske univerze v Gradcu; vpliv dunajskih učenjakov je bil precej manjši, kot prikazujeta **sliki 1** in **2**.

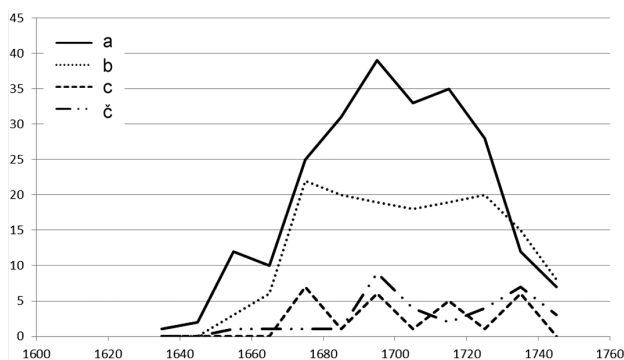
Andronicus z Rodosa naj bi Aristotelove knjige uredil komaj po Kristusovi smrti, kot je med drugim poročal Hegel. Čeprav so nekateri priporočali začetek branja Aristotelovih umotvorov pri fiziki, se je vplivni Andronicus odločil za uvodno logiko. Aristotelovi fiziko in metafiziko so na pariški univerzi prepovedali leta 1210 in 1215; očitno nesporne Aristotelove logike prepoved ni zajela. Tako je Aristotelov nauk dejansko gospodoval do Galileijevih dni borih tri ali kvečjemu pet stoletij. Nato je njegova vseprisotnost počasi hiralala



**Slika 1:** Število jezuitov, rojenih na sredi desetletnega intervala, narisano na vodoravni osi: (a) službujočih v Ljubljani med letoma 1704 in 1773, (b) ki so na drugih kolegijih predavali filozofijo s fiziko od skupno 178, (c) ki so na drugih kolegijih predavali ali repetirali matematiko od skupno 104, (č) število piscev med ljubljanskimi jezuiti od skupno 169

<sup>1</sup> Kovačevič, 2014, 19; Južnič, 1983, 228, 237

<sup>2</sup> Grant, 2007, 34



**Slika 2:** Število nekdanjih študentov prvega letnika na sredi desetletnega intervala, narisano na vodoravni osi: (a) filozofije s fiziko na graški univerzi od skupno 224, (b) filozofije na dunajski univerzi od skupno 150 tistih, ki so službovali v Ljubljani med letoma 1704 in 1773, (c) filozofije na Trnavski univerzi od skupno 27 tistih, ki so službovali v Ljubljani med letoma 1704 in 1773, (č) filozofije od skupno 35 tistih, ki so službovali v Ljubljani med letoma 1704 in 1773

tudi zaradi Aristotelovega zavračanja vakuuma, v katerem naj bi telesa padala z neskončno hitrostjo.

Aristotelov prestiž so spodkopale vakuumske tehnologije kot interdisciplinarno raziskovalno področje, rojeno ob načrtu za barometer Evangelista Torricellija v Firencah pred 372 leti. Po razdelitvi, merodajni za klasično fiziko, se da povedati, da so barometre in vakuumske črpalke sprva uporabljali kar v vseh panogah fizike vključno z mehaniko in pri raziskovanju svetlobe. Ko so se sredi 19. stoletja z J. Plückerjevim in Geisslerjevim izumom katodnih elektronk raziskave nekoliko specializirale, so postale vakuumske tehnologije uporabne predvsem za preučevanje elektromagnetnih in toplotnih pojavov.<sup>3</sup>

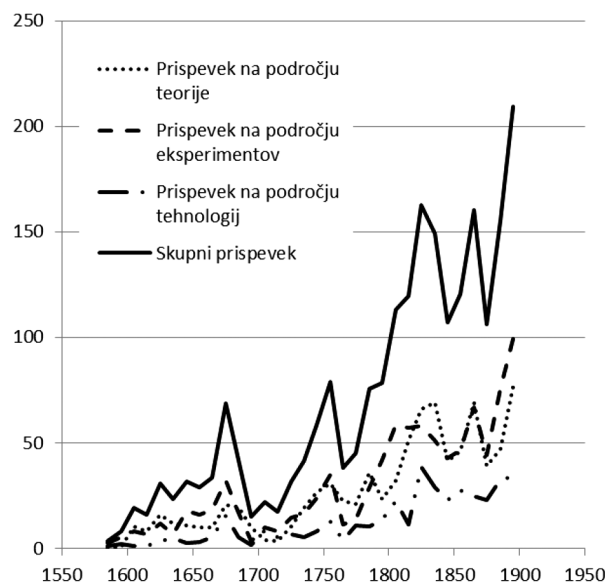
Vakuumska tehnika očitno napreduje k vse nižjim tlakom nasprotno od prenekaterih drugih znanstvenih področij, kjer smer morebitnega napredka ni tako zlahka razvidna. Raziskovanje vakuumskih tehnologij je, tako kot vsako drugo, občasno briljiralo z imenitnimi izumi, kot so bili barometer, vakuumska črpalka ali katodna elektronka. Thomas Kuhn bi te dogodke morda imel za revolucijo. Izumom je sledila strma rast raziskovalnih prispevkov, ki se je sčasoma vnesla med širjenjem v dotlej nepokrita področja raziskav, denimo v biologijo.

Ob izzivih novih področij so se porajali na videz nerešljivi problemi, ki so rast ustavili ali pa so jo zapeljali na kriva pota. Krivulja rasti se je, kot pravimo fiziki, zlomila; njen odvod je spremenil predznak. Tedanjim raziskovalcem se dogajanja niso zdela prav nič alarmantna in so raziskovanje nadaljevali v območju univerzalne paradigme, ki je postala relevantna za mnogoteri področja znanstvenega raziskovanja. Vendar so zagate zloma klile in sprožale nove ideje, ki so tekmovala z dotedanjim osnovnim tokom razvoja,

*mainstreamom*. Ko so se različni programi primerjali in spopadli z dotlej prevladujočim, so nastala kriza in prerekanja med pomembnimi strujami, ki so si želele prepotrebne denarja za drage raziskave in vsakovrstne podpore. Preboj je omogočilo novo odkritje in sprožilo revolucijo, po njej pa novo rast.

Tako vsako paradigmo raziskovanja vakuumskih tehnologij in podobnih fizikalnih raziskovanj z malo truda priročno razdelimo v pet stanj: rast, zlom, univerzalno paradigmo, krizo in prevrat oz. revolucijo; rast prve paradigme posamične panoge je njena geneza. Med razvojem paradigme se rojevajo bistveni delovni pripomočki, ki jim pravimo univerzalne raziskovalne metode. Posamezne paradigme odigrajo svojo vlogo in prenehajo nastopati kot uporabne raziskovalne zamisli ali instrumenti. Ta nemila usoda je, denimo, zavdala vakuumskim živosrebrnim barometrom, ki jih dandanes ne uporabljamo več v laboratorijih in spadajo zgolj še v muzeje. Univerzalne raziskovalne metode pa so na svoj način večne, saj se dedujejo iz paradigme v njeno naslednico.

Posebnost razvoja vakuumskih tehnologij je njena izjemno hitra začetna rast kar v dveh samosvojih eksperimentalnih smereh. Prva dva odločilna poskusa, ki sta vakuumiste vzpostavila v evropskem merilu, sta bila namreč uprizorjena zelo hitro drug za drugim. Najprej sta florentinska Galileijeva duhovna dediča E. Torricelli in V. Viviani zasnovala in izvedla poskus s prvim barometrom. Desetletje pozneje je Otto Guericke s pomočjo kranjskega kneza Janeza Vajkarda



**Slika 3:** Prispevki vseh raziskovalcev fizike po Asimovu (1978), ocenjeni od 1 do 9. Vakuumske tehnike so prispevale predvsem k eksperimentom, najbolj zaznavno sredi 17. in sredi 19. stoletja z izumi barometra ter vakuumske črpalke oziroma katodne elektronke.

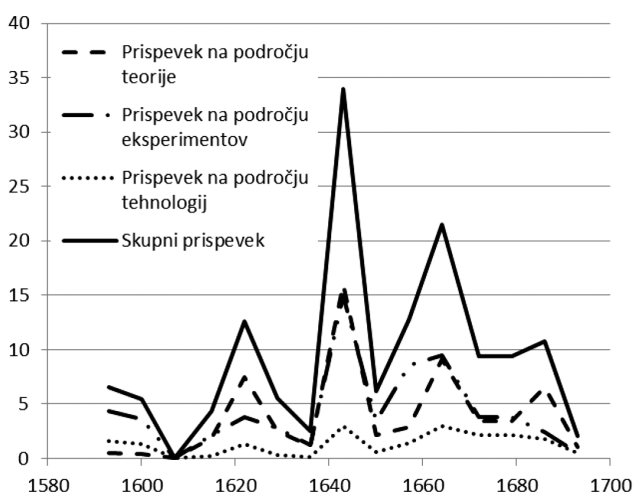
<sup>3</sup> Južnič, 2012, 34–39

Turjaškega izpeljal prve poskuse z vakuumsko črpalko. Severnoitalijanski strokovnjaki, Blaise Pascal z barometriškimi meritvami višin v Franciji in Guericke z barometriškim napovedovanjem neurja v Magdeburgu, so nadgradili odkritje barometra.

Istočasno se je vzporedno uveljavil Guerickejev izum vakuumске črpalke. Ta je imela prednosti in pomanjkljivosti v primerjavi z barometrom: omogočila je postavitev poskusa in njegovo sprotno spreminjanje v recipientu, sprva pa ni dosegala podtlaka tedanjih barometrov. Tako sta obe skupini raziskovalcev prisegali vsaka na svoje poskuse. Galilejevi dediči, zbrani okoli florentinske akademije *del Cimento*, so čislali barometre, »črpalkarji«, zbrani okoli Guerickejevih naprav v osrednji Nemčiji, Boylevoh v Angliji in Huygensovih v Parizu ter na Nizozemskem, pa so imeli raje vakuumске črpalke.

Črpalke so se sčasoma pokazale bolj priročne in so postale splošno uporabljane, čeprav drag univerzalni instrument. V Angliji jih je za veleprodajo proizvajal Newtonov varovanec Francis Hauksbee, na Nizozemskem pa kmalu za njim brata Musschenbroek. Ob njihovi manufakturi je paradigma vakuumskih črpalk vstopila v svojo univerzalno fazo, ko so jo množično uporabljali v številnih znanstvenih panogah od biologije do elektrike tudi v Ljubljani vsaj od srede 18. stoletja dalje. Vakuumski tehniki so s tedanjimi črpalkami s trdnim batom skušali predvsem izločiti čim več plina iz vakuumске posode in preprečiti puščanje. Od prvotnih 10 mbar so se polagoma približevali sanjski vrednosti 1 mbar, vendar brez posebnega uspeha ali dobičkonosne industrijske uporabe.

Parni stroj je resda podtlak nadomestil z nadtlakom; v njem pa so kljub temu razvijali prav dotedanje vakuumске tehnike v povsem novih gmotnih razmerah, polnih industrijske rasti. Razvoj vakuumске



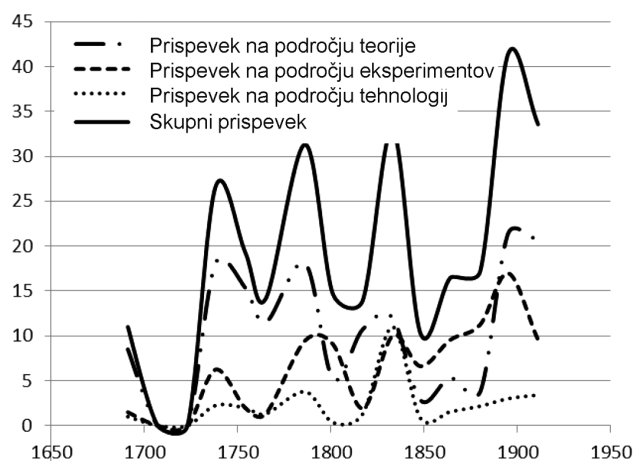
Slika 4: Raziskovalni prispevki v Galilejevi mehaniki z vakuumskimi prispevki pri eksperimentih sredi 17. stoletja in s poznejšimi tehnologijami parnih strojev

tehnike se je v senci trženja parnega stroja ustavil do leta 1855, ko je domiselni Geissler trdne bate nadomestil s kapljevinskimi, ki so do konca stoletja malodane dosegli milijoninko milibara med rastjo nove paradigme vakuumске tehnologije.

Podobno dobro kot nekoč vakuumski črpalke se je še v večji meri godilo Geisslerjevim katodnim elektronkam kot univerzalnemu instrumentu vseh bogato opremljenih kvantnomehanskih laboratorijev. Živosrebrni vakuumski barometer pa so prav tedaj po treh stoletjih in pol množične uporabe iz laboratorijev odstranili kot nepriročen, po novejših raziskavah celo nevaren merilnik. Pionirski poskusi z barometri in vakuumskimi črpalkami so ob katodnih elektronkah morda edini ali pa vsaj najbolj prepričljivi primeri v zgodovini fizike, v katerih so prispevki eksperimentalnih raziskovalcev dodobra prekosili kolege teoretike.

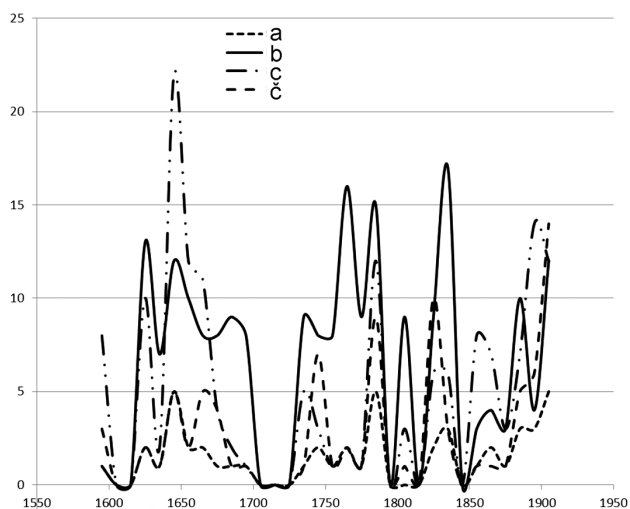
Kosanje raziskovalcev lepo prikazujejo **slike 4–6**. Ob koncu 19. stoletja so tehnološke aplikacije celo premagale raziskovalne prispevke eksperimentalnih in teorijskih učenjakov. Težave razvoja vakuumskih tehnik katodnih elektronk so znova naraščale z gmotnimi uspehi njihove industrijske uporabe v televizijah. Na prvi pogled se zdi uspešno trženje dobrodošlo, v resnici pa so kmalu postale same sebi namen in svojevrstna ovira za nadaljnje inovacije. Kapljevinski bati nove paradigme so izčrpali svoje zmogljivosti v času prve svetovne vojne. Tlak  $10^{-7}$  mbar so dosegale nove difuzijske črpalke,  $10^{-12}$  mbar pa so omogočile še obetavnejše črpalke z lovilniki.

V 21. stoletju smo znova priča stagnaciji in tudi že dvomljivim laboratorijskim potem k tlaku, nižjemu od tistega bajeslovnega v medzvezdnem prostoru. Vprašalnik se je znova povrnil na svojo začetno točko izpred štirih stoletij: Ali je (popoln) vakuum mogoč? Kaj v njem ostane? Kaj neki vsebuje, če v njem ni nič? Ali bližina absolutno praznega obeta podobno prese- netljive fizikalne lastnosti, kot je z njimi postregla



Slika 5: Raziskovalni prispevki – Newtonova mehanika





**Slika 6:** Raziskovalci mehanike glede na srednje leto dela v desetletnem intervalu: (a) število raziskovalcev, (b) prispevek teoretikov, (c) prispevek eksperimentalnega dela predvsem z vakuumskimi tehnologijami, (č) prispevek tehnoloških aplikacij

blizina absolutne temperaturne ničle pred dobrim stoletjem po Kamerlingh-Onnesovih meritvah superprevodnosti?

## 2 KATODNE ELEKTRONKE

Eksperimentalne in teorijske metode med seboj le težko tekmujejo, še posebej v moderni fiziki; primerjava med diametralno različnimi raziskovalnimi načini je pogosto jalova. Na poti k univerzalni eksperimentalni metodi so se izkazale predvsem vakuumske črpalke, ki so bile, vsaj pri florentinskih akademikih, povezane z Galilejevo raziskovalno metodo. Omogočile so katodno elektronko; podobno pomembni sta bili torzijska tehnica in elektroliza. V resnici so fiziki razvili še več drugih univerzalnih eksperimentalnih metod, ki so si jih fizikalne paradigme oziroma panoge med seboj sposojale: poleg najpomembnejše uporabe vakuumskih elektronskih naprav v vsej sodobni fiziki in tehnologiji se ponuja primer termičnega določanja intenzitete električnega toka ali svetilnosti. Svoje prvotne meje je preseglo tudi merjenje temperature telesa glede na barvo izsevane svetlobe pri Johnu Tyndallu. Njegove rezultate je Jožef Stefan uporabil pri odkritju svojega slavitega zakona leta 1879.

Kljub izjemni priljubljenosti se vakuumski barometer ali vakuumska črpalka nista razvila v povsem univerzalni raziskovalni metodi, čeprav črpalka niti ni bila daleč od tega ob številnih preizkušanjih gorenja, zvonjenja, dihanja in še marsičesa v izpraznjenem

recipientu. Resnično univerzalna metoda, ki jo dedujemo še dandanes, je postala komaj z vakuumsko črpalko izpraznjena katodna elektronka. Njeno praznost so pogosto vzdrževali in celo stopnjevali še z getri ter drugimi dodatnimi pripomočki.

Eksperimentalne univerzalne metode so zaporedoma vplivale na različne paradigme. Tako so poskusi v vedno boljšem vakuumu Otta Guerickeja po spodbudah kranjskega kneza Janeza Vajkarda Turjaškega najprej odločilno prispevali h kritikam Aristotelove in Descartesove mehanike, ki sta vakuum odklanjali. V resnici si je Guerickejevemu podoben poskus s konji zamislil že pariški klerik profesor Jean Buridan (\* okoli 1295; † po 1358), le da je z njim poskušal zavreči obstoj praznega, kar marsikomu ni prav nič ugajalo. Nicole Oresme si je zamišljal vakuum kot prostor med dvema svetovoma; oba bi nujno morala biti okrogla, zato med njima preostaja nekaj prostora. Prvi rektor dunajske univerze (1365), Albert Saški (\* okoli 1300; † 1390), je celo opisal primere domnevno počasnejšega padanja v praznem prostoru od padanja v polnem, ki se danes zdijo zmotni. Seveda nobene od srednjeveških vakuumu namenjenih domnev ni bilo mogoče v resnici preveriti s poskusom.

Boyle je svoj sloviti zakon zasnoval v iskanju dokazov proti zanikovalcem obstoja vakuuma.<sup>4</sup> Ideje zgodnje moderne znanosti Galileija, Boyla in Newtona so prihajale v naše dežele v knjigah, merilnih napravah vključno s sorazmernostnimi šestili, E. Halleyjevih obiskih in različnih jezuitskih priredbah vse do Boškovičeve, ki je vakuum in druga sodobna odkritja zadovoljivo prepletla z Aristotelovo logiko. Poznanje lastnosti nizkih tlakov in vakuuma je prišlo prav številnim britanskim izumiteljem parnih strojev,<sup>5</sup> prav tako pa Juriju Vegi in raziskovalcem zunanje balistike. Končno so vakuumske katodne elektronke postale del domala vseh eksperimentalnih pripomočkov sodobne fizike in industrije razen prikazovalnikov na tekoče kristale. Tako je Torricellijev opis vakuuma v barometru bolj kot kateri koli drug izum v zgodovini zaporedoma vplival na teorijo, tehnološko uporabo in fizikalne poskuse.

Najmočnejši orodji fizike med renesanso in kvantno mehaniko sta bili Galilejev miselni eksperiment z zanemarjanjem motilnih vplivov trenja in nepopolnega vakuuma ter uporaba infinitezimalnega računa v analitični mehaniki. Po Chandri Kantu Raju (\* 1954)<sup>6</sup> so infinitezimalni račun v Newtonovo in Leibnitzevo naročje prenesli jezuitski misijonarji pod portugalsko zastavo iz južnoindijskega območja Kerala v drugi polovici 16. stoletja. Obe z neskončnim

<sup>4</sup> Harré, 2002, 11; Grant, 2007, 223–224, 228–229; Buridan, 1509, 73'

<sup>5</sup> Toynbee, 1976, 565

<sup>6</sup> Raju, 2007



povezani orodji, vakuum in infinitezimalni račun, sta kot univerzalni metodi še danes vplivni v vsej fiziki; imeli sta namreč neprimerno večjo moč od drugih – konkurenčnih načinov raziskovanja.

Z Oerstedovim poskusom leta 1819 je ideja zakona ohranitve energije prevladala nad matematičnimi orodji analitične mehanike pod vplivom filozofije narave (*Naturphilosophie*) Fichtejevega študenta in Heglovega sošolca Friedricha Wilhelma Josepha Schellinga (\* 1775; † 1854).<sup>7</sup> To je bil poleg razmišljanj o obstoju vakuuma bržkone edini dovolj neposreden vpliv filozofov na razvoj sodobne fizike. Ampère je med letoma 1820 in 1834 dokazal premoč univerzalne metode, ki ji je dodal ponovno oživiljene nekoč vakuumu sovražne Descartesove vrtince.

**Tabela 1:** Primerjava med močmi paradigem, zraslih iz razvoja vakuumskih tehnik

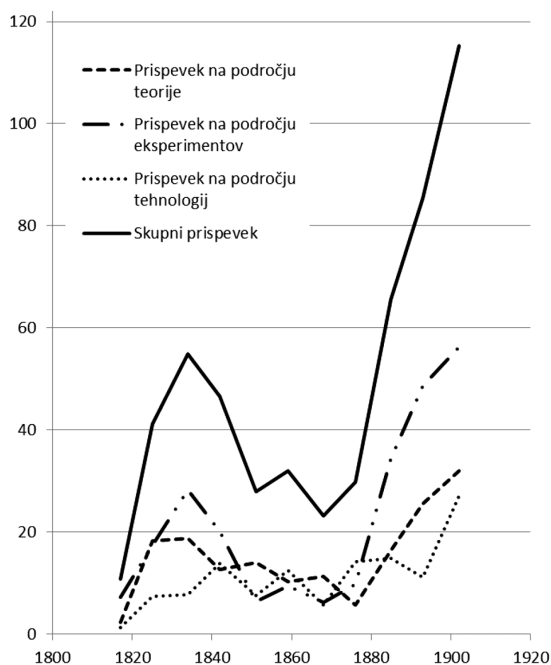
Leto	Pojavi (tehnologije)	Nasprotujoči si paradigmi
1644–1654	Barometer, vakuumska črpalka, tlak zraka	(Torricelli, Valeriano Magni, Guericke, Pascal in Boyle proti Aristotelu, Kircherju in Descartesu)
1918–1931	Televizija	Zworykinova tehnologija

Max Planck je pripisal statistični Boltzmannovi definiciji entropije večjo težo kot univerzalni raziskovalni metodi polja sil, kar je bilo v nasprotju z Einsteinom. Ta je polje postavil za osnovni element

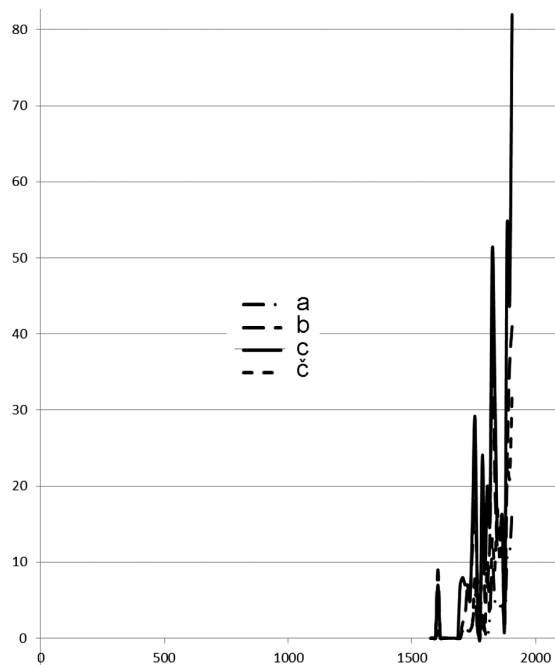
fizikalnega opisa, enakovrednega materiji v Newtonovi teoriji, tako prepričljivo, da je celo potrjeval zavrženo Descartesovo nasprotovanje vakuumu, češ da ni prostora, ki bi bil »izpraznjen vsega polja«. Seveda sta Descartes in njegov restavrator Einstein razsežnost-prostor povezovala s telesi, brez katerih ga ni. Einstein je stoletno dilemo nadgradil s polji, ki jih je s svojo enačbo  $E = mc^2$  pretvarjal v mase; pri tem je nespremenljiva svetlobna hitrost postala domala lastnost polja.<sup>8</sup>

Razmerje moči iz Maxwellovih časov se je pri Plancku obrnilo, kar ni presenetljivo. Planck je dal Boltzmannovi univerzalni metodi prednost pred Faraday-Maxwellovo, saj je svoje raziskovanje nadaljeval prav tam, kjer ga je končal Boltzmann. Trditev velja kljub Planckovi zgodnji nagnjenosti k Machovemu dvomu v atome, ki je jezila Boltzmann. Ernst Mach je bil predvsem glasen provokator, ki je med simpoziji o atomih spraševal govorce: »Ali ste jih videli?« Machu diametralno nasproten je bil Rutherfordov zagovor elektronov pred Eddingtonovo kritiko ob vzkliku: »Ne obstajajo? Ne obstajajo? Saj jih vendar jasno vidim, tako kot tole žlico pred seboj!«<sup>9</sup>

Takšna šaljiva retorika raziskovalcev, ki so napredovali drug drugemu ob rami, je imela več kot odločilen pomen tudi kot vir legendarnih domiselnih rekov, ki so jih občudovale mlade generacije utrjeval-



**Slika 7:** Raziskovalni prispevki v teorija polja, kjer so se vakuumske tehnike izkazale predvsem na področju eksperimentov po letu 1855, nato pa v številnih uporabnih tehnologijah

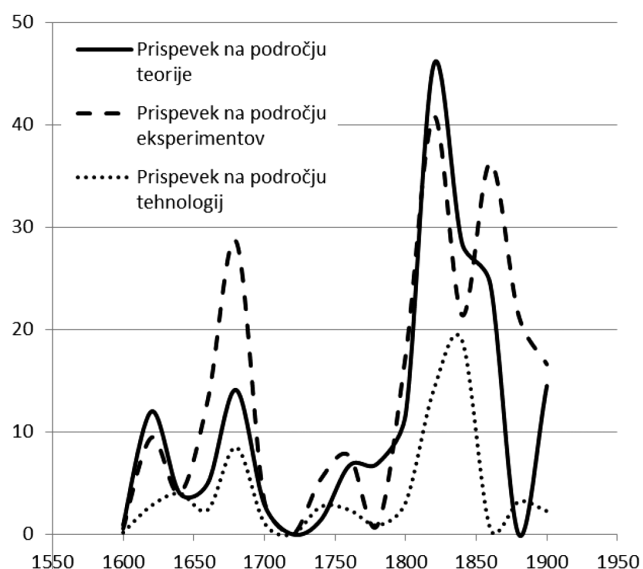


**Slika 8:** Raziskovalci elektromagnetizma v desetletnih intervalih: (a) število raziskovalcev, (b) teorija, (c) eksperimenti s prevladujočimi vakuumskimi tehnikami, (č) industrija vakuumskih naprav

<sup>7</sup> Pugač, 2004, 39

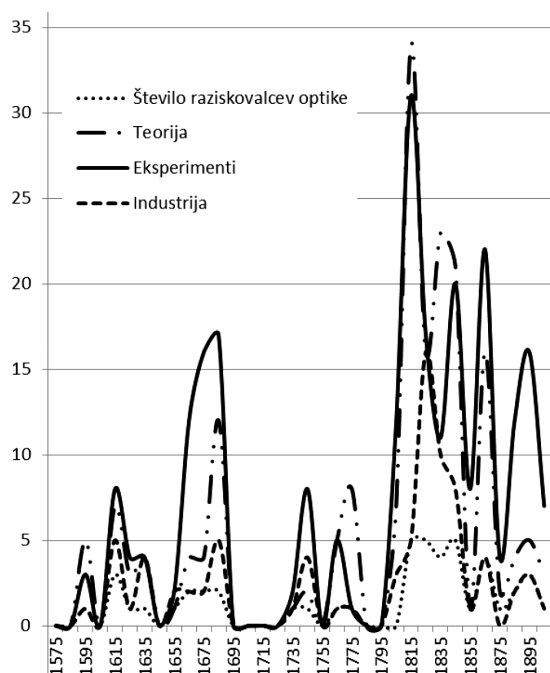
<sup>8</sup> Einstein, 2014, 94–95, 98; Balibar, 2014, 208–209, 212

<sup>9</sup> Reeves, 2008, 82



**Slika 9:** Raziskovalni prispevki v celotni optiki, ločeni po vrstah raziskovanja ob Unescovem letu, posvečenem svetlobi in z njo povezano tehnologijo; vakuumske tehnike so se izkazale predvsem na področju eksperimentov in tehnologij v zadnjih navedenih letih.

cev umotvorov svojih v nebo kovanih predhodnikov. Podobno kot je Mach zavračal razkosavanja vidnih delcev, je prusko-poljski Žid in uspešni kmetijski podjetnik Leopold Kronecker (\* 1823; † 1891) nasprotoval razkosavanju celih števil, trdeč, da so vsa necela števila zgolj človeška stvaritev. Kroneckerjevo nasprotovanje je oviralo tudi uveljavitev vodilnega teoretika neskončnosti Geoga Cantorja v Nemčiji.<sup>10</sup>



**Slika 10:** Podrobnejši popis raziskovalcev svetlobe

<sup>10</sup> Reid, 1977, 39, 133; Poliščuk, 1980, 28

<sup>11</sup> Detela, 2002; Južnič, 2002, 24

### 3 VAKUUMSKI POSKUSI KOT MOTOR RAZVOJA FIZIKE IN KEMIJE V DOBI KRIZ

Vakuumski poskusi so igrali pomembno vlogo pri parnih strojih in elektronkah. Posebej velja poudariti Guerickejevo vakuumsko črpalko (1654) s poskusi, postavljenimi zaradi dvomov kneza Janeza Vajkarda Turjaškega, in z Guerickejevim električnim kolovratom-generatorjem. Uveljavilo se je tudi polje infrardečih (toplotnih), ultravijoličnih in vidnih valov ter novih žarkov v vakuumskih elektronkah (izpraznjenih ceveh) po letu 1855. To je bila ena izmed predparadigmatskih okolic, v kateri se je razvila kvantna mehanika. Nove vrste žarkov, odkrite med poskusi v katodnih elektronkah, niso sprožile rasti nove univerzalne paradigme v kvantni elektrodinamiki, čeprav so zanje razvili eksperimentalne metode z uporabo vakuumskih tehnik. Univerzalna metoda teorije je ostala statistična teorija.

Raziskovalci z obeh strani meje, ločnice med nasprotujočima si idejama, pogosto uporabljajo miselne eksperimente za opis korenin krize, ki so ji priča. Te metode uporabljajo bodisi zato, ker bi bili resnični poskusi prezapleteni oz. predragi ali pa bi bila njihova priprava predolga v časovni stiski zaradi hitro spreminjajočega se najvplivnejšega območja raziskovanja med krizo.

Miselni poskus je samosvoj način raziskovanja na meji med teorijo in eksperimentom. Njegova praktična neizvedljivost je posledica idealizacij, kot so: zanemarjanje zračnega upora in trenja (Galilei, (anti) perpetuum mobile), nedosegljivost popolnega vakuuma (Galilei, Guericke 1654) ali absolutne temperaturne ničle (Nernst). Izvedbe poskusov ovira po Einsteinu (1905) neizvedljivo pospeševanja do svetlobne hitrosti, pomanjkanje materialov zahtevanih kakovosti,<sup>11</sup> prav tako pa tudi pomanjkanje dovolj občutljivih merilnih instrumentov. Posebno znamenit miselni poskus v kvantni mehaniki je bila Schrödingerjeva mačka (1935); številne druge je navrgla izmenjava mnenj med Einsteinom in Bohrom na Solvayevem kongresu leta 1926.

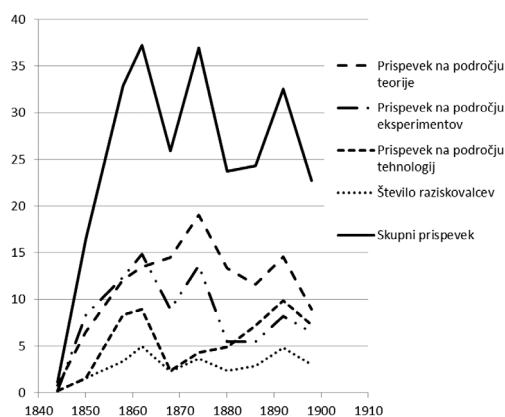
Tudi med njenim odmiranjem so pri zastareli paradigmi vztrajali Kircherjevi jezuiti in kartezijanci kot nasprotniki vakuuma: Biot in Poisson, Kelvin, Clausius in Simon Šubic, Einsteinovi nasprotniki in mnogi drugi zaverovani v ideale svoje mladosti. Nasprotovanje vakuumu je krasilo jalovo naraščanje raziskovalnih prispevkov Kircherja in njegovega učenca Linusa dobro polovico stoletja po letu 1644; vzporedno so vakuumu nasprotni kartezijanci razvijali vrtnične modele.

Razen med univerzalnim stanjem je delež tehnoloških aplikacij po navadi četrtina celotnega raziskovalnega dela v fiziki. Najvišji je pri raziskovanju toplote, kjer so naprej preizkušali delovanje parnih strojev, razvitih z vakuumskim podobnimi tehnologijami, pozneje pa so razvijali motorje z notranjim izgoranjem. Na drugem mestu je elektromagnetizem, kjer je v 19. stoletju Faraday utemeljil uporabo elektromotorja in dinamostroja. Thomas Alva Edison je pozneje patentiral vakuumsko žarnico in tako omogočil zapozneno uporabo Lambertovih že stoletje znanih meritev fiziološke optike v industrijske namene. Čeprav tako pomembnih tehnoloških dosežkov raziskave v optiki in mehaniki niso omogočale, je bil delež tehnoloških raziskav pri njih le malo manjši.

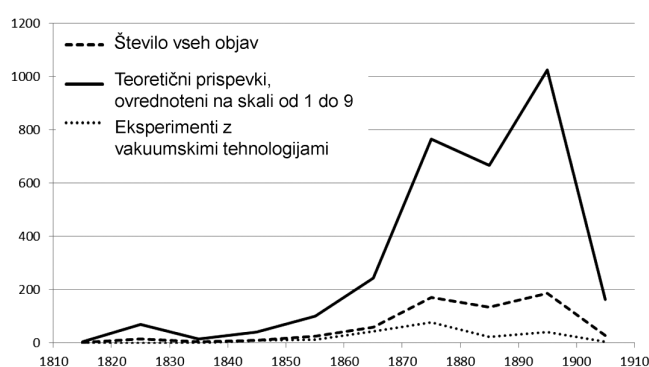
Prispevki posameznih vrst raziskovalne dejavnosti v različnih panogah fizike se spreminjajo s časom. Med letoma 1841 in 1871 je bil delež eksperimentalnih raziskovanj razmeroma majhen, kljub pomembnemu Faradayevemu prispevku. Toliko večji pa je bil delež tehnoloških aplikacij, kot so: vakuumске črpalke za Geisslerjeve elektronke, dinamo, elektromotor, telefon in žarnica.

Če narišemo število raziskovalcev ali raziskovalnih prispevkov v mehaniki v odvisnosti od časa, ne opazimo izrazitih maksimumov v točkah, kjer bi jih pričakovali zaradi razvoja nove paradigme. Štirje različni vrhovi so opredelili razvoj mehanike: prvi sredi 17. stoletja ni bil ne Galileijev ne Newtonov, temveč je nastopil zaradi razmeroma velike raziskovalne dejavnosti pionirjev vakuumskih tehnik med njunima dobama.

Krivulja razvoja teorijskega raziskovanja toplote je imela tri maksimume. V prvem okoli leta 1680 je prevladovalo predparadigmatično preučevanje plinskih zakonov in delovanja parnega stroja, razvitega z



Slika 11: Raziskovalni prispevki zakona o ohranitvi energije, toplote kot gibanja in kinetične teorije po Asimovu (1978)



Slika 12: Število objav o toplotnem gibanju, kinetični teoriji in statistični mehaniki po S. Brushovem popisu iz leta 1976

vakuumskimi tehnikami. Drugi vrh je okoli leta 1770 nastal zaradi raziskovalnega dela Škota Josepha Blacka, Francozov Antonija Laurenta Lavoisierja in Laplacea, čeprav je Black ostal zagovornik flogistona.<sup>12</sup> Zadnji maksimum leta 1840 oziroma leta 1860 je povzročilo raziskovanje zakona o ohranitvi energije.

Tabela 2: Korespondenčna pravila vakuumске elektronike, ki preslikajo izkustvene ugotovitve na matematični formalizem in interpretacijo v nasprotni smeri

Teorija	Izkustvene ugotovitve	Korespondenčna pravila	(Matematični) formalizem
Von Braunova katodna elektronka, 1898	Edisonovo preverjanje najuporabnejših polnil žarnic, 1878	IV. J. J. Thomsonovi elektroni, 1897	Polje
Geisslerjeva elektronka, 1855	Boyle proti Kircherjevemu jezuitskemu zavračanju vakuuma	III. Plückerjeva matematika in eksperimentalna vakuumška fizika kot predhodnica spektroskopije II. Boyleova skeptična kemija	Plückerjeva analitična in projektivna geometrija kot nasprotje berlinski sintetični šoli Jakoba Steinerja Teorije vakuuma kot mehanskega modela
Musschenbroekova in 'sGravesandejeva vakuumška črpalka z leidensko steklenico, 1745/46, Hauksbeejeva črpalka in torna elektrika: Boylevo prevajanje vakuuma, 1660			
Guerickejeva črpalka iz l. 1654 in torna elektrika		Dvomi kneza Turjaškega	
Barometer Torricellija-Pascala-Magnija, 1644–		I. Galileijev vakuum	Matematični jezik fizike

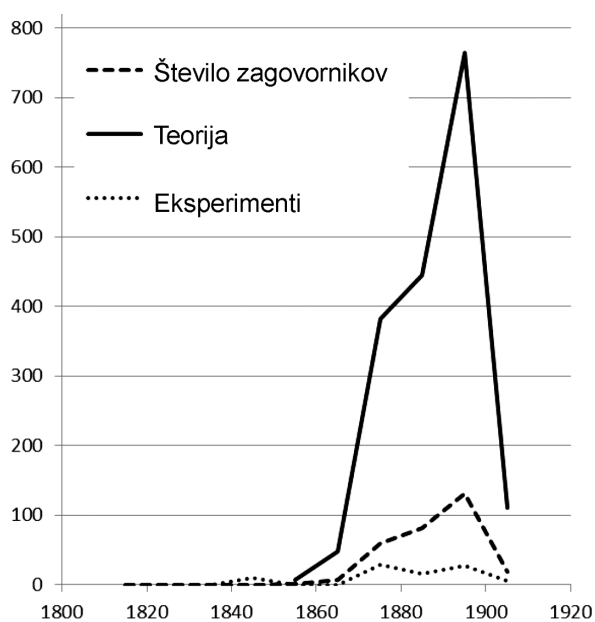
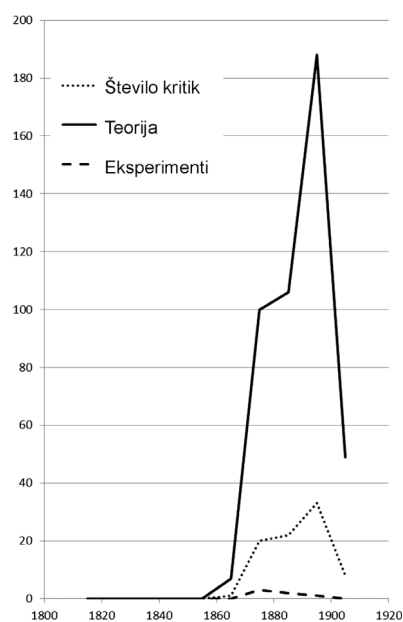
<sup>12</sup> Kuhn, 1996, 70

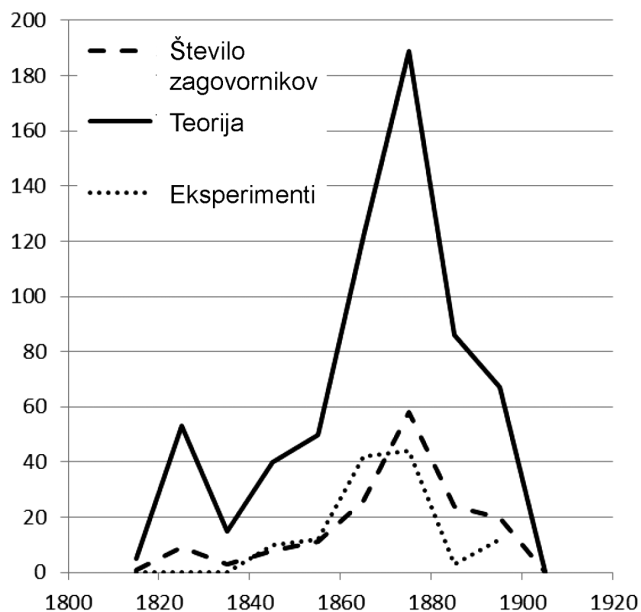
**Tabela 3:** Korespondenčna pravila elektrostatike

Izkustvene ugotovitve	Korespondenčna pravila	(Matematični) formalizem
1752, Dalibard na Francoskem preizkusi Franklinov <u>strelovod</u> uporaba elektrike v <u>medicini</u> ; uporaba <u>tehtnice</u> 1745–1746, leydenska steklenica 1745, Bozejevi poskusi z naelektrenimi kapilarami 1733, Du Fay ugotovi različnost elektrike v steklu in jantarju 1729, Gray loči električne <u>prevodnike</u> od izolatorjev 1705–1709, Hauksbee: zvok ob praznitvi elektrike, naelektritev ob ohlajanju, preskok iskre, <u>odboj</u> Boyle in Hooke ugotovita, da vakuum ne prevaja elektrike 1660, Guerickejeva <u>naelektritev s trenjem</u> , pozneje pozabljeno odkritje električnih prevodnikov in vakuumska črpalka 1600, W. Gilbertova privlačna sila elektrike	III. 1767, Priestleyeva sistematizacija II. 1750, Franklinova teorija leydenske steklenice in strelovoda I. Nolletova teorija fluida, ki ga neprestano seva in ponovno absorbira naelektreno telo, 1746–1749 Du Fayeve električna materija kot ogenj	1775, Wilson izdela matematično teorijo prevodnosti, kjer tok pada s kvadratom dolžine vodnika Aepinus v Petrogradu objavi matematično teorijo dvofuidne elektrike

Uporaba fizike v tehnologiji in industriji je bila vedno posebnost. Tako je denimo ob kritiki Hobbesa<sup>13</sup> Boyle rad poročal o uporabnosti vakuuma za shranjevanje živil, župan Magdeburga Guericke pa je z barometriško napovedjo neurja posvaril svoje volivce. Z veliko mero previdnosti lahko do neke mere ločimo

uporabnost od eksperimentalnega in teorijskega raziskovanja v fiziki. V takšnem poenostavljenem modelu fizikalno raziskovanje omejimo na eksperiment in teorijo, torej na izkustvene ugotovitve in abstraktni matematični formalizem. V prvih paradigmah fizikalnih panog sta bili obe komponenti raziskovanja

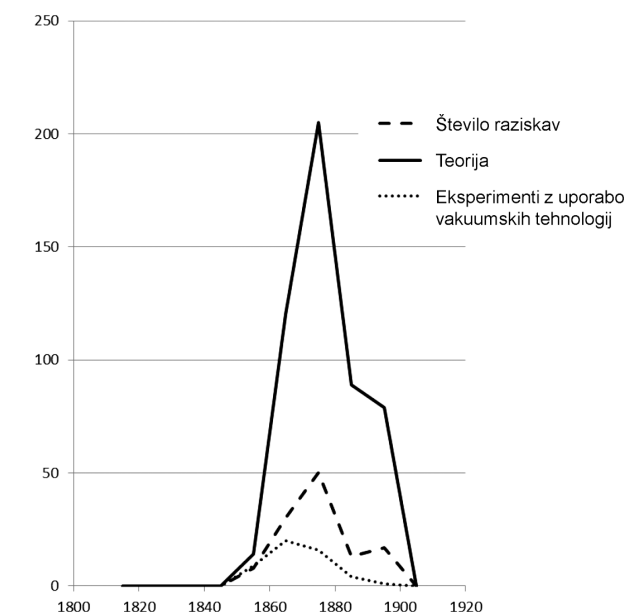
**Slika 13:** Zagovorniki statistične mehanike**Slika 14:** Kritiki statistične mehanike<sup>13</sup> Kuhn, 2000, 316



Slika 15: Zagovorniki kinetične teorije toplote

druga drugi mnogo bliže, sčasoma pa je matematični formalizem postajal vedno bolj abstrakten.

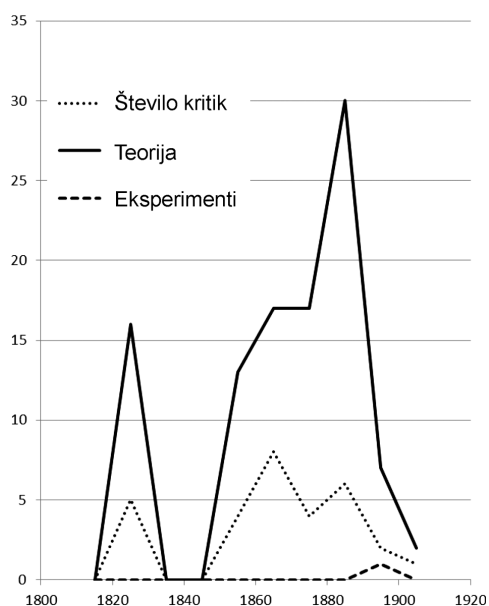
Miselni in resnični eksperimenti v duhu Platona in Arhimeda so nasprotovali sholastični metafiziki Aristotelovih privržencev. Podobno sta tudi renesančna mehanika in astronomija Johanna Keplera (\* 1571; † 1630) ponujali vsaka svoj način raziskovanja. Množica novih odkritij oz. izzivov je pogosto silila staro paradigmo v hitro iskanje odgovorov, ki je presevalo njene zmožnosti. Nedorečeni odgovori so si zato pogosto med seboj nasprotovali; zapletenost stare paradigme je hitreje naraščala od njene natančnosti. Kmalu je postalo očitno, da (Aristotelova) fizika ne ponuja pravih odgovorov. Aristotel namreč sploh ni bil



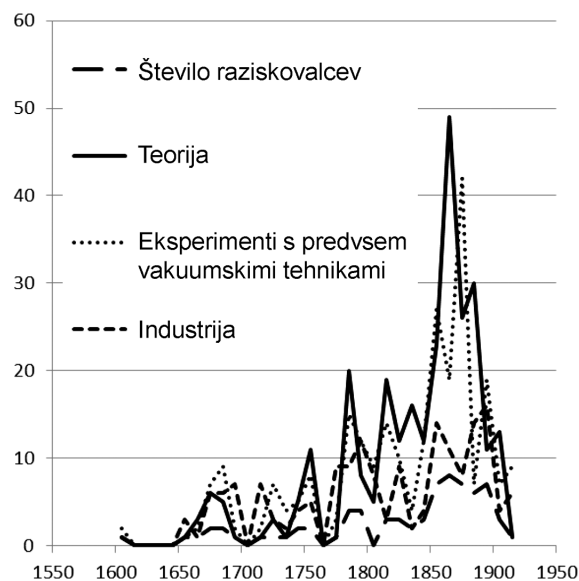
Slika 17: Objavljene raziskave v avstrijski polovici habsburške monarhije v vseh stanjih

merodajen pojasnjevalec fizikalnih vprašanj Galilejeve eksperimentalne znanosti; le-ta je obračala Aristotelove zastarele pojme: Torricelijev vakuumski poskus je pojasnila z zračnim tlakom namesto z Aristotelovo silo, ki naj bi živo srebro vlekla navzgor. Sledila je posplošitev vakuumskih poskusov Torricelli-Magnija in Guericke-Turjačana v raziskovanjih Boyla, Pascala in Huygensa.

Vakuum je obenem postal svojevrstna inačica etra. Zlom druge paradigme optike je med letoma 1830 in 1853 sprožil Fizeaujev in Foucaultov poskus merjenja svetlobne hitrosti v vodi med letoma 1849 in 1853. Modeli etra naj bi združevali lastnosti izjemne trdne snovi za prenos transverzalnih valov in praznega



Slika 16: Kritiki kinetične teorije toplote



Slika 18: Raziskovalci toplote v desetletnih intervalih po Asimovu (1978)



prostora za nemoteno gibanje nebesnih teles. Med univerzalizacijo so prevladali vplivi elektromagnetizma zaradi enake hitrosti širjenja svetlobe in elektromagnetnih valov v vakuumu.

Vakuumski poskusi s katodnimi elektronkami so postali univerzalna eksperimentalna raziskovalna metoda, ki se je uporabljala tudi v naslednji paradigmi, kvantni mehaniki. Odkritje elektronov in drugih elementov snovi v vakuumskih poskusih je postalo osnova za nove opise fizikalnega sveta. Elektromagnetna teorija polja se je deloma skladala z univerzalno metodo; na eksperimentalnem področju so prevladali poskusi v vakuumu.

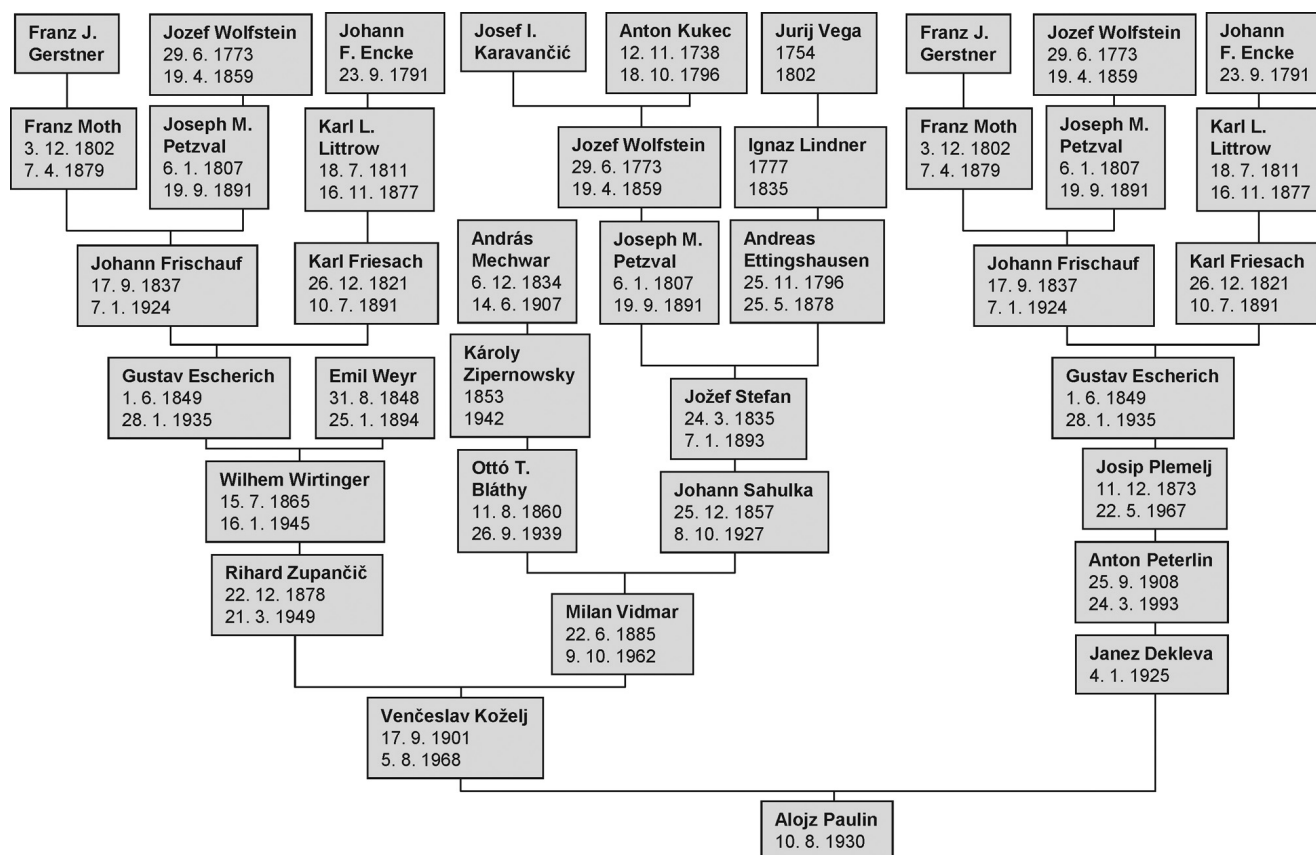
#### 4 SODOBNE USMERITVE V SLOVENSKI VAKUUMSKI TEHNIKI

Vstop meščanskih sinov v evropsko znanost (1554–1600–1698) so opredelili Kopernik, T. Brahe, Gilbert, Galilei, Kepler, Kircher, Harvey, Descartes in François Viète, ob njih pa še vakuumisti Valeriano Magni, Pascal in Guericke. Pod njihovo taktirko se je razvila astronomija, magnetizem, mehanika, optika, fiziologija, geometrija, matematika in vakuumska

tehnika, ki je ob elektrostatiki vplivala na vse tedaj znane znanosti. Razen Braheja, jezuita Kircherja in agnostika Pascala so bili vsi naštetih kopernikanci vključno z Gilbertovim uvodničarjem Edwardom Wrightom; med njimi le Descartes ni verjel v obstoj vakuuma.<sup>14</sup>

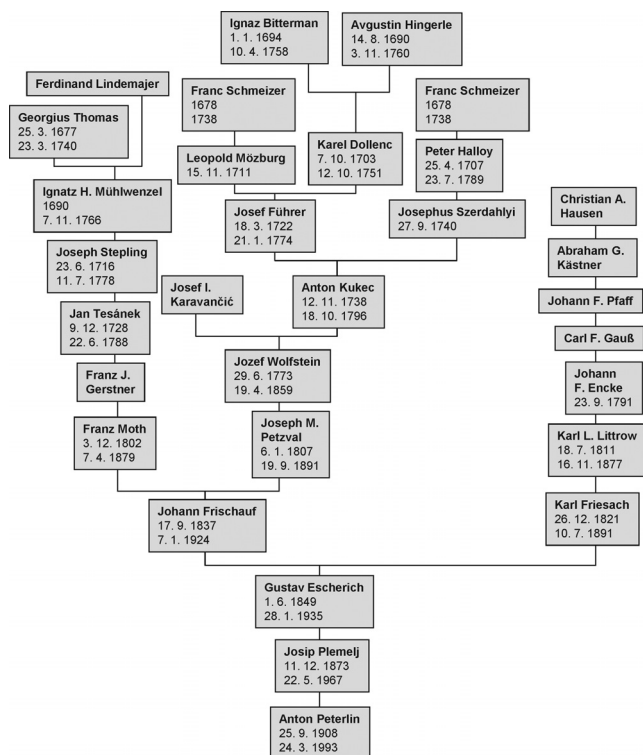
Neplemiški sinovi so prevzeli pobudo razvoja vakuumskih tehnik v srednji Evropi dve stoletji po podobnih dogodkih v Angliji. Za razvoj slovenskih vakuumskih tehnik je bila bistvenega pomena pomlad narodov leta 1848, po kateri so trgovski sinovi dobili enake možnosti za izobraževanje, ki so nekoč odlikovale zgolj dediče modre krvi. Iz teh sprememb je nastalo delo enega najpomembnejših in danes tudi najstarejših slovenskih vakuumistov, gorenjskega trgovskega sina Alojza Paulina.

Prevrat leta 1945 je k novim vakuumskim tehnikam pripeljal še dotlej nepriviligirane kmečke sinove, ki so dodobra zaznamovali sodobne vakuumske tehnike. Feminizacija razvoja vakuumskih tehnik je sledila kot pomembna nova usmeritev. Delež žensk v razvoju vakuumskih tehnik strmo narašča tudi v Sloveniji, kot je pričujoči pisec zapisal v svojih knjigah o Jani Škarem, Tanji Peterlin, Glogi Janjevič in Zvonki



**Slika 19:** Akademske prednike vakuumista Alojza Paulina: ob njegovem mentorju pri doktoratu je naveden tudi njegov prvi predstojnik na Institutu »Jožef Stefan«.

<sup>14</sup> Gilbert, 1991, xli, 318, 329



Slika 20: Peterlinovi akademski predniki glede na njegovo ljubljansko diplomu pri matematiku Plemlju

Betnavamarinič - Perhavec: Fizika, moj poklic (2007), Anton Peterlin (2008) in Po stopinjah Nikole Tesle (2014).

## 5 SKLEP

Razvoj vakuumskih tehnologij v laboratorijih nebelih raziskovalcev bo gotovo opredelil prihodnost. Domača okolja izobraževalno doslej zanemarjenih oseb iz Afrike, Latinske Amerike, Avstralije, Tihomorskih otočij in Bližnjega vzhoda bodo prinesla nove ideje, drugačne od dosedanjih prijemov belih Evropejcev. Pojmovanje praznega in nič je v tradicijah teh ljudstev v marsičem diametralno drugačno od tradicionalnih prijemov belcev. Glede na hitrost, s katero so svoj čas vakuumске tehnologije razvijali meščan-

ski, za njimi pa kmečki sinovi in ženske, je vpliv nebelih vakuumistov mogoče pričakovati zelo hitro, čim bi se nekoliko uneslo sedanje prehajanje nebelih izobražencev na zahodnjaške univerze in bi dežele tretjega sveta lahko dovolj razvile svoje lastne izobraževalne ustanove.

## 6 LITERATURA

- Asimov, Isaac. 1978. *Biographical Encyclopedia of Science and Technology*. London: Pan Books Ltd.
- Brush, Stephen S. 1976. *The kind of Motion We Call Heat*. Amsterdam-New York-Oxford: North-Holland, 2. del
- Buridan, Jean. 1509. *Acutissimi philosophi reuerendi magistri Iohānis Buridani subtilissime Questiones super octo phisicorum libros Aristotelis*. Paris: Dionis Roce
- Detela, Andrej. 2002. *Magnetni vozli*. Ljubljana
- Einstein, Albert; Balibar, Françoise; Matjaž Ličer (prevod in spremno besedilo); Likar, Vojislav (prevod in spremno besedilo). 2014. *O posebni in splošni teoriji relativnosti. Einsteinovo branje Galileija in Newtona*. Ljubljana: ZRC SAZU
- Gilbert, William. 1991. *De Magnete*. New York: Dover
- Grant, Edward. 2007. *A History of Natural Philosophy from the Ancient World to the Nineteenth Century*. Cambridge: University Press
- Hadži, Dušan. 2014. Spomin vode – kar rabi homeopatija in kaj ponuja sodobna znanost? *Acta Chimica Slovenica*. 61: S145–150
- Harré, Rom. 2002. *Great Scientific Experiments*. New York: Dover
- Južnič Stanislav. 1983. *Razvoj fizike med Newtonom in kvantno mehaniko*. Ljubljana/Fara pri Kostelu: Magistrska naloga na oddelku za zgodovino filozofske fakultete
- Južnič, Stanislav. 2002. Vakuumski balon. *Vakuumist*. 22/4: 24–27
- Južnič, Stanislav. 2012. Toynbee Nonsense Book for Slovenians. *Studia Historica Slovenica (Maribor)*. 12/1: 21–54
- Kovačević, Zoran L. 2014. *Susret i sukob sa naukom*. Novi Sad: Akademska knjiga/Srpska Akademija nauka i umetnosti
- Kuhn, Thomas S. 1996. *The Structure of Scientific Revolution*. Chicago: University of Chicago. 3. izdaja
- Kuhn, Thomas S. 2000. *The road since structure: philosophical essays, 1970–1993, with an autobiographical interview* (ur. Conant, James; Haugeland, John). University of Chicago Press
- Pugač, Boris Jakovlevič. 2004. *Fundamentalnije problemi istorii i filozofii nauki*. Harkov: Fakt
- Poliščuk, E. M. 1980. *Emil Borel*. Leningrad: Nauka
- Raju, Chandra Kant. 2007. *Cultural Foundations of Mathematics: The Nature of Mathematical Proof and the Transmission of the Calculus from India to Europe in the 16th c. AD*. Delhi: Pearson Longman
- Reeves, Richard. 2008. *A Force of Nature: The Frontier Genius of Ernest Rutherford (Great Discoveries)*. New York: W. W. Norton & Company
- Reid, Costance. 1977. *Gilbert*. Moskva: Nauka
- Toynbee, Arnold. 1971. *Mankind and Mother Earth: A Narrative History of the World*. Oxford: University Press

## NAŠE DRUŠTVO BO ORGANIZIRALO ZDRUŽENI KONFERENCI JVC-16 IN EVC-14 V JUNIJU 2016

Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije bo v juniju 2016 organiziralo 16. združeno vakuumsko konferenco (Joint Vacuum Conference, JVC-16). Konference JVC tradicionalno izmenično vsaki dve leti organizirajo vakuumska društva Slovenije, Hrvaške, Avstrije, Madžarske, Češke in Slovaške. Naše društvo je v preteklosti organiziralo že nekaj takih konferenc in sicer JVC-4 v Portorožu leta 1988, JVC-6 leta 1995 na Bledu in JVC-10 leta 2004 v Portorožu. Tokrat je zopet prišla vrsta na slovensko vakuumsko društvo, ki naj bi organiziralo naslednjo konferenco v letu 2016.

Ob tem se je porodila ideja, da bi skupaj z JVC-16 organizirali še Evropsko vakuumsko konferenco (European Vacuum Conference, EVC-14), ki ima podobno vsebino kot JVC-16. Tako smo kandidirali za organizacijo tudi EVC-14 in pridobili tudi organizacijo le-te. Sedaj intenzivno potekajo priprave na združeno vakuumsko konferenco JVC-16 / EVC-14. Konferenca bo potekala v kongresnem centru Bernardin v Portorožu od 5. do 10. junija 2016. Na konferenci pričakujemo okoli 200 udeležencev. Predavanja bodo potekala v nekaj vzporednih sekcijah.

Izvršni odbor DVTS je na 42. seji predlagal doc. dr. Janeza Kovača za predsednika konference, doc. dr. Miho Čekado za podpredsednika konference, prof. dr. Mirana Mozetiča za člana mednarodnega programskega odbora JVC, dr. Janeza Šetino za člana mednarodnega programskega odbora EVC, doc. dr. Matjaža Godca in dr. Petra Panjana za člana mednarodnega organizacijskega odbora.

Formirali smo tudi lokalni organizacijski odbor, ki vodi priprave na konferenco. Organizacijski odbor sestavljajo: doc. dr. Janez Kovač, doc. dr. Alenka Vesel, dr. Matjaž Panjan, dr. Ita Junkar, dr. Gregor Primc, dr. Gregor Jakša, prof. dr. Uroš Cvelbar, Urša Kisovec, Miro Pečar, dr. Nina Recek, Aljaž Drnovšek, dr. Barbara Šetina Batič in dr. Matej Hočvar. Tehnično organizacijo konference, kot je priprava spletnih strani, registracija udeležencev, organizacija konferenčnega izleta, konferenčne večerje, prevozov in drugo bo prevzelo podjetje Albatros z Bleda, ki je specializirana za kongresne dejavnosti. Spletna stran konference je na naslovu: [www.jvc-etc-2016.org](http://www.jvc-etc-2016.org) in vsebuje podatke o konferenci.

Sedaj še poteka oblikovanje mednarodnega programskega odbora in mednarodnega organizacijskega odbora. Programski odbor bo nato izbral in potrdil vabljenе predavatelje, ki jih bodo predlagala nacionalna vakuumska društva. Področja, ki bodo obravnavana na združeni konferenci JVC-16 / EVC-14, bodo: vakuumska znanost in tehnika, znanost o površinah, nanotehnologije, tanke plasti in prevleke, elektronski

materiali, znanost o plazmi, biološke aplikacije in drugo. Dosedanje priprave na konferenco potekajo po načrtu.

Prva najava konference in pošiljanje vabil udeležencem bo v oktobru 2015. Registracija udeležencev se bo začela v januarju 2016. Rok za oddajo povzetkov bo konec februarja 2016. Preliminarni program konference bo izoblikovan do 1. 5. 2016. Odprtje konference bo 6. 6. 2016. Za konferenčni izlet bomo predvidoma organizirali ogled Škocijanskih jam.

Znanstveni prispevki, ki bodo predstavljeni na konferenci, bodo objavljeni v reviji Vacuum. Ta revija, ki jo izdaja založba Elsevier, je poznana na vakuumskem področju in ima faktor vpliva okoli 1,8, kar upamo, da bo pritegnilo udeležence konference k objavi svojih prispevkov. Sedaj se dogovarjamo o podrobnostih pogodbe z založbo Elsevier za izdajo posebne številke revije Vacuum, namenjene naši konferenci. V naslednjih mesecih bomo še kontaktirali mogoče razstavljalce vakuumске opreme in jih povabili k sodelovanju na konferenci.

Organizatorji upamo, da bo organizacija in izvedba konference potekala po načrtu in da se bo konference JVC-16 / EVC -14 udeležilo veliko število udeležencev.

doc. dr. Janez Kovač,  
predsednik konference JVC-16/ EVC-14

### Seznam prejšnjih JVC konferenc

- JVC-1, 1979, Győr, Madžarska
- JVC-2, 1981, Brunn am Gebirge, Avstrija
- JVC-3, 1985, Debrecen, Madžarska
- JVC-4, 1988, Portorož, Slovenija
- JVC-5, 1991, Dunaj, Avstrija
- JVC-6, 1995, Bled, Slovenija
- JVC-7, 1997, Debrecen, Madžarska
- JVC-8, 2000, Pula, Hrvaška
- JVC-9, 2002, Seggau, Avstrija
- JVC-10, 2004, Portorož, Slovenija
- JVC-11, 2006, Praga, Češka
- JVC-12, 2008, Balatonalmádi, Madžarska
- JVC-13 2010, Štrbské Pleso, Slovaška
- JVC-14 2012, Dubrovnik, Hrvaška
- JVC-15, 2014, Dunaj, Avstrija

**Slika 1:** Prva najava mednarodne konference JVC-16 / EVC-14, ki jo bo organiziralo društvo DVTS od 5. do 10. junija 2016 v Portorožu. Najava je v angleškem jeziku, ker pričakujemo, da bo večina udeležencev iz tujine (na naslednji strani).



# JVC16 - 16<sup>th</sup> Joint Vacuum Conference EVC14-14<sup>th</sup> European Vacuum Conference Portorož, Slovenia, June 5-10, 2016



## CONFERENCE VENUE

Conference will take place at the Bernardin Congress Centre which is located at a tourist resort on the Adriatic coast walking distance from the medieval towns of Piran and the modern seaside resort of Portorož in Slovenia.

## CONFERENCE TOPICS

- Applied surface science
- Surface science
- Vacuum science and technology
- Thin films and coatings
- Nanotechnology
- Plasma science and technology
- Electronic materials
- Surface engineering
- Biointerfaces



Selected papers will be published as a special issue of the **Vacuum** journal.

## IMPORTANT DATES

- First announcement: 1<sup>st</sup> October 2015
- Registration: 1<sup>st</sup> January 2016
- Abstract deadline: 29<sup>th</sup> February 2016
- Early registration: 30<sup>th</sup> April 2016
- Preliminary program: 1<sup>st</sup> May 2016



## ORGANIZER

Slovenian Society for Vacuum Technique

## Contact person

Janez Kovač, Chair of JVC-16/EVC-14  
Jozef Stefan Institute, Jamova 39,  
SI-1000 Ljubljana, Slovenia  
janez.kovac@ijs.si

[www.jvc-evc-2016.org](http://www.jvc-evc-2016.org)

## SPOROČILO ZA JAVNOST

### Pfeiffer Vacuum praznuje 125-letnico

Podjetje Pfeiffer Vacuum že 125 let postavlja standarde v vakuumski tehnologiji. Danes se ozira nazaj na zgodbo o uspehu, ki jo že od začetka zaznamuje pionirski duh in usmejenost k tehnološkemu razvoju v industriji in znanosti.

Leta 1890 je Arthur Pfeiffer ustanovil podjetje v mestu Wetzlar v Nemčiji ter se uveljavil kot vodilni proizvajalec vžigalnikov za plinske svetilke. Ko so se v svetu začele uveljavljati žarnice, se je proizvodnja obrnila v novo smer takrat sodobne tehnologije svetil in s tem povezanih vakuumskih tehnologij. Sčasoma je ustanovitelj podjetja prepoznal vse večjo pomembnost vakuumskih tehnologij v različnih sektorjih industrije ter tako preusmeril aktivnosti podjetja.

V letih, ki so sledili, je Pfeiffer Vacuum igral odločilno vlogo pri oblikovanju vakuumskih tehnologij. Glavni mejnik je bil izum turbomolekularne črpalke leta 1958. Pomenila je pravo revolucijo v industriji, saj je bila to prva črpalka, ki je omogočila

vakuum brez olja – v tistem času ključna prednost pri odpiranju novih aplikacij.

Z razvojem sodobnih tehnologij in vzporednim napredkom v znanosti so postajale tudi vakuumske aplikacije vse bolj raznolike in kompleksne. Področje dela Pfeiffer Vacuuma je postajalo vse širše, podjetje pa se je s prevzemom podjetij *adixen Vacuum Products* in *Trinos Vakuum-Systeme* leta 2010 uveljavilo kot dobavitelj celotne palete vakuumskih produktov. Nabor izdelkov podjetja tako danes ni omejen le na vakuumske črpalke in merilnike netesnosti, temveč obsega tudi merilno tehniko in analitsko opremo. Tako ponuja kompletne sisteme in širok obseg storitev kakor tudi svetovanje.

Ob letošnji obletnici predstavlja Pfeiffer Vacuum serijo novih izdelkov ter novo spletno stran z vrsto vakuumskih rešitev ([www.pfeiffer-vacuum-solutions.com](http://www.pfeiffer-vacuum-solutions.com)). Obširno so bili predstavljeni na sejmu ComVac v Hannoveru 13.–17. aprila letos.





Izdelki Pfeiffer Vacuuma se uporabljajo v proizvodnih procesih za izdelavo množice vsakdanjih izdelkov. Vakuumska tehnologija je vseprisotna v vsakdanjem življenju – čeprav to dejstvo porabnik pogosto spregleda.

Leče za očala so eden takih primerov izdelkov, ki so prekriti z vakuumskimi postopki. Nepogrešljiva orodja za ta proces so predčrpalke, turbomolekularne črpalke, merilniki netesnosti in merilni inštrumenti, ki jih proizvaja Pfeiffer Vacuum. Prevleka štiti lečo pred razami in umazanijo ter omogoča jasen vid zaradi svojih antirefleksijskih lastnosti.

Rešitve Pfeiffer Vacuuma igrajo ključno vlogo tudi v prehrambni industriji. Brez njih ne bi mogli proizvajati liofiliziranih izdelkov, kot so instant kava ali

mleko v prahu. Prav tako brez vakuumskih postopkov ne bi bilo prekritih vrečk za čips in druge embalaže – in hrana bi imela precej krajši rok trajanja.

Pametni telefoni, tablice in osebni računalniki ne bi delovali brez spominskih čipov, ki se proizvajajo v vakuumskih razmerah v čisti sobi. Avtomobili ne bi imeli varnih zračnih blazin, platišč, rezervoarjev ali klimatskih naprav, saj vse te izdelke preizkusijo na netestnost z vakuumskimi sistemi in helijevimi detektorji netesnosti.

Za nadaljnjo optimizacijo teh ključnih ugodnosti, ki nam olajšajo vsakdanje življenje, ima Pfeiffer Vacuum vrsto idej za nove izdelke in razvoj za boljšo prihodnost.

Več informacij na: [www.pfeiffer-vacuum.com](http://www.pfeiffer-vacuum.com).

---

## PREGLED KONFERENC V PREOSTANKU LETA 2015 IN V LETU 2016

### **66<sup>th</sup> Annual meeting of the International society of electrochemistry**

4.–9. oktober 2015, Taipei, Tajvan

(rok za povzetek: 27. april 2015)

[annual66.ise-online.org](http://annual66.ise-online.org)

### **17<sup>th</sup> International conference on fusion reactor materials**

11.–16. oktober 2015, Aachen, Nemčija

(rok za povzetek: 13. marec 2015)

[www.fz-juelich.de/portal/EN/AboutUs/Dates\\_Events/docs/15-10-11\\_icfrm17.html](http://www.fz-juelich.de/portal/EN/AboutUs/Dates_Events/docs/15-10-11_icfrm17.html)

### **4<sup>th</sup> magnetron, ion processing & arc technologies European conference – MIATEC**

Vključuje tudi 14<sup>th</sup> international symposium on reactive sputter deposition – RSD 2015

8.–11. december 2015, Pariz, Francija

(rok za povzetek: 30. september 2015)

[www.vide.org/miatec-rsd2015](http://www.vide.org/miatec-rsd2015)

### **43<sup>rd</sup> International conference on metallurgical coatings & thin films – ICMCTF 2016**

25.–29. april 2016, San Diego, ZDA

rok za povzetek: 1. oktober 2015

[www2.avs.org/conferences/icmctf](http://www2.avs.org/conferences/icmctf)

### **European materials research society spring meeting – EMRS**

2.–6. maj 2016, Lille, Francija

rok za povzetek: januar 2016

[www.emrs-strasbourg.com](http://www.emrs-strasbourg.com)

### **4<sup>th</sup> symposium on carbon based coatings**

30.–31. maj 2016, Schloss Seggau, Avstrija

rok za povzetek: 1. oktober 2015

[asmet.org/cbc2016](http://asmet.org/cbc2016)

### **22<sup>th</sup> International conference on plasma surface interactions in controlled fusion environments 2016**

30. maj–3. junij 2016, Rim, Italija

rok za povzetek: 14. december 2015

[www.psi2016.enea.it](http://www.psi2016.enea.it)

### **Mednarodni znanstveni sestanek Vakuumska znanost in tehnika**

Hrvaško-slovensko srečanje vakuumistov

maj/junij 2016, Hrvaška

rok za povzetek: april/maj 2016

[cro-vacuum.hr](http://cro-vacuum.hr) (domača stran društva)

### **16<sup>th</sup> Joint vacuum conference – JVC-16**

Vključuje tudi 14<sup>th</sup> European vacuum conference – EVC-14

5.–10. junij 2016, Portorož, Slovenija

rok za povzetek: 29. februar 2016

[www.dvts.si](http://www.dvts.si) (domača stran društva)

### **20<sup>th</sup> International vacuum congress, IVC-20**

20.–26. avgust 2016, Busan, Koreja

rok za povzetek: 31. januar 2016

[www.ivc20.com](http://www.ivc20.com)

### **32<sup>nd</sup> European Conference on Surface Science – ECOSS-32**

28. avgust–2. september 2016, Grenoble, Francija

rok za povzetek: spomladi 2016

[www.ecoss2016.org](http://www.ecoss2016.org)

### **5<sup>th</sup> International conference on plasma medicine – ICPM6**

4.–9. september 2016, Bratislava, Slovaška

rok za povzetek: 31. marec 2016

[www.icpm6.com](http://www.icpm6.com)

### **The European corrosion congress – EUROCORR 2016**

11.–15. september 2016, Montpellier, Francija

rok za povzetek: 17. januar 2016

[www.eurocorr.org/eurocorr2016.html](http://www.eurocorr.org/eurocorr2016.html)

### **15<sup>th</sup> International conference on plasma surface engineering – PSE 2016**

12.–16. september 2016, Garmisch-Partenkirchen, Nemčija

rok za povzetek: 31. januar 2016

[www.pse-conferences.net/pse2016.html](http://www.pse-conferences.net/pse2016.html)

### **European materials research society fall meeting – EMRS**

19.–22. september 2016, Varšava, Poljska

rok za povzetek: maj/junij 2016

[www.emrs-strasbourg.com](http://www.emrs-strasbourg.com)

## NAVODILA AVTORJEM PRI PRIPRAVI PRISPEVKOV

Tematsko Vakuumist obsega širše področje vakuumskih znanosti in tehnologij, fiziko in kemijo tankih plasti in površin, analitiko površin, fiziko plazme, vakuumsko metalurgijo ter zgodovino vakuumске znanosti. Vsebinsko objavljamo štiri skupine prispevkov:

- **znanstveni članki** o aktualnih raziskavah s področja vakuumске znanosti in sorodnih področij;
- **strokovni članki**, kot so predstavitev novosti v svetu, zgoščen pregled nekega področja, primeri uvajanja tehnologij v prakso ipd.;
- **praktični nasveti** reševanja konkretnih vakuumskih problemov v laboratoriju;
- **kratke novice** o društvenem dogajanju, organizaciji konferenc, predstavitve knjig ipd.

Znanstveni in strokovni prispevki so recenzirani. Če je članek sprejet (po recenzentovem in lektorjevem pregledu), avtor vrne popravljen članek uredniku Vakuumista. Prispevki morajo biti napisani v slovenskem jeziku.

Avtorji prispevka so v celoti odgovorni za vsebino objavljenega sestavka. Z objavo preidejo avtorske pravice na izdajatelja. Pri morebitnih kasnejših objavah mora biti periodična publikacija Vakuumist navedena kot vir.

### VSEBINA ROKOPISA

Rokopis naj bo sestavljen iz naslednjih delov:

1. naslov članka (v slovenskem in angleškem jeziku)
  2. podatki o avtorjih (ime in priimek, institucija, naslov institucije)
  3. povzetek (v slovenskem in angleškem jeziku, 100–200 besed)
  4. ključne besede (v slovenskem in angleškem jeziku, 3–6 besed)
  5. besedilo članka v skladu s shemo IMRAD (uvod, eksperimentalne metode, rezultati in diskusija, sklepi)
  6. seznam literature
  7. morebitne tabele z nadnapisi
  8. podnapisi k slikam
  9. slike (risbe, fotografije), ki naj bodo priložene posebej
- Praktični nasveti in kratke novice so brez povzetka, ključnih besed in literature, vsebinska zasnova besedila pa ni strogo določena.

### TEHNIČNE ZAHTEVE ZA ROKOPIS

- Tekst naj bo shranjen v formatu doc, docx ali rtf. Formata tex ali pdf za tekst nista primerna.
- V dokumentu naj bo čim manj avtomatskih indeksov, križnih povezav (linkov) in stilističnih posebnosti (različni font, formati, poravnave, deljenje besed). Pri oblikovanju se omejite na kaze **mastno**, *poševno*, <sup>potenca</sup> in posebni znaki. Formule oblikujte bodisi tekstovno ali z urejevalnikom (npr. equation editor), lahko pa jih vključite v tekst kot slikovni objekt.
- Tekst naj bo smiselno razdeljen na poglavja in podpoglavja (detajlnejša delitev ni zelena), naslovi pa naj bodo oštevilčeni z vrstilci, npr. »2.1 Meritve tlaka«.

- Na vse literaturne vire, tabele in slike morajo biti sklici v tekstu. Vrstni red literaturnih virov, tabel in slik naj sledi vrstnemu redu prvega sklica nanje.
- Primeri sklicevanja: na literaturne vire [1], na enačbe (1), na tabele tabela 1, na slike slika 1. Vse samostojno stoječe enačbe naj bodo ob robu označene, npr. (1). Če je slika iz več delov, naj bodo posamezni deli označeni s črkami: a), b), c), č) itd., in sicer tako na sliki kot na podnapisu.
- Literaturni viri morajo biti popolni (brez okrajšav et al., ibid ...). Izogibajte se težko dostopnih virov (prospekti, seminarske naloge, neobjavljene raziskave, osebna korespondenca). Primeri pravilnih zapisov:
  - monografija: S. Južnič, Zgodovina raziskovanja vakuuma in vakuumskih tehnik, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Ljubljana, 2004, str. 203
  - članek v periodični publikaciji: M. Finšgar, I. Milošev, *Vakuumist*, 29 (2009) 4, 4–8
  - prispevek v zbornikih posvetovanj: Novejši razvoj trdih zaščitnih PVD-prevlek za zaščito orodij in strojnih delov, Zbornik posvetovanja Orodjarstvo, Portorož, 2003, 121–124
  - dostopno na svetovnem spletu: UK ESCA Users Group Database of Auger parameters, <http://www.uksaf.org/data/table.html>, zadnjič dostopano: 11. 2. 2010
- Tabele naj bodo oblikovno enostavne. V rokopisu naj stojijo na koncu dokumenta. Za ločevanje stolpcev uporabljajte tabulatorje (ne presledkov) ali tabelarično formo urejevalnika.
- Slike naj bodo shranjene posebej v navadnih formatih (tif, png, jpg), lahko tudi združeni v en dokument (pdf, ppt). Slik ne vstavljajte v tekstualni del rokopisa! Poskrbite za ustrezno resolucijo, še posebej pri linijskih slikah. Slike naj bodo črno-bele ali v sivih tonih, ne barvne.
- Črkovne oznake na slikah naj bodo take velikosti, da je po pomanjšavi na širino enega stolpca (7,9 cm) velikost znakov najmanj 1,2 mm. Priporočljiv je oblikovno enostaven font, npr. Arial.
- Pri pisanju veličin in enot se držite načel standarda ISO-31 (veličine pišemo poševno, enote pokončno, isto pravilo velja tudi za grške črke). Osi grafov in vodilne vrstice tabel pišemo v obliki *veličina*/enota, npr. *m/kg*.

### UREDNIŠTVO

Rokopise pošljite na naslov [miha.cekada@ijs.si](mailto:miha.cekada@ijs.si). Kontaktni podatki uredništva so:  
doc. dr. Miha Čekada  
glavni in odgovorni urednik Vakuumista  
Institut »Jožef Stefan«  
Jamova 39  
1000 Ljubljana  
e-pošta: [miha.cekada@ijs.si](mailto:miha.cekada@ijs.si)  
tel.: (01) 477 38 29  
faks: (01) 251 93 85

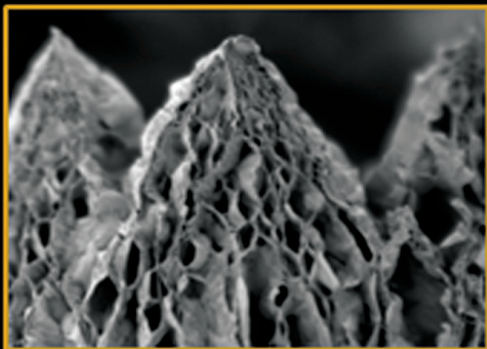


# JSM-7800F *Prime*

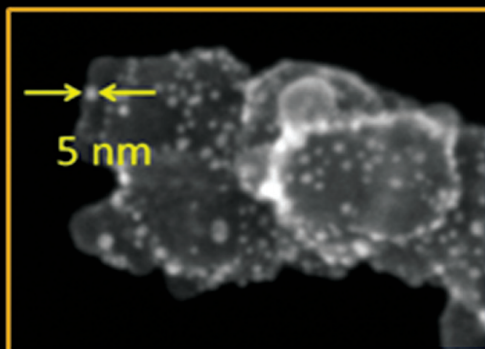


## SUB-NANOMETRIC IMAGING & NANOMETRIC ANALYSIS

Resolution: 0.7nm from 30kV to 1kV



Graphene (80V)



EDS analysis of nanoparticles

