

# RAZISKOVANJE VAKUUMA NA (DUNAJSKEM) FIZIKALNEM INŠTITUTU JOŽEFA STEFANA (ob stopetindvajsetletnici Stefanovega zakona)

Stanislav Južnič

Inštitut za matematiko, fiziko in mehaniko, Jadranska 19, 1000 Ljubljana

## POVZETEK

Na osnovi v literaturi doslej še neuporabljenih arhivskih podatkov opisujemo poklicno pot Jožefa Stefana. Povzemamo zgodovino raziskovanja sevanja v vakuumu na dunajskem Fizikalnem inštitutu v času Stefana. Prvič v zgodovino opisju poudarjamo povezavo Stefanovega zakona o sevanju s sočasnimi Edisonovimi in drugimi raziskovanji sevanja vakuumskih žarnic. Boltzmannova teorijska potrditev Stefanovega zakona je bila pravzaprav neposredna posledica Boltzmannove kritike Bartolijeve analize sevanja v vakuumskem radiometru. Tako je bil razvoj Stefanovega zakona tesno povezan s tedanjimi raziskovanji vakuumu.

## Vacuum Research at the Physical Institute of Josef Stefan

### ABSTRACT

By using the new archive material professional life of Josef Stefan is described. The history of the research of radiation in the Physical institute of Vienna during Stefan time and its echo in works of other contemporaries is described. For the first time in the historiography the relation between Stefan's radiation law and the simultaneous Edison's and other research of vacuum incandescent lamp. Boltzmann's verification Stefan's law followed his critique of Bartoli's opinion about the radiation in vacuum radiometer. Therefore direct connections of Stefan's law and vacuum research of his time is claimed.

## 1 UVOD

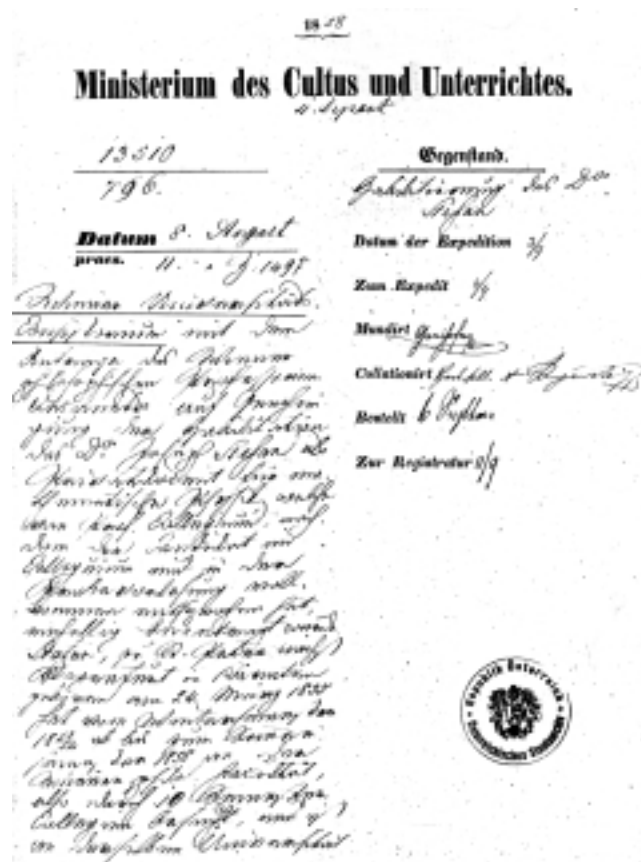
Pred stoletjem in četrt je Jožef Stefan 10. 3. 1879 pred dunajsko akademijo prvič objavil svoj znameniti zakon o sevanju, še vedno edini pomembni fizikalni zakon, imenovan po Slovencu. Pred sto dvajsetimi leti je Boltzmann potrdil Stefanov zakon s kritiko Bartolijeve analize sevanja v vakuumskem radiometru. Zato je prav, da pomembno obletnico obeležimo z nekaterimi novejšimi odkritji o povezavah Stefanovih raziskav sevanja s tedanjimi raziskovanji vakuumu ob letošnjem praznovanju leta fizike 2005.

## 2 STEFANOVA POKLICNA POT

Fizikalni inštitut na Dunaju je bil ustanovljen 17. 1. 1850, prav v času prve uporabe katodnih elektronk. Njegov prvi predstojnik je postal rudarski svetnik Doppler; bil je profesor na dunajski Politehniki, skupaj z nekdanjim ljubljanskim matematikom Karlom Schulzem pl. Strassnitzkim. Doppler je zaslovel leta 1842 v Pragi z raziskovanjem spreminjanja frekvence izsevane svetlobe zvezd zaradi njihovega gibanja v vakuumu.

Kot direktor Fizikalnega inštituta je bil Doppler imenovan še za rednega profesorja na dunajski univerzi. Delo na Inštitutu so pričeli 1. 4. 1850 v prostorih današnje Akademije znanosti. Od leta 1851 do leta 1875 je bil Inštitut na Erdbergu, na Erdbergstrasse št. 15, v tretjem dunajskem okraju. Leta 1875 je Stefan preselil Inštitut na Türkenstrasse št. 3.

Po Dopplerjevi bolezni pomladi leta 1852 je vodenje Inštituta prevzel Ettingshausen, dotedanji profesor inženirskih ved na dunajski Politehniki. Dvorni svetnik Ettingshausen je imel nenavadno mnogo privatnih docentov v primerjavi z univerzami v Nemčiji. Država se ni vmešavala v njegov odnos do podiplomcev; svoje docente je pač lastnoročno usmerjal v raziskovanje, seveda predvsem posvečeno potrjevanju domnev o atomski strukturi snovi. Že zelo zgodaj je nabavil vakuumске elektronke. Opazil je, da je barva "vakuumu" v elektronkah povezana s spek-



Slika 1: Naslovna stran Stefanove vloge za habilitacijo na Dunajski univerzi, vložena oktobra leta 1858 (Dokumenti, 3. 9. 1858)

Handwritten notes in the top left corner of the document, likely related to the author's work or the subject of the petition.

*Handwritten text in the middle left section, possibly a list of works or a detailed description of the author's qualifications.*

*Handwritten header and date: "L. Scherling" and "N. 12172 C. 4. des 20. Dezember 1862".*



*Handwritten text in the middle right section, likely the main body of the minister's recommendation.*

- 1 N. 12172 ca. 1862 1 Stück
- 2 1 Copie 1 Stück
- 3 Einlauf des Aktes d. d. 20. Dez. 1862

3992

**Slika 2:** Druga stran Stefanove vloge za habilitacijo z dne 3. 9. 1858; v levem zgornjem kotu je opisal predloženi razpravi o nihanju, pozneje objavljeni v Ann. Phys., ter o absorpciji plinov, o kateri je dne 10. 12. 1857 predaval pred Dunajsko akademijo in razpravo naslednje leto objavil v akademskem glasilu (Dokumenti, 3. 9. 1858)

trom vsebovanega plina. V ožjih delih vakuumske elektronke je opazil nezvezno osvetlitev, v širših pa lepe plasti. Zato je Reitlingerju naročil, naj razišče spektre v vakuumskih elektronkah v odvisnosti od vrste plinskega polnjenja in od debeline vakuumske elektronke. Reitlinger je leta 1858 doktoriral pri Ettingshausnu, naslednje leto pa sta skupaj s Stefanom postala docenta na Inštitutu.

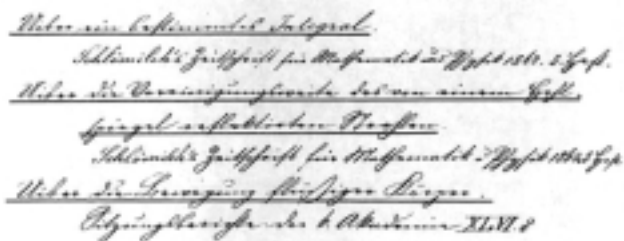
Stefan je bil en semester "Zögling" na dunajskem fizikalnem inštitutu, kjer je pokazal "izreden talent".<sup>1</sup> Med 8. 8. 1858 in 24. 9. 1858 so opravili postopek Stefanove habilitacije za privatnega docenta matematične fizike. Leta 1860 je Stefan postal dopisni član Cesarske akademije znanosti na Dunaju.<sup>2</sup>

Med 20. 1. 1862 in 9. 3. 1863 je tekel postopek imenovanja Stefana za rednega profesorja višje matematike in fizike na dunajski univerzi in za sodirektorja Fizikalnega inštituta z letno plačo 1680 guldnov z dodatnimi 157 guldn 50 kr.<sup>3</sup> Stefanovo

*Handwritten list of Stefan's publications, including titles like "Ueber die Fortpflanzung der Schwingungen in den Gasen" and "Ueber die Fortpflanzung der Schwingungen in den Flüssigkeiten".*

**Slika 4:** Prvi del Schmerlingovega (20. 12. 1862) popisa štirinajstih Stefanovih objavljenih del, med katerimi je bilo eno le nadaljevanje prejšnjega (Dokumenti, 20. 12. 1862)

<sup>1</sup> Dokumenti, 26. 1. 1863, str. 9  
<sup>2</sup> Dokumenti, 26. 1. 1863, str. 9



Slika 5: Nadaljevanje Schmerlingovega (20. 12. 1862) naštevaja štirinajstih Stefanovih objavljenih del (Dokumenti, 20. 12. 1862)

imenovanje je minister že imel za uvod v poznejšo zamenjavo bolnega Ettingshausna.<sup>4</sup>

Notranji minister Schmerling je 20. 12. 1862 v priporočilu cesarju naštel štirinajst Stefanovih objavljenih del, med katerimi je bilo eno le nadaljevanje prejšnjega. Tri izmed naštetih del se v slovenski literaturi doslej še ni navajalo,<sup>5</sup> morda zato, ker je v njih Stefan veliko bolj posegel v čisto matematiko kot pozneje. Dve doslej neznani deli je objavil v tedanji vodilni nemški matematični Schlömlichovi reviji, kjer so prav tako radi tiskali fizikalne razprave. Pozneje so v njej objavljali le naslove Stefanovih del.

Med 9. 6. 1866 in 10. 10. 1866 je bil končan postopek za upokojitev Ettingshausna z letno pokojnino 4000 fl.<sup>6</sup> Minister je predložil, naj njegovo katedro višje fizike prevzame Stefan in postane edini direktor Fizikalnega inštituta ter profesor na Politehničnem inštitutu z letnim dohodkom 3500 guldnov in pravico do stanovanja v Inštitutu.<sup>7</sup> Imenovanje je podpisal Franc Jožef I. v Ichlu dne 1. 10. 1866 z nekoliko nižjimi letnimi dohodki. Ettingshausen je svojemu učencu Stefanu zaupal, saj sta bila enakega mnenja o pomenu atomizma in vakuumskih poskusov pri nadaljnjem razvoju fizikalnih ved.

Z ukazom 7. 4. 1873 je Franc Jožef I. povišal Stefana v prvi plačilni razred. Letno plačo mu je povišal s 3000 na 3500 fl po predlogu ministra za uk in bogočastje Stremayra. Za neporočenega skromnega Stefana je bila to kar velika plača.

Leta 1878 je Ettingshausen umrl; njegov nekdanji učenec Stefan je zanj objavil nekrolog pri Dunajski akademiji. 27. 10. 1878 je ministrstvo za uk in bogočastje predložilo Stefana ter profesorja mineralogije in petrografije Tschermaka za nova dvorna svetnika. V dopisu je minister Stremayr opisal njune zasluge in življenjsko pot. Stefanu je pripisal zasluge, da stoji avstrijsko matematično-fizikalno raziskovanje ob boku angleškemu, francoskemu in nemškemu učen-

<sup>4</sup> Dokumenti, 9. 2. 1863, str. IV

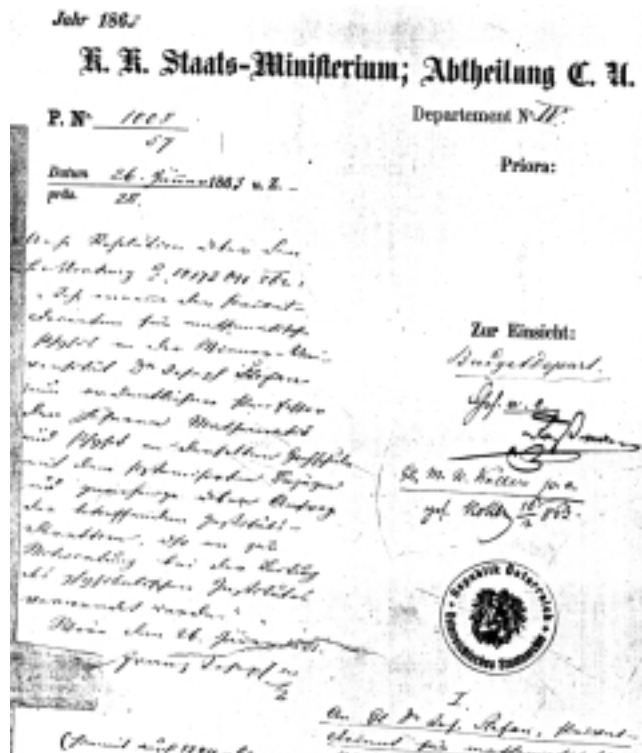
<sup>5</sup> Čermelj, 1976, 107–108; Sitar, 1993, 140

<sup>6</sup> Dokumenti, 20. 9. 1866, str. 11–12

<sup>7</sup> Dokumenti, 10. 9. 1866, str. 16

<sup>8</sup> Dokumenti, 27. 10. 1878, str. 4–5

<sup>9</sup> Tschermak, 1860, 11; Höflechner, 1994, 1: 148



Slika 6: Cesar Franc Jožef I. na Dunaju odobri imenovanje Jožefa Stefana za profesorja matematične fizike na Dunajski univerzi (Dokumenti, 26. 1. 1863)

jakom. Med Stefanovimi dosežki je naštel: prevzem tajniških poslov matematično-naravoslovnega razreda dunajske akademije po umrlem profesorju kemije Kristelliju, rektorat na univerzi v šolskem letu 1876/77, vodstvo avstrijske komisije za pouk na razstavi v Parizu ter članstvo v gimnazijski izpitni komisiji, kjer je bil Stefan komisar za fiziko in svetovalec za fizikalne učbenike pri ministrstvu.<sup>8</sup>

Stefana in Tschermaka je minister opisal kot dobra in zanesljiva v političnem in moralnem oziru ter spoštovana med kolegi. Franc Jožef I. je ukaz o imenovanju obeh novih dvornih svetnikov podpisal v Gödöllu 1. 11. 1878. Tschermak je bil sicer Stefanov nasprotnik; kritiziral je Stefanovo (1858) razširitev Dulong-Petitovega pravila na pline, leta 1893 pa je celo predložil Macha za Stefanovega naslednika na dunajski univerzi in nasprotoval Boltzmannovi kandidaturi.<sup>9</sup>

S tem imenovanjem je Stefanova kariera dosegla vrhunec. V 1860-ih in 1870-ih letih je bil tudi svetovalec ministrstva za stopnjevanje kvalitete znanstvenih del ter za štipendiranje višjih študijev fizike, celo v tujini.<sup>10</sup> Tako je usmerjal celotno fizikalno razisko-

Ich erlaube mir zu erwidern. Herrschaften sind besetzt mit  
 den Universitäts-Professoren in Wien. Die Professoren  
 sind: Dr. Josef Stefan und Dr. Gustav Fechner, in Anwesenheit  
 der Universitäts-Professoren sind nicht möglich. Ich habe  
 jeden der Titel und Charakter nicht vergessen. Herzlich.  
 Wien, den 1. November 1878.  
 Stremayr  
 4/11/78  
 Stremayr  
 Wien, den 1. November 1878.  
 Stremayr

**Slika 7:** Podpis našega cesarja in njegovega ministra Stremayra pod imenovanje Stefana za dvornega svetnika dne 1. 11. 1878 (Dokumenti, 1. 1. 1878).

vanje v monarhiji in sledil svojemu učitelju Ettingshausnu pri raziskovanjih atomizma z uporabo razvijajočih se vakuumskih tehnik.

### 3 STEFANOVO RAZISKOVANJE KINETIČNE TEORIJE IN ATOMOV

V začetku Stefanove znanstvene poti je direktor politehnike v Karlsruheju Redtenbacher leta 1852 in 1857 objavil teorijo snovnih jeder z ovojniciami iz etra. Njegova teorija je temeljila na Regnaultovih poskusih in na modelu vibracij v trdninah.

Na Nemškem je bila sočasno objavljena še sodobnejša teorija; zasnovala sta jo Krönig, direktor realke in urednik *Fortschritte der Physik* v Berlinu leta 1856, in Clausius, profesor na univerzi v Zürichu leta 1857. Njuna kinetična teorija je temeljila na translaciji molekul v plinih in ni izrecno prisegala na noben model atomov, etra ali vakuuma. Ključno vprašanje, ob katerem so se lomila kopja obeh teorij, je bilo vedenje snovi pri nizkih tlakih pri vakuumskih poskusih. Tako kot je razvoj matematike vedno znova poganjalo razmišljanje o neskončno majhnih količinah

<sup>10</sup> Höflechner, 1994, 1: 20

Allerunterthänigster  
**VORTRAG**  
 des treuehorsaamsten  
 Ministers  
 für Cultus und Unterricht.  
 Carl von Stremayr

wegen Verleihung des Titels  
 eines Hofrathes von Hof.  
 rathen von der Universität  
 Professoren in Wien Dr. Josef  
 Stefan und Dr. Gustav Fechner,  
 mak.

**Slika 8:** Uradna glava ministra Stremayra ob proglasitvi Stefana za svetnika dne 1. 11. 1878 (Dokumenti, 1. 1. 1878).

Zenonovega paradoksa gibanja, Newtonovega infinitezimalnega računa in Cantorjevih paradoksov množic, je sodobna fizika napredovala predvsem z vakuumskimi poskusi. Ob vprašanjih o vakuumu so seveda padale celo filozofske teorije, denimo Descartesova in Aristotelova.

Ko je v šestdesetih letih Stefan začel raziskovalo delo, je kinetična teorija plinov s teorijo vakuuma zašla v težave, ki so izvirale iz razlik v metodah Clausiusa in Maxwella in iz pomanjkljivih meritev transportnih koeficientov. Stefan je bil zagovornik kinetične teorije; vseeno je leta 1872 izbral model atoma, ki je bil blizu Redtenbacherjevim *dynamidam*.

Medtem ko je Clausius posplošil model plina in translacije molekul na vse toplotne pojave, je Redtenbacher na podoben način razširil uporabo modela trdnine in vibracij molekul. Stefan je izbral vmesno pot in uporabil model kapljevine kot primeren za vse pojavne oblike toplote. Hidrodinamiko je izbral zato, da bi svoje raziskave lahko utemeljeval na izdelani in uveljavljeni teoriji. Širjenje toplote je obravnaval kot posebno vejo hidrodinamike. Analitično mehaniko je dopolnil z upoštevanjem toplotnega širjenja snovi in

notranjega trenja.<sup>11</sup> Tako imamo lahko Stefanovo raziskovanje toplotnih pojavov za nadaljevanje Fourierovega raziskovanja prevajanja toplote iz leta 1822.

Stefan je zaradi meritev pariškega zdravnika Poiseuilla o zmanjševanju notranjega trenja v kapilarah pri naraščajoči temperaturi dvomil o Maxwellovem modelu elastičnih krogel iz leta 1859. Po Maxwellu bi morale notranje trenje naraščati z naraščajočo temperaturo.<sup>12</sup>

Širjenje toplote in difuzija plinov sta bila za Stefana hidrodinamična pojava<sup>13</sup>, v nasprotju z Grahamom, ki je imel difuzijo plinov za kemijski pojav. Stefan ni sprejemal niti Maxwellovega "ad hoc" modela molekul s silo, sorazmerno peti potenci razdalje. Ta model je sicer dajal pravi model difuzije z difuzijskim koeficientom, sorazmernim s temperaturo. Ni pa omogočal določitve notranjih lastnosti plina. Zato je Stefan objavil svoj dinamični model plina<sup>14</sup>, v katerem se polmer molekule manjša z neko potenco temperature. V Stefanovem modelu se polmer hitrejših molekul niža zaradi povečanih možnosti medsebojnega prodiranja med trki. Odbojna sila je potem sorazmerna s hitrostjo, podobno kot je Francoz H. Navier trdil že leta 1826.<sup>15</sup>

Stefan je razmišljal o modelu "sfere sil" brez molekul, podobnih trdnim telesom. Odbojna sila med molekulama mora namreč delovati na večjih razdaljah, da lahko vpliva na viskoznost.<sup>16</sup>

Stefan se je s hidrodinamsko analogijo po letu 1872 v glavnem ognil domnevam o lastnostih molekul in vakuumu med njimi.<sup>17</sup> Pozneje ni več objavljaj razprav o "realnih" atomih, saj se je bal kritik energicistov. Neposredno polemiko z njimi je prepustil svojemu nekdanjemu študentu Boltzmannu. Med letoma 1873 in 1876 sta Boltzmann in Stefan sodelovala na dunajski univerzi in sta bila tako v vsakodnevnih stikih; njune pogovore je opisal Boltzmann 23. 3. 1876 v pismu svoji poznejši ženi napol Slovenki Jetti.<sup>18</sup>

Podoben hidrodinamski model so uporabljali celo raziskovalci elektrike, ki so domnevali, da sta eter in elektrika enaka. Negativna elektrika bi bila potem pomanjkanje etra, razlika potencialov pa presežek etra. Med temi raziskovalci so bili, poleg začetnika

enofluidne teorije Franklina, še italjanski jezuit in astronom Secchi, Šved Edlung (1871) ter Avstrijec Puluj (1880), znan po svojih raziskovanjih vakuumu na Stefanovem Fizikalnem inštitutu.

#### 4 ZAKON O SEVANJU

Stefana je k raziskovanju sevanja leta 1878 spodbudilo branje "enaintrideset let stare" razprave newyorškega profesorja kemije in fiziologije Draperja o vplivu elektrike na kapilarnost, kjer ni bil rešen problem eksponentnega naraščanja gostote izsevanega energijskega toka s temperaturo.<sup>19</sup>

Stefan je 20. 3. 1879 predložil Akademiji razpravo o sevanju. Rokopis povzetka razprave je bil dolg 4 strani A4-formata. Celotno razpravo je zapisal na 61 straneh, tiskana pa je bila na 38 straneh.

Polovico razprave je obsegal njen prvi del o poskusih Dulonga in Petita in o pomanjkljivosti njunega zakona "geometričnega naraščanja količine toplote rdečega žara, ko temperature naraščajo v aritmetičnem zaporedju". Stefanova enačba s četrto potenco se je bolje skladala s poskusi francoskega šolskega inšpektorja Provostayja in profesorja na Sorbonni Desainsa pri nizkih temperaturah. Stefanova enačba naj bi imela še prednost v teoretičnem pogledu.<sup>20</sup>

Dulong-Petitov zakon je bil v času Stefanovih raziskav star že 62 let. Medtem so se pojavile nove meritve, predvsem glede temperature Sonca. Še tehtnejši so bili teorijski očitki, saj v Dulongovem času ni bilo znano, da toplotna prevodnost ni odvisna od gostote plina.<sup>21</sup> To je bilo najbolj presenetljivo dognanje Maxwellove kinetične teorije plinov, ki ga je opisal v pismu Stokesu leta 1859 in objavil naslednje leto.

Z Maxwellovo teorijo je Stefan dognal, da sta se Dulong in Petit pri svoji meritvi toplotnega sevanja res znebila konvekcije, ne pa prevajanja toplote.<sup>22</sup> V času meritev Dulonga in Petita je prevladoval dvom o tem, ali zrak sploh prevaja toploto, ki ga je razrešil šele Stefan s sodelavci v fizikalnem inštitutu z meritvami toplotne prevodnosti plinov v sedemdesetih letih 19. stoletja. Pri meritvah z diatermometrom je uporabljal najboljše dosežke tedanje vakuumске tehnike.

<sup>11</sup> Pourprix, 1988, 96

<sup>12</sup> Stefan, 1872, 8

<sup>13</sup> Pourprix, 1988, 96, 98

<sup>14</sup> Stefan, 1872, 16; Boltzmann, 1880, 131; Pourprix, 1988, 102

<sup>15</sup> Pourprix, 1988, 88, 105

<sup>16</sup> Pourprix, 1988, 102

<sup>17</sup> Pourprix, 1988, 100

<sup>18</sup> Flamm, 1995, 161

<sup>19</sup> Draper, 1846, 84; Rosenberger, 1890, 448; Sitar, 1993, 82

<sup>20</sup> Stefan, 1879, 2, 20; Strnad, 1985, 75

<sup>21</sup> Stefan, Povzetek 1879, 2

<sup>22</sup> Stefan, 1879, 2

V drugem delu razprave je Stefan določil velikost toplotnega sevanja v absolutnih enotah. Primerjal je poskuse Desperetza s poskusi Provostayja in Desainsa, ki sta namerila precej nižje vrednosti.

V tretjem delu razprave je Stefan obravnaval poskuse Draperja in Ericssona. Razpravo je začel s poročilom o Wüllnerjevi priredbi Tyndallovih poskusov, ki naj bi se posebno dobro skladali s Stefanovim zakonom. Teh pol strani smo doslej imeli<sup>23</sup> za bistveni del Stefanove razprave. Vendar Stefan v rokopisnem povzetku svojega dela Wüllnerja in Tyndalla sploh ni omenil; celo v objavljenem članku se mu je njuna meritev zdela manj pomembna od meritev Draperja in Ericssona, s katerima je naslovil tretje poglavje razprave.

V četrtem delu razprave je Stefan določil temperaturo Sonca. Uporabil je meritve Francoza Pouilleta, predvsem pa poskuse Charlesa Soreta, profesorja v Ženevi; tako je prvi dobil smiselno vrednost za temperaturo Sonca 5580 °C.

Stefan je bil v nasprotju z Boltzmannom precej površen pri citiranju. Tako je v razpravi iz leta 1879 omenil več kot deset raziskovalcev brez točnih referenc. Nepopolno je citiral Draperjevo in Ericsonovo delo; po sodobnih merilih je, žal, pravilna le Stefanova navedba dela Dulonga in Petita iz leta 1817.<sup>24</sup>

## 5 STEFANOV ZAKON MED SODOBNIKI

Asistent Bartoli z univerze v Bologni je 1. 7. 1876 objavil, da toplotno sevanje v vakuumskem radiometru nasprotuje drugemu zakonu termodinamike. Izhajal je iz raziskovanja vakuuma v radiometru, ki ga je Crookes tri leta prej kazal pred Kraljevo družbo v Londonu. Bartoli je bil nasprotno od Crookesa že takoj prepričan, da v radiometru ne meri absolutnega vakuuma.<sup>25</sup>

Tako je eksperimentalno raziskovanje vakuuma začelo neposredno vplivati na razprave še pred objavo Stefanovega zakona. Leta 1883 je Bartolijevo idejo podprl Eddy, profesor matematike in astronomije na univerzi Cincinnati. Boltzmann je kritiziral Eddyja; podobno kot Stefan je o Bartolijevih raziskavah prebral šele v Eddyjevem delu. Izredni profesor v Leipzigu E. Wiedemann je pozneje skupaj z očetom G. H. Wiedemannom urejeval osrednjo fizikalno revijo *Ann. Phys.* v Leipzigu in je imel veliko boljši pregled nad italijanskimi objavami; zato je med prvimi Nemci prebral Bartolijevo delo.

Florentinec **Adolfo Giuseppe Bartoli** je študiral fiziko in matematiko v Pisi do leta 1774. Leta 1876 je postal asistent na univerzi v Bologni in profesor fizike v Arezzu, leta 1878 v Sassariju, leta 1879 na tehničnem inštitutu v Firencah, leta 1886 na univerzi Catania in leta 1893 na univerzi v Paviji. Objavil je 79 razprav v vodilnem italijanskem časopisu *Il Nuovo Cimento* v Pisi; vse je posvetil električnim in toplotnim pojavom. Bartolijeve teorije tlaka svetlobe je bila podobna Maxwellovi in je omogočila prve meritve. Lebedev je svoje poskuse na temeljih Bartolijevih domnev objavil v Moskvi avgusta 1901; uporabljal je G. Kahlbaumovo berlinsko vakuumsko črpalko, ustvarjeni vakuum pa je meril z McLeodovim manometrom).

Boltzmann je Bartolijevo delo obravnaval leta 1884, tik pred teorijsko izpeljavo Stefanovega zakona.<sup>26</sup> Tudi Stefan verjetno ni poznal Bartolijevih razmišljanj o vakuumu v radiometru iz leta 1876, dokler ni Bartolija javno podprl Eddy. Zato Bartolijeve raziskave sevanja niso odločilno vplivale na Stefanovo pot k zakonu o sevanju leta 1879. Seveda se je Stefan, tako kot vsi tedanji fiziki, živo zanimal za vakuumске poskuse v radiometru. Imel je celo tesne stike z italijanskimi raziskovalci, posebno s svojim nekdanjim sodelavcem na Dunajskem fizikalnem inštitutu Blaserno, od leta 1904 predsednikom rimske Akademije *dei Lincei*.

Elektrotehnična razstava na Dunaju med 11. 8. 1883 in 3. 11. 1883 je lahko vplivala na Boltzmannovo zanimanje za teorijo sevanja. Stefan se je kot znanstveni vodja razstave dne 25. 10. 1883 sestal s častnim predsednikom tehnično-znanstvene komisije Williamom Thomsonom, poznejšim lordom Kelvinom. Oba sta bila skupaj z Williamom Siemensom slovesno sprejeta na angleškem poslaništvu na Dunaju. Na Angleškem živeči nemški industrijalec William Siemens je na Dunaju celo predaval o sevanju v vakuumu.<sup>27</sup> Žal ni omenil Stefanovega zakona, čeprav je našega junaka dobro poznal. Od kod nenadna zamera, ne bomo nikoli izvedeli, saj je Siemens le petnajst dni po koncu dunajske razstave nenadoma umrl v Londonu.

Stefan je na Dunajski razstavi predaval občinskim predstavnikom, županu Dunaja in prestolonasledniku o Edisonovi vakuumski žarnici le štiri leta po njeni iznajdbi.<sup>28</sup> Stefan je raziskoval vakuumsko žarnico kot primer svoje teorije sevanja; obenem pa je podedoval uporabno žilico svojega učitelja Ettingshausna in poudarjal prednosti žarnice pred drugimi svetili. Sode-

<sup>23</sup> Stefan, 1879, 31; Čermelj, 1976; Strnad, 1985.

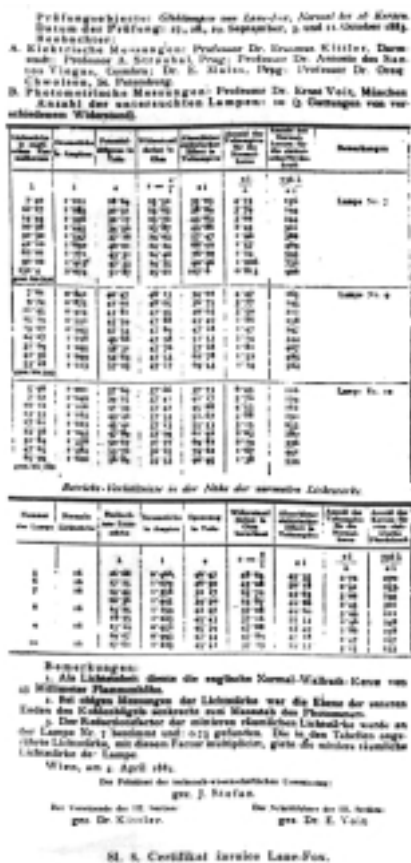
<sup>24</sup> Stefan, 1879, 421, 422, 393.

<sup>25</sup> Bartoli, 1879, 274.

<sup>26</sup> Höflechner, 1994, 1: 80

<sup>27</sup> Sitar, 1993, 87, 92–93

<sup>28</sup> Sitar, 1993, 93



**Slika 9:** Stefanov certifikat za Lane-Foxovo angleško vakuumsko žarnico z žarečim ogljem v obliki podkve na dunajski razstavi

lavca Stefanovega dunajskega fizikalnega inštituta Wächter in Puluj sta svoji vakuumski žarnici prav tako prikazala na Dunajski razstavi pod Stefanovim vodstvom. Puluj je medtem sicer že prevzel katedro v Pragi, vendar je ohranil stike z dunajskimi vakuumisti. Stefan je ocenjeval zmogljivosti žarnic še nekaj let po

dunajski razstavi. Preroško si je obetal, da bodo prav poskusi s sevanjem v vakuumskih žarnicah pripomogli k priznanju njegove teorije sevanja; novodobni poskusi so v celoti opravičili njegova upanja.<sup>29</sup>

Dunajska razstava in vroče poslovno obarvane debate o vakuumskih žarnicah so veliko pripomogle k priljubljenosti Stefanovega zakona o sevanju. Stefan je z vodenjem razstave postal avtoriteta pri proizvajalcih in uporabnikih žarnic in s tem tlakoval uspeh svojega zakona. Kljub temu so v prvih petih letih Stefanovo enačbo podprli predvsem nemško pišoči fiziki.<sup>30</sup>

Tabela 1 vsebuje le dela, objavljena v osrednjih nemških (*Ann. Phys.*), avstrijskih (*Wien. Ber.*), francoskih (*Comptes Rendus*), angleških (*Proc. Roy. Soc. Lond., Phil. Trans., Phil. Mag.*) in ameriških publikacijah ter v knjigah. Raziskovalci so se v glavnem strinjali, da oblika energijskih krivulj in porazdelitev energije ni odvisna od substance in temperature. Ostareli Desains in komaj dvajsetletni poznejši Nobelov nagrajenec Curie sta na Fakulteti znanosti v Parizu leta 1880 uporabljala ploščice iz platine in bakra, razbeljene do belega žara; ugotavljala sta lego energijskega maksimuma. Lecher je v Innsbrücku leta 1882 ugotavljal, da oblika energijskih krivulj ter porazdelitev energije ni odvisna od substance in temperature; pač v skladu s Kirchhoffovim zakonom. Graetz na Bavarskem in Bottomley v Londonu sta previdno merila toplotno sevanje v vakuumu. S tem sta se zagotovo znebila morebitnega prevajanja toplote, ki je verjetno motilo poskus njunega nemško-londonskega kolega Williama Siemensa leto poprej. Poskusi v vakuumu so postajali nujni za točne rezultate. Kljub temu je Dewar še leta 1893 zagovarjal zakon s tretjo potenco temperature, namesto Stefano-

**Tabela 1:** Pomembnejše razprave o sevanju v prvih petih letih po Stefanovem zakonu

Raziskovalec	Narodnost	Kraj objave	Leto objave	Službeno mesto	Podpre Stefana
Graetz	nemški Žid	Leipzig	1880	Docent v Münchnu	Da
Desains, Curie	francoska	Pariz	1880		
Lorenz	danska	Leipzig	1881	Profesor v Kopenhagnu	Da
C. A. Young	ZDA	New York	1881		Ne omeni ga
J. Violle	francoska	Pariz	1881		Proti
Lecher	avstrijska	Dunaj	1882	Profesor v Innsbrucku	Da
Rivière	francoska	Pariz	1882		Ne omeni ga
Siemens	nemško-angleška	London	1883	Izumitelj v Londonu	Ne omeni ga
Abney, Festings	angleška	London	1883		Ne omeni ga
Christiansen	danska	Leipzig	1883	Profesor na Politehniku v Kopenhagnu	Da
Bottomley	angleška	London	1884		Ne
Tait	škotska	London	1884	Profesor	Zagovarja Dulong-Petita
Boltzmann	avstrijska	Leipzig	1884	Profesor v Gradcu	Da
Schneebeli		Leipzig	1884		Da

<sup>29</sup> Prasad, Mascarenhas, 1976.

<sup>30</sup> Lummer, 1900, 61–63; Brush, 1976, 511, 517; Strnad, 1985, 75.

vega.<sup>31</sup> Stefanov zakon je uporabil šele leta 1920, kar davno umrlemu Stefanu gotovo ni bilo v prid.

Zgodnji francosko in angleško pišoči fiziki Stefanove enačbe niso omenjali; nekateri so njegovo enačbo kar odklanjali ali pa celo vztrajali pri Dulong-Petitovemu zakonu. Angleški izdelovalec fotografskih in spektroskopskih naprav Abney Stefanovega zakona še ni poznal leta 1883; bil je resda član londonske Kraljeve družbe, ki pa se za dosežke na evropski celini ni dovolj zanimala. Bolj prijazni do Stefana so bili seveda nemško pišoči raziskovalci; med njimi se je izkazal učitelj fizike v Neuchâtelu v Švici Schneebeli, ki se je vakuumskih poskusov naučil kot Kundtov študent v Zürichu.

## 6 SKLEP

Poldrugo leto po Stefanovi smrti je imelo združenje nemških naravoslovcev in zdravnikov srečanje na Dunaju dne 24. 9. 1894. Z osrednjim referatom o sevanju je nastopil E. Wiedemann, tedaj profesor v Erlangenu. Proti koncu 19. stoletja je središče raziskovanja sevanja in njegovega merjenja z vakuumskimi tehnikami prešlo iz naše države v Berlin, kjer so ga kronali s Planckovo teorijo kvantov in z Einsteinovimi dosežki v čudovitem letu 1905, prav obletnico teh dogodkov praznujemo v letošnjem letu fizike tudi s to razpravo.

## 7 LITERATURA, VIRI IN POMEMBNEJŠE OSEBE, OMENJENE V RAZPRAVI

- Abney, William de Wiveleslie (\* 1844; † 1920), Festings. 1883. *Phil. Mag.*
- Bartoli, Adolfo Guiseppe (\* 19. 3. 1851 Firenze; † 18. 7. 1896 Pavia), 1876. Sopra i movimenti prodotti dalla luce e dal calore e sopra il radiometro di Crookes. *Le Monier* (Firence). Povzetek: 1876. *Fortschritte der Physik.* (2) 32: 888- in 1541. Del razprave *L'ipotesi dell'equilibrio mobile dio temperature ed il secondo principio termodinamico*
- Bartoli, Adolfo Guiseppe, 1879. Dimostrazione di un teorema relativo alla teoria del raggiamento dato dal prof. R. Clausius: pel dott. Adolfo Bartoli. Professore di fisica nell'istituto technico di Firenze. *Nuovo Cimento* (3) 6: 265–276
- Bartoli, Adolfo Guiseppe, 1884. Il calorico raggianti e il secondo principio di termodinamica: nota di Adolfo Bartoli. *Nuovo Cimento* (3) 15: 193–202. Prevod: 1884. *Exner's Repertor. D. Physik.* (Wien). 21: 198.
- Boltzmann, Ludwig (\* 1844; † 1906). 1872. Über das Wirkungsgesetz der Molekularkräfte. *Wien. Anz.* 9: 134. Ponatis: 1872. *Ann. Phys.*
- Boltzmann, Ludwig, 1884. Über eine von Hrn. Bartoli entdeckte Beziehung der Wärmestrahlung zum zweiten Hauptsatz. *Ann. Phys.* (3) 22: 31–39, 291, 616
- Boltzmann, Ludwig, 1884. Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der elektromagnetischen Lichttheorie. *Ann. Phys.* (3) 22: 291–294.
- Brush, Stephen G (\* 1929), 1976. *The kind of motion we call heat, North-Holland.* II. Amsterdam, New York, Oxford
- Christiansen, Christian (\* 1843; † 1917), 1883. *Ann. Phys.* (3) 19: 267
- Christiansen, Christian, 1884. *Ann. Phys.* (3) 21: 364
- Clausius, Robert (\* 1822; † 1888), 1856. Ueber die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen, *Ann. Phys.* 100: 353

- Pierre Curie (\* 1859; † 1906)
- Čermelj, Lavo (\* 1889; † 1980), 1976. *Jožef Stefan.* Ljubljana
- Davies, C. N., 1946. Tyndall and Stefan's radiation law. *Nature* 157: 879
- Paul Quentin Desains (\* 1817; † 1885)
- Christian Doppler (\* 1803; † 1853)
- Draper, J. William (\* 1811 Liverpool; † 1882 New York), 1846. *Ann. Phys.* 67: 84
- Dulong, Pierre Louis (\* 1785; † 1838), Petit, Alexis Theérèse (\* 1791; † 1820), 1817. *Annales de chemie et de physique.* 7: 225–264, 337–367.
- Eddy, Henry Turner (\* 1844). Julij 1882. Radiant heat, an exception to the second law of thermodynamics. *Scientific Proceedings of the Ohio Mechanic Institute.* 105–114. Ponatis: 1883. *Franklin Inst. Journal.* 85: Povzetek: 1883. *Beiblatter der (Wiedemans) Ann. Phys.* 7: 251
- Erdlung, Erik (\* 1819; † 1888), 1863. Über die Natur der Elektrizität. *Pogg. Ann.* 6: 95, 241
- J. Ericsson (\* 1803 Švedska; † 1889 New York)
- Andreas baron Ettingshausen (\* 1796; † 1878)
- Flamm, Dietrich (\* 1936). 1995. Hochgeehrter Herr Professor, Innig geliebter Louis: Ludwig Boltzmann, Henriette von Aigentler, Briefwechsel. Wien, Köln, Weimar, Böhlau 1995
- Graetz, Leo (\* 1856; † 1941), 1880. *Ann. Phys.* (3) 11: 913–930
- Höflechner, Walter. 1994. Ludwig Boltzmann, Dokumentation eines Professorlebens. Prvi del: Ludwig Boltzmann, Leben und Briefe. Graz: Akademisch Druck und Verlagsanstalt
- Anton Schrötter von Kristelli (\* 1802; † 1875)
- Krönig, August Karl (\* 1822; † 1879), 1956. Grundzüge einer Theorie der Gase. Berlin: A. W. Hayn. ponatis: 1856. *Ann. Phys.* 99: 315
- Lecher, Ernst (\* 1856; † 1926), 1882. *Ann. Phys.* (3) 17: 477
- Lecher, Ernst, 1884. *Wien. Ber.* 85: 441–490
- Lorenz, Ludwig Valentin (\* 1829; † 1891), 1881. *Ann. Phys.* (3) 13: 422, 582
- Lummer, Otto (\* 1860; † 1925), 1900. Le rayonnement des corps noirs. Rapports présentés au Congrès international de physique réuni a Paris en 1900, Paris. 41–99
- Maxwell, James Clerk (\* 1831; † 1879). Pismo Georgu Gabrielu Stokesu (\* 1819; † 1903) z dne 30. 5. 1859. Ruski prevod: Polak, 1984, 484
- Polak, L. S. 1984. *Ludwig Boltzmann. Izbranie trudi.* Moskva: Nauka
- Pouillet, Claude Servait Matthias (\* 1790; † 1868), 1838. *Ann. Phys.* (2) 45: 25, 481
- Poiseuille Jean Léon (\* 1799), 1846. Recherches exp.s le mouv. des liquides dans les tubes de très-petites diamètres, Mém. Sav. étrang. 9: 433. Povzetek: 1843. *Ann. de chim. et de phys.* (3) 7: 50. Prevod: 1843. *Ann. Phys.* 58: 424
- Pourprix, Bernard, Locqueneux, Robert, 1988. Josef Stefan (1835–1893). *Archives internationales d'histoire des sciences.* 38: 86–118
- Prasad B. S. N., Mascarenhas, R. 1978. A laboratory experiment on the application of Stefan's law to tungsten filament electric lamps. *American Journal of Physics.* 46: 420
- Frédéric Hervé de la Provostay (\* 1812; † 1863)
- Redtenbacher, Ferdinand (\* 1809; † 1863), 1852. *Prinzipien der Mechanik und das Maschinenbaues.* Ponatis: 1859
- Redtenbacher, Ferdinand, 1857. *Das Dynamiden-System.* Mannheim
- Rosenberger, Ferdinand, 1890. *Die Geschichte der Physik.* III. Braunschweig
- Anton Ritter von Schmerling (\* 1805; † 1893)
- Schneebeli (Schnneebeli), Heinrich, 1884. *Ann. Phys.* (3) 22: 430–438
- Angelo Secchi (\* 1818; † 1878)
- Siemens, Werner von (\* 1816; † 1892), 1889. Ueber die Zulässigkeit der Annahme eines elektrischen Sonnenpotentials und dessen Bedeutung zur Erklärung terrestrischer Phänomene, Vorgelegt d. k. Akad. d. Wissensch. zu Berlin am 31. 5. 1883. Ponatis: *Wissenschaftliche und Technische Arbeiten.* Erster Band. *Wissenschaftliche Abhandlungen und Vorträge.* Berlin: Verlag von Julius Springer, 258–379
- Siemens, Sir William (\* 1823; † 1883). 1883. Predavanje na mednarodni razstavi na Dunaju. *Proc. Roy. London. Soc.* 35: 166–177; 1883. *Nature*, 28: 19; 1884. *Proc. Roy. Inst. London.* 10: 315
- Sitar, Sandi, 1993. *Jožef Stefan.* Ljubljana: Park.
- Stefan, Jožef (\* 1835; † 1893), 1861?. Ueber den Integralsinus und einige verwandte bestimmte Integrale. *IV Program der öff. Ober=Realschule am Bauernmarkt (Wien)*
- Stefan, Jožef, 1862. Ueber ein bestimmtes Integral. *Schlömilch's Zeitschrift für Mathematik und Physik.* 5 Heft. (NUK-25774)

<sup>31</sup> Lummer, 1900, 63, 65; Dewar, 1927, 353–355



- Stefan, Jožef, 1862. Ueber die vereinigungsbreite des vom einen Hohl=Spiegel reflektiren Strahlen. *Schlömlich's Zeitschrift für Mathematik und Physik*. 5 Heft
- Stefan, Jožef, 11. 4. 1872. Über die dynamische Theorie der Diffusion der Gase, *Wien.Ber.* II. 65: 323–363
- Stefan, Jožef, 1878. Andreas von Ettingshausen. *Almanach Wien Akademie*. 28: 154–159
- Stefan, Jožef. 1879. Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur. *Wien.Ber.* II. 79: 391–428. Rokopis: Auszeiger-Notiz Vorlegt in der Sitzung am 10. März 1879 durch Verfasser. 4 strani rokopisa 282 ex 1879 v knjižnici Österreichisches Akademie der Wissenschaften, Wien (v našem tekstu citirano kot "Povzetek")
- Stefan, Jožef, 1880, Über die Tragkraft der Magnete. *Wien.Ber.* II. 81: 81–126
- Stefan, Jožef, 1858–1878. Štirje foliji dokumentov o Stefanovi poklicni poti na Univerzi pri Ministrstvu za uk in Bogočastje. Österreichisches Staatsarchiv. Wien. 4 Phil. Stefan. 16215/1858 (v razpravi citirano kot: "Dokumenti")
- Karl Edler von Stremayr (\* 1823; † 1904)
- Strnad, Janez (\*1934), 1985. Kako je Jožef Stefan odkril zakon o sevanju. *Zbornik za zgodovino naravoslovja in tehnike*. 8: 65–79
- Tschermak, Gustav (\* 1836 Moravska), 1860. Einige Sätze der theoretischen Chemie. *Wien. Ber.* 41: 67–112
- Tyndall, John (\* 1820; † 1893), 1864. On luminous and obscure radiation. *Phil. Mag.* 28: 329 Prevod: 1865. *Ann. Phys.* 124: 36
- Wiedemann, Eilhard Ernst Gustav (\* 1852; † 1928), 1896. Tagblatt der 66. *Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte in Wien 1894*. Wien, 76–77
- Gustav Heinrich Wiedemann (\* 1826; † 1899)
- Wüllner, Adolph, 1870–1871, 1874–1875. Die Lehre von der Wärme vom Standpunkte der mechanischen Wärmetheorie. II–III. Leipzig