Стручни критички осврт

Никола Н. Цветановић, *Настанак и транспорт брзих атома водоника у тињавим пражњењима*. Докторска дисертација. Београд: Физички факултет Универзитета у Београду, 2012 (ментор: др Милорад М. Кураица; комисија: М. М. Кураица, Н. Коњевић, О. Шашић, Б. Обрадовић). Отворени приступ: НаРДуС.

I Предмет, грађа и мерило

Дисертација се бави појавом коју физика водоничних пражњења бележи деценијама, а коју литература до предаје рада није тумачила јединствено: у тињавим пражњењима ниског притиска Балмерове линије водоника имају крила која одговарају атомима с енергијама од неколико стотина електронволти, неколико редова величине изнад гасне температуре. Преовлађујуће објашњење, колизиони модел, те атоме изводи из јона H^+, H_2^+ и H_3^+ убрзаних у катодном паду, из њихове измене наелектрисања с молекулима H_2 и из рефлексије од катоде уз неутрализацију; супротстављена тумачења траже узрок у процесима невезаним за поље. Рад себи поставља циљ да се „изврши експериментално испитивање и анализа добијених резултата у оквиру колизионог модела како би се модел верификовао“ (стр. 2), и то у четири врсте пражњења — Гримовом абнормалном пражњењу с измењивом катодом од бакра или графита, шупљој катоди, импулсном режиму Гримове цеви и диелектричном баријерном пражњењу у тињавом моду — уз сопствену Монте Карло симулацију транспорта протона у катодном паду.

Аутор је рукопис предао Физичком факултету 18. маја 2012, а Комисија за оцену одређена је 23. маја 2012; рукопис је, дакле, предат на оцену у мају 2012. Рад се овде мери искључиво према литератури, стандардима, прописима и знању који су тада постојали. Ништа што је настало касније није мерило: ни доцнији радови о брзим атомима водоника, ни каснија издања метролошких и библиографских упутстава, ни прописи о докторским студијама донети после тог тренутка. Где се поређење ослања на аритметику (облик дифузионе дужине, прерачун Доплеровог помераја у енергију), реч је о односима који се временом не мењају.

Текст рада узет је из примерка у Националном репозиторијуму дисертација; наводи из њега преузети су дословно, у писму у коме су написани, с бројем штампане стране у загради. Реферат Комисије није у репозиторијуму ни на сајту Факултета: сачуван је међу материјалима седнице Већа научних области природно-математичких наука Универзитета у Београду од 15. октобра 2012, заједно са захтевом Факултета за сагласност и одлуком Наставно-научног већа, и одатле се овде наводи.

Једна напомена о жанру одређује како треба читати замерке које следе. Ово је експериментална дисертација из спектроскопске дијагностике пражњења; аутор је, уз то, магистар који докторат брани по прописима који су важили пре Закона о високом образовању, у року који је Закон о изменама и допунама из 2010 (чл. 32) продужио до краја школске 2015/2016. Мерило је да ли дисертација као целина тачно преноси сопствене резултате, одмерава њихову поузданост и закључује онолико колико подаци носе.

II Шта рад доноси

Осврт почиње оним што дисертација јесте, јер је то највећи део онога што она вреди.

Прво, рад доноси сопствену методу мерења електричног поља у катодном паду. Кад је Hα профил аномално проширен, Штаркове компоненте се губе у широким крилима и метода растојања два максимума (peak to peak) не може да се примени; рад зато уводи фит у коме свака од шест π компоненти и компонента ван поља добијају по три Гаусова профила: „За случај аномално проширеног профила Hα линије, у оквиру овог рада је развијена сопствена фит процедура која узима у обзир сва три механизма ширења линије“ (стр. 50). Фит има девет параметара, од којих је пет физички ограничено, а рад показује колико избор модела мења резултат: „Искључивање field free компоненте из фита мења вредност израчунатог електричног поља за 5-10%“ (стр. 51). Метода има две независне контроле — поређење с ранијим мерењима на Hβ линији (стр. 53) и интеграл измереног поља према напону на електродама (стр. 55) — а у импулсном режиму, где је примењена на временски развој поља, интеграл расподеле у тренутку највеће струје практично се поклапа с напоном очитаним на осцилограму. Измерене расподеле поља и дужине катодног пада (табела 4.1) носе потом целу анализу по редукованом пољу и постају улаз у симулацију осмог поглавља. То је сопствени методски резултат, јасно одвојен од претходне методе и од Hβ фита других аутора.

Друго, оглед у Гримовом пражњењу замишљен је тако да раздваја утицаје: „Предност абнормалног пражњења коришћеног у овом експерименту је могућност независне промене притиска и напона у релативно широком опсегу вредности“ (стр. 58). Главни налаз четвртог поглавља — напон помера енергијску расподелу навише, а снижење притиска првенствено појачава крила — стоји на подацима и у тексту резултата изречен је тачно: „Ове промене профила указују да смањење притиска повећава број брзих атома водоника у ексцитованом стању са нешто вишом енергијом“ (стр. 61). У истом поглављу налази се и најдиректнији спектроскопски траг измене наелектрисања јона убрзаних у пољу: у расподелама из шупље катоде „може се уочити структура са три функције које одговарају трима групама

водничних јона“ (стр. 72), с границама у односу маса H^+, H_2^+ и H_3^+. Ту је и уверљив доказ да поље одређује појаву: у шупљој катоди аномално ширење се јавља тек кад се при снижавању притиска поље протегне дуж осе (стр. 63).

Треће, и најважније, пето поглавље доноси оглед чија је логика чиста. У истом пражњењу, при истом притиску од 1 mbar, истом напону од 2 kV и истој струји од 0,9 mA за обе катоде, само промена материјала катоде обрће однос крила: „плаво крило за графитну катоду је много мањег интезитета од црвеног крила“ (стр. 84), док бакар, као контрола, задржава јаче плаво крило. Рад из тога изводи закључак који колизиони модел предвиђа, а тумачења невезана за поље не: „Смањење плавог крила само са графитном катодом а не и са бакарном, може само бити последица смањење вероватноће за одбијање код графитне катоде“ (стр. 85). Налаз не почива на једном снимку — однос плавог и црвеног крила дат је систематски за оба материјала на четири притиска и више напона (сл. 5.10) — а рад изричито бележи и услове у којима се очекивани ефекат не види: „Очекивани ефекат за графит: мањи интензитет плавог крила у поређењу са црвеним, се не региструје при овим условима, слично као у ранијем експерименту [1]“ (стр. 84). Уз то стоје мерења са стране и аксијалне расподеле за два материјала, која мањи број одбијених атома код графита показују и просторно разложено.

Четврто, у импулсном пражњењу рад показује да највећи Доплеров померај и високоенергијски крај расподеле опадају заједно с напоном на електродама и у послесветљењу — „Занимљиво је да се и у послесветљењу и даље могу регистровати брзи атоми што је поново последица присуства напона тј. електричног поља између електрода“ (стр. 105) — и изводи намерно осмишљен контролни оглед: кад се уклони исправљачка диода и смер струје промени, „Балмер алфа линија снимљена током позитивног смера струје није аномално проширена“ (стр. 112), и то у оба правца посматрања. У баријерном пражњењу рад конструктивно решава посматрање дуж поља (мрежаста електрода прекривена стаклом) и не прећуткује резултат који на први поглед не иде у прилог моделу: „Овакав неочекиван резултат на први поглед није у складу са колизионим моделом за аномално ширење, међутим прорачун напона у гасу током времена детекције зрачења даје објашњење“ (стр. 121).

Пето, симулација је грађена корак по корак — најпре хомогено поље и поређење с Фелпсовим прорачуном, затим катодни пад с измереним пољем, па транспорт и ексцитација атома — а њено главно ограничење изречено је пре резултата: „Треба нагласити да симулација у катодном паду није самоусаглашена већ користи аксијалну расподелу електричног поља и дужину катодног пада које су експериментално утврђене“ (стр. 123). Поређење с мерењем изведено је на мереној величини, Доплеровом профилу у истој геометрији посматрања, и ограничено на део профила који модел покрива; неслагање није прећутано, него му је именован и сопствени узрок: „максималне енергије атома спектроскопски забележене у

експерименту ниже за око 20 %, што је делимично последица расејаног кретања атома, које смањује Доплеров померај, као и апроксимације равномерног формирања протона у катодном паду“ (стр. 133).

Најзад, рад на неколико кључних места сам омеђује домет сопствене методе — о трећој Гаусовој компоненти: „Треба нагласити да се Гаусов профил за најширу компоненту профила овде користи само условно, јер математички приближно описује облик далеких крила“ (стр. 41); о енергијама из плавог крила: „Треба нагласити да се из плавог крила не може јасно и једнозначно добити расподела атома који су се одбили од катоде“ (стр. 91); о дифузији у послесветљењу бележи неслагање с очекивањем уместо да га заобиђе (стр. 104). Где се тврдње рада могу упоредити с изворима, претежно држе: бројеви се из слика у текст преносе тачно, прерачуни Доплеровог помераја у енергију доследни су релацији самог рада, вредности редукованог поља могу се поновити из табеле 4.1, а пресеци из Фелпсових компилација верно су пренети. Литература прати област до самог рока (Фелпсов преглед из 2011, рад Лоуреира и Аморима из 2010, рад Спасојевића и сарадника објављен у марту 2012). Та поузданост фактографске основе није споредна: управо она омогућава да се о раду расправља овако детаљно.

III Циљ, хипотеза и метод

Циљ је у Уводу постављен као потврда модела, а не као његова провера: анализа се изводи „како би се модел верификовао“ (стр. 2), а Увод не наводи унапред које би опажање разликовало колизиони модел од конкурентских теорија. Тај критеријум — зависност профила од услова у пражњењу и материјала катоде и усмереност брзих атома — рад ипак има, али га изриче тек у прегледу литературе: код хидрино-теорије „не постоји јасно објашњење како се унутрашња потенцијална енергија одређених нивоа претвара у кинетичку енергију, нити зашто се у пражњењима јављају атоми који се крећу усмерено“, а „Зависност ширења линија од услова у пражњењу и материјала катоде се такође не може објаснити овом теоријом“ (стр. 36). Примењује га на стр. 72, 75 и 137. Формулација циља је, дакле, слабија од методе која је стварно спроведена; то је примедба на артикулацију, а не на садржину.

Осетљивије је како рад тај критеријум употребљава у закључивању. Закључак четвртог поглавља и општи Закључак као јасан доказ против резонантног трансфера наводе саму промену профила с условима: „Промена параметара пражњења доводи до промена у облику линија, промена у просторној расподели интензитета и енергијској расподели атома. Ово се може сматрати јасним доказом да су брзи атоми генерисани у процесима измене наелектрисања јона убрзаних у пољу, а не у резонантном процесу невезаном за поље“ (стр. 137). Промену профила с условима супарничка теорија, по изворима које рад цитира, сама по себи не искључује. Разлучујући налази у раду постоје и на стр. 36 су најављени као такви: усмереност

брзих атома дуж поља, структура расподеле по масама јона (стр. 72), обрт односа крила с графитом (стр. 84–85) и нестанак крила уз мали закочни напон (стр. 112). Закључак их, међутим, не повезује у аргумент, а не помиње ни да очекивано ширење у профилу са стране при обрнутом поларитету није забележено (о томе в. одељак VI). Тако повезани, налази рада чине супарничку теорију мало вероватном; не искључују је, нити искључују свако могуће алтернативно објашњење, а израз „јасним доказом“ у завршној реченици то не узима у обзир.

Из истог круга је и домет завршне оцене. Реченица „Резултати и анализе приказани у овом раду се могу сматрати верификацијом колизионог модела за брзе атоме у пражњењима“ (стр. 138) шира је од онога што је испитано и од Резимеа, који говори о тињавим пражњењима. Квантитативни налази рада потичу претежно из једног Гримовог пражњења с две катоде, у водонику и мешавини Ar/H2, уз демонстрационе огледе у шупљој катоди и баријерном пражњењу, а нумерички само за протоне у несамоусаглашеном пољу. Одмеренија је формулација самог Увода: „Модел за опис кинетике брзих атома је делимично верификован“ (стр. 1). Слично важи за опис сопствене методе: Увод каже да је поље мерено „уз помоћ методе поларизационе спектроскопије развијене у оквиру рада“ (стр. 2), а Закључак да метода почива „на основу Штарковог ширења аномално проширеног Hα профила“ (стр. 136). Метода почива на Штарковом цепању на π компоненте, а поларизациона спектроскопија Штарковог цепања у катодном паду постојала је и пре рада, што четврто поглавље уредно наводи; сопствени део методе је фит процедура за аномално проширени профил, како тачно стоји на стр. 50.

Најзначајнији методолошки недостатак тиче се исказивања несигурности. Несигурност поља у катодном паду дата је само као статистичка грешка фита, иако рад наводи системски утицај реда 5–10 % (стр. 51); осетљивост поља на ограничења ширина (±10 %) и релативних интензитета није испитана. Спектроскопски изведене величине — највеће и средње енергије, удели крила, однос плавог и црвеног крила, удели компоненте рефлектованих атома — дате су без мерне несигурности и без податка о броју понављања; несигурност постоји само за поље из фита, положај катоде и редуковано поље. Међународни водич за исказивање мерне несигурности (JCGM 100:2008) препоручује да се у извештају наведу све компоненте несигурности и потпуно опише како су процењене (т. 7.1.4 b: „list all uncertainty components and document fully how they were evaluated“), а за саму процену да се све релевантне величине мењају колико је то практично изводљиво (т. 3.4.2: „all relevant quantities should be varied to the fullest practicable extent“). У истом духу пишу и критеријуми критичких прегледа Штаркових ширина NIST-а: несигурности се тамо изражавају као „combined standard uncertainties“ (Konjević и др. 2002, стр. 823). Водич дисертацију формално не обавезује, а статистичка грешка фита јесте легитимна компонента несигурности — приговор је само да није једина. Смер главних ефеката (обрт крила с графитом, раст максималне енергије с напоном, јачање крила при

нижем притиску) далеко је изнад сваке разумне несигурности и није доведен у питање; без мере поузданости остају, међутим, закључци засновани на малим разликама и проценти искоришћења напона.

IV Извори пражњења, мерни систем и услови огледа

Опис апаратуре добар је тамо где је за резултате најважнији. Гримова цев описана је детаљно и сагласно (пречник катоде и аноде дају процеп од 0,2 mm, колико текст и наводи), прорез на аноди допушта посматрање „све до површине катоде“ (стр. 43), инструментални профил измерен је на слабој изолованој линији Ar I у истом извору и приказан (сл. 3.5), поларизатор испред прореза омогућава да се поље мери, а не претпоставља, зеолитни трап штити комору од ульних пара, а синхронизација у импулсном режиму и у баријерном пражњењу јасно је описана. Подаци о сонди за мерење напона (слабљење 1:1000, P6015A) дати су и искоришћени за процену временске константе кола. Рад, уз то, изричито одређује улогу помоћних извора: „шупља катода и тињави мод диелектричног пражњења искоришћени за демонстрацију и поређење феномена брзих атома из различитих извора“ (стр. 43).

Опис спектроскопског система је, међутим, непотпун у ономе што би требало за понављање огледа. Нису наведени модел и жижна даљина Ешеле спектрографа, ред дифракције, оптика за пројекцију, калибрација таласне дужине и спектралног одзива, ни поступак којим је процењена просторна резолуција од 0,123 mm; трајања експозиција дата су само за импулсни режим. Носећи параметри од којих зависи енергијска скала — инструментални профил 0,018 nm, дисперзија 0,0054 nm по пикселу, прорез 20 μm — јесу дати, па недостатак отежава понављање, а не доводи у питање резултате. Ни мера детектора — ICCD „димензија 2,53×2,53 cm са 1024×1024 пиксела типа PI-MAX2“ (стр. 47) — не одговара приручнику произвођача, који за тај формат даје чип од око 13×13 mm, док око 25 mm износи пречник већег појачавача слике (Princeton Instruments, PI-MAX/PI-MAX2 System Manual); енергијска скала од тога не зависи.

Неколико података недостаје на местима где би били потребни за тумачење. Рад не наводи чистоћу водоника и мешавине, врсту и чистоћу бакра и графита, ни поступак припреме површине катоде; како пето поглавље почива на разлици у рефлексији с две површине, тај податак би био потребан и за понављање и за тумачење поређења, иако уочену разлику између бакра и графита не доводи у питање. За шупљу катоду недостају дужина цилиндра и податак да ли је пречник од 10 mm унутрашњи, а за баријерно пражњење гасни процеп између диелектрика. Није речено где се мери напон једносмерног пражњења, нити вредност мерног отпорника и осетљивост калема Роговског; за импулсни режим шема 6.1 показује да се напон мери на електродама, иза баластног отпора, па се за једносмерни режим то мора разумети по

аналогији. Опис протока гаса („приближно 300 cm3/min“, стр. 46) не каже да ли је реч о протоку у стандардним условима, а опсези притиска у трећем поглављу ужи су од стварних услова, који су ипак дати уз сваку слику.

Два методска избора у условима огледа заслужују више пажње. Гасна температура није мерена у условима огледа: за све услове узето је 350 K из ранијих мерења. Рад то изричито каже и зависности изричито назива зависностима од E/p — „зависности показане на сликама 4.19, 4.20 и 4.21. су у ствари зависности од E/p“ (стр. 72) — али не процењује колико би загревање при снагама до око 16 W померило апсолутне вредности E/N, а гране грешака на тим сликама не обухватају ни несигурност температуре ни одступање интеграла поља од напона. Друго, процена да би за исту редуковану густину струје на два притиска напон требало кориговати за мање од 5 % (стр. 60) важи за пар профила на 2 kV, али не и за низ на 1 kV, где слика 4.7 даје корекцију од око 10 % (2 mbar) до око 30 % (1,4 mbar); поређење профила на 1 kV зато не раздваја утицај притиска тако чисто како текст тврди. У вези с тим је и то што критеријум по коме је активна површина катоде процењена из снимака са чела није описан, а вредностима у табели 4.1 није придружена несигурност; тачка за 2 mbar и 2 kV на слици 4.7 не слаже се с вредностима из табеле. Тврдња да напон катодног пада прати примењени напон почива, додуше, и на интегралу измереног поља.

Оглед у баријерном пражњењу није описан довољно за понављање: нису наведени размак између диелектрика, израз за напон у гасу и употребљене капацитивности, полупериода у којој су профили снимљени ни број акумулираних периода. Рад то поглавље представља као почетна испитивања, па квалитативни налаз стоји, али бројне вредности (еквивалентни напон, искоришћење) не могу се независно проверити.

V Спектроскопска мерења: поље у катодном паду, утицај услова и материјала катоде

Поље у катодном паду

Метода је, како је речено, најјачи методски део рада, а њена контрола је стварна. Ипак, контролу ваља прочитати онолико колико носи. Рад пише да интеграл измереног поља „одступа од примењеног напона за 10-15% што потврђује исправност методе“ (стр. 55). Мањак од 10–15 % истог је реда као разлика између модела којима се поље екстраполира испод границе осетљивости (на слици 4.3 за 1000 V: 880 и 960 V), а при нижим притисцима, зависно од екстраполације, достиже око 17 %; рад не раздваја да ли мањак потиче од границе осетљивости методе или од стварне расподеле потенцијала. Поређење зато подржава методу и сагласно је с

претпоставком да највећи део напона пада у катодни пад, али је у строгом смислу не потврђује, а проценти искоришћења расположиве енергије рачунати према примењеном напону носе несигурност тог реда.

Величина добијена из Пуасонове једначине на стр. 55 названа је „укупна концентрација наелектрисаних честица у катодном паду“; реч је о нетој густини просторног наелектрисања ($n_+ - n_e$), чији је ред величине тачан, али за коју није описано како је градијент поља одређен. Та разлика неће остати без последица у шестом поглављу. Нелинеарни облик поља означен на слици 4.3 као Davis-Rickards потиче од Рикардсовог уопштења, а изворни модел Дејвиса и Вандерслајса претпоставља линеарно опадање поља.

Утицај притиска и напона

Најупадљивија омашка целог рада налази се у сажетим закључцима четвртог поглавља и понавља се у општем Закључку. На стр. 75 стоји: „Повећање напона помера енергијску дистрибуцију ка вишим енергијама док повећање притиска повећава интензитет крила линије тј. повећава допринос ексцитације тешким честицама, и у мањој мери повећава енергију“, а на стр. 137 да „повећање притиска повећава интензитет крила линије“. Резултати поглавља показују супротно: по сликама 4.9, 4.14 и 4.20 и по тексту на стр. 61, 67 и 68 крила јачају, а удео ексцитације тешким честицама и, благо, највећа енергија расту са снижењем притиска — како исправно каже већ следећа реченица истог пасуса о нижим притисцима и вишим вредностима E/N. Реч је, дакле, о замени речи у формулацији, а не о погрешном мерењу; али један од два главна налаза поглавља у сажетку налаза и у Закључку стоји у обрнутом облику, а одатле је прешао и у реферат Комисије (в. одељак XI).

Закључак да је судар H + H_2 главни ексцитациони процес брзих атома рад изводи из поклапања наглог раста средње енергије и удела крила (сл. 4.19 и 4.20) с растом пресека у области 50–60 eV: „ова веза између два графика може сматрати доказом да је главни ексцитациони процес брзих атома судар атома водоника са молекулом водоника“ (стр. 74). Поклапање је, међутим, само приближно. Серије за различите притиске не падају на једну криву у E/N — тачке за 4 и 2 mbar при приближно истом редукованом пољу (око 5,7 kTd) разликују се и у средњој енергији и у уделу крила — па нагли раст одговара прелазу између серија за 4 и 2 mbar, а рад то не разматра. Поклапање је зато сагласно са закључком и представља посредну подршку, а не доказ; закључак почива пре свега на односу пресека из другог поглавља, а друге ексцитационе процесе рад у том делу не процењује квантитативно. У истом одељку једна бројка не одговара слици: средња енергија од 79 eV придружена је вредности од 37 kTd (стр. 73), док највиша тачка на слици 4.19 лежи на око 33 kTd; нагли раст средње енергије видљив је, уз то, већ између 3 и 5 kTd, а не око 7 kTd.

Максимални Доплеров померај, из кога рад рачуна искоришћење расположиве енергије (77 % на 1 kV, 53 % на 2 kV, преко 80 % у шупљој катоди), одређен је без наведеног критеријума и без несигурности. На логаритамским расподелама слике 4.17 исти услови сежу и до 25 % више од вредности у тексту. Апсолутни проценти искоришћења зато су оријентациони; закључак да максимална енергија расте с напоном, а искоришћење на вишем напону опада, остаје и кад се узму вредности са слике 4.17.

Однос плавог и црвеног крила (сл. 4.21) рад уводи као величину која „је пропорционална односу броја рефлектованих атома и атома упадних на катоду“ (стр. 74). То је прејако: на плаво крило утичу и јони неутралисани при одбијању, енергијска зависност ексцитације и рефлексије, угаона расподела одбијених атома и различите дужине пута ексцитације. Као релативна мера за поређење услова и материјала катоде однос је употребљив, што рад у истом пасусу и наговештава. Слично важи за апроксимацију занемарљивог угаоног расејања при претварању профила у расподеле (стр. 70): она је образложена понашањем јона и није повезана с литературом коју рад наводи неколико страна раније — „скорашња поређења експерименталних података са резултатима модела указују да постоји одређени степен дифузне угаоне расподеле код атома који се крећу ка катоди“ (стр. 65). Енергије са слике 4.17 су, како рад тачно каже, „детектоване“ енергије (стр. 70), па су средње детектоване енергије мање од средњих кинетичких за угаони фактор који рад не процењује.

Неколико појединости у просторно разложеним мерењима не слаже се с текстом. Профили са стране на слици 4.14 за 1,4 и 2 mbar при 1 kV снимљени су на z = 3,1 mm, што је по табели 4.1 крај катодног пада, а не негативно светљење, како текст наводи; квалитативни закључак остаје, али услов поређења није испуњен. Уске компоненте G1+G2 рад приписује искључиво електронској ексцитацији (стр. 68), иако према Фелпсовом прегледу из 2011, који рад цитира, у њима има и дисоцијативне ексцитације H_2 брзим тешким честицама (Phelps 2011). Максимум укупног интензитета у негативном светљењу који рад назива „други, нижи максимум“ (стр. 68) на сликама 4.16(a) и (b) заправо је плато; прави максимум има само компонента G1+G2. Положај максимума зрачења Ar I при 4 mbar и 600 V наведен је као око 1 mm (стр. 79), а на стр. 80 и на слици 4.26 као око 0,6 mm.

Одељак 4.3 о мешавини Ar/H_2 почива на визуелном поређењу профила: нису дати редуковано поље ни праг ексцитације у сударима брзих атома с аргоном, а шире језгро профила за 4 mbar и 600 V на слици 4.22 у тексту се не коментарише. Закључци одељка имају зато карактер квалитативне демонстрације. Тврдња да трансверзални аномално проширени профили у мешавини Ar/H_2 „до сада нису испитивани“ (стр. 78) важи само за Гримово пражњење с равном катодом: профили

у тој мешавини нормално на поље раније су снимани у радиофреквентном пражњењу (рад Филипса, на који се дисертација позива на стр. 76, погл. 4, [34]) и у шупљој катоди (радови Шишовића и сарадника, погл. 1, [53]).

Утицај материјала катоде

Главни налаз петог поглавља, изложен у одељку II, стоји; приговори се тичу његовог квантитативног тумачења и приказа.

На слици 5.10, на којој почива систематски део налаза, апсциса је погрешно означена као E/N (Td): положаји тачака одговарају напону на пражњењу у волтима. Квалитативни налаз — однос плавог и црвеног крила мањи од јединице за графитну катоду на 2 mbar и нижим притисцима — тиме није доведен у питање, али се тачке не могу непосредно поредити са сликама 4.21 и 5.9.

Губитак енергије при рефлексији рад образлаже самим енергијским рефлексионим коефицијентом: „RE(C)= 0,03 , док је RE(Cu)= 0,12“ (стр. 93). Губитак по одбијеном атому мери, међутим, однос RE/RN — средњи удео енергије који одбијени атом задржи (Ito и др. 1985) — а не RE, који у себи садржи и мањи број одбијених атома. По прорачунима Екштајна тај удео на 1 keV износи око 0,32 за угљеник и 0,49 за бакар (Eckstein 2002); смер закључка је, дакле, исправан, али однос RE (фактор четири) углавном одражава разлику у броју одбијених атома, а удео енергије који одбијени атом задржи разликује се само око један и по пут (губитак по атому, 0,68 према 0,51, око 1,3 пута). Једна реченица о енергијској зависности је нетачна: да се „вероватноћа за рефлексију као и губитак енергије одбијених атома смањује са повећањем енергије“ (стр. 94). Први део је тачан, други обрнут: удео енергије који одбијени атом задржи опада с упадном енергијом, за угљеник од око 0,43 на 100 eV до 0,32 на 1 keV (Eckstein 2002), па релативни губитак расте; иста зависност види се и на слици 2.6 самог рада. Тумачење зависности ефекта од притиска почива на опадању бројчаног рефлексионог коефицијента, што је тачно, па закључак остаје. Бројчани коефицијенти за графит очитани су, уз то, ниско — 0,14 на 390 eV и 0,07 на 1300 eV (стр. 86) — док слика 2.6 даје око 0,19 и 0,09; пад за фактор око два, на коме аргумент почива, остаје исти.

Зашто се слабије плаво крило с графитом јавља тек на ниском притиску и високом напону, рад објашњава квалитативно. Однос бројчаних коефицијената бакра и графита расте са енергијом приближно од 2 на 3 између 0,4 и 1,3 keV, што сам по себи не објашњава пад односа крила с око 1,1 на око 0,5, а бројна процена улоге сударних процеса у гасу при вишем притиску није дата. Сличну ограду тражи и тврдња да се и за графит види „нагли пораст на истој вредности редукованог поља“ (стр. 93) као за бакар: скок за графит смешта се у интервал од око 4,5 до 7,7 kTd, који

обухвата положај скока за бакар, па је тврдња сагласна с подацима, али није одређена; код оба материјала скок се поклапа с преласком с 4 на 2 mbar, па се утицај E/N не може одвојити од утицаја притиска.

Мерење са стране на z = 2 mm при 1 mbar лежи у катодном паду (дужине 4,0 mm), где компонента G3 обухвата и атоме усмерене ка катоди, па легенда „рефлектовани атоми“ на слици 5.5 (стр. 88) није прецизна. Пошто су при 1 mbar и 2 kV напон и струја за оба материјала исти, разлика у уделу G3 (око 75 % за бакар према око 45–50 % за графит) највероватније потиче углавном од различите рефлексије, али није чиста мера рефлектованих атома; важи као релативно поређење два материјала. На сличан начин, профил са слике 5.4(b) (1 mbar, 2 kV, z = 4 mm) снимљен је на граници катодног пада, а не јасно „у области негативног светљења“ (стр. 87), како текст каже. Утицај оптичке рефлексије с катоде на однос крила рад одбацује квалитативно, уз литературу, али без бројне процене (стр. 83–84); апсолутне вредности односа крила, нарочито за бакар, носе зато непроцењену систематску несигурност, док се налаз да је с графитом плаво крило слабије од црвеног оптичком рефлексијом не може објаснити. Тврдња да „угаона расподела одбијених атома практично не зависи од материјала катоде“ (стр. 91), на којој почива поређење детектованих енергија за два материјала, изречена је као утврђена чињеница, а требало је да буде изречена као приближење (косинусна расподела при нормалном упаду, коју рад наводи на стр. 32).

Нумерички тест програмом SRIM рад тачно назива „једноставна нумеричка илустрација“ (стр. 94) и јасно каже шта би било потребно да постане квантитативан (стр. 96). Опис је ипак непотпун (број симулираних јона, задавање фрагментације H_2^+ и H_3^+, прерачун пресека у вероватноћу ексцитације), а упадна енергија од 1300 eV, узета из највећег измереног помераја, за атоме одбијене од бакра пре је доња граница него процена; тврдња да се највећи симулирани помераји слажу с измереним (стр. 96) зато није поткрепљена сликама 5.3(c) и 5.11, на којима је измерено плаво крило за бакар шире од симулираног. Тест показује смер ефекта материјала катоде, а не бројно слагање.

Одељак о мешавини Ar/H2 у петом поглављу своди се на један пар профила (0,5 mbar, 2 kV, при различитим струјама) без бројне оцене; рад каже да ефекат није „тако евидентан као у случају чистог водоника“ (стр. 89), па одељак има карактер прелиминарног запажања. Тврдња на стр. 87 да утицај материјала катоде на профиле са стране и просторну расподелу интензитета „није раније испитиван“ требало је да буде ограничена на Гримово пражњење с равном катодом и посматрање нормално на поље: рад на стр. 116 и сам наводи рад Шишовића и сарадника из 2007 о проширеним профилима у шупљој катоди посматраној дуж осе, а у петом поглављу га не помиње. Најзад, на два места рад туђе налазе преноси строже од извора: објашњење зависности крила од материјала катоде из ранијег

рада групе, у извору изнето као пробно и везано и за распрашивање материјала катоде, на стр. 19 пренето је без те ограде, а на стр. 81 уз то као утврђено и сведено на рефлексионе коефицијенте; а налаз да магнетним пољем појачана електронска ексцитација појачава уско језгро профила пренет је као искључив, иако је у извору претежан (стр. 84). Закључак, уз то, обе врсте мерења везује за ниски притисак и висок напон (стр. 137), а по петом поглављу то важи за промену асиметрије профила са чела; са стране је нижи интензитет крила с графитом забележен и на 4 mbar.

VI Импулсно и баријерно пражњење

Импулсно пражњење

Налази о брзим атомима у импулсном режиму — крила се јављају истовремено с линијом у оквиру временске резолуције, највећи померај опада с напоном, брзи атоми постоје и у раном послесветљењу, при промени смера струје крила нестају — стоје. Рад, уз то, временску границу метода исказује бројем: „потребна су мерења са резолуцијом мањом од 50 ns“ (стр. 102). Приговори у овом поглављу тичу се споредне анализе неутрализације и прецизности неких формулација.

Најозбиљнији је бројчани. Табела 6.1 пореди измерена времена пада интензитета с очекиваним временом дифузног губитка $\tau = \Lambda^2/D_a$ и наводи „Λ=0,046 cm – за цилиндар (R=4 mm, l=15 mm)“ (стр. 104). Та вредност не следи из наведене геометрије. За цилиндар полупречника R и дужине L дифузиона дужина износи $1/\Lambda^2 = (\pi/L)^2 + (2{,}405/R)^2$ (Phelps 1990б, једн. 6), што за R = 0,4 cm и L = 1,5 cm даје $\Lambda \approx 0{,}157$ cm; вредност 0,046 cm добија се ако се уместо 15 mm узме 1,5 mm, па је вероватно реч о омашци у јединици. Рачун у табели доследно следи из погрешне вредности, а грешка прелази у целу колону очекиваних времена: с Λ која одговара наведеној геометрији очекивана амбиполарна дифузна времена износе око 114, 53 и 40 μs на 4,3, 2 и 1,5 mbar, а не 9,77, 4,54 и 3,41 μs. Тиме отпада тврдња да се време пада на 4 mbar „слаже са очекиваним, што указује на могућност да је преовлађујући процес неутрализације дифузија“ (стр. 104): с исправном вредношћу интензитет на свим притисцима опада знатно брже него што дозвољава амбиполарна дифузија. Закључак да пад на нижим притисцима не одређује дифузија остаје ипак одржив на основу другог аргумента рада — смањења нагиба са снижавањем притиска (сл. 6.6). Налази о брзим атомима од табеле 6.1 не зависе.

Уз то иду две мање ограде исте анализе. Густина електрона од око $4\cdot10^{10}$ cm^{-3} употребљена за процену времена дисоцијативне рекомбинације (стр. 102) потиче из нето густине наелектрисања у катодном паду (стр. 55), а не из мерења у негативном светљењу или послесветљењу. Уз $n_e \sim 10^{11}$ cm^{-3}, колико рад узима за степен јонизације у опису колизионог модела (стр. 37), то време износи око 100 μs. Поређење рекомбинационих и дифузионих губитака зато је само грубо, јер за

густине од 10^{11}–10^{12} cm^{-3} рекомбинација у раном послесветљењу не би била занемарљива; оно не допушта оштар закључак да рекомбинација долази до изражаја тек на скали од 1 ms. Друго, пад интензитета централног дела профила као мера концентрације електрона почива на претпоставци сталног ексцитационог коефицијента, за коју рад каже да на 2 и 1,5 mbar не важи; централни део профила садржи, уз то, и дисоцијативну ексцитацију. Закључак о механизму неутрализације треба зато схватити као хипотезу, а не као резултат.

Неке формулације о односу брзих атома и напона шире су од података. Реченица „Дакле, може се рећи да облик крила линије прати напон измерен на електродама“ (стр. 105), поновљена у Закључку, важи квалитативно и првенствено на 4,3 mbar; на 2 mbar облик крила, средња енергија и удео крила готово се не мењају док напон опада неколико пута, што рад бележи на стр. 106–107. Тврдња да „енергија атома опада сразмерно напону“ (стр. 106) није подржана сликом 6.9: на 2 mbar средња енергија остаје приближно стална (око 66–68 eV) док напон на електродама пада више од три пута. Напон прате највећи Доплеров померај и високоенергијски крај расподеле (сл. 6.7 и 6.8), па закључак да расподеле брзих атома прате напон важи за тај део расподеле. Искоришћење „мање од 50 %“ (стр. 106) важи око максимума напона; у каснијем делу импулса највећа енергија достиже 55–75 % тренутног напона. Временски разложене величине приказане су без мерне несигурности и без броја понављања: велики трендови јасно су изнад расипања тачака, али мање разлике, попут промене удела крила између 0,37 и 0,43 на 4,3 mbar, не могу се поуздано тумачити. Израз „позном послесветљењу“ у Закључку (стр. 138) двозначан је, јер рад њиме означава и снимке од неколико десетина микросекунди (стр. 100; уп. временску скалу на сл. 6.5, стр. 101) и скалу реда 1 ms (стр. 103); брзи атоми забележени су у раном делу послесветљења, док је на електродама још био напон.

Контролни оглед с променом поларитета јесте, како је речено, један од најчистијих у раду. Али исход није у свему онакав какав рад из модела предвиђа. Рад унапред каже: „Промена смера поља би требала да изазове значајно ширење у профилу снимљеном са стране“ (стр. 112), а то ширење није опажено ни са стране, што рад наводи и објашњава накнадном хипотезом о нехомогености пражњења (стр. 116). Очекивање значајног ширења било је, додуше, прејако с обзиром на низак напон (око 270 V), који рад наводи — могло се очекивати тек слабо ширење, какво рад налази у стационарном режиму при 320 V. Налаз је, дакле, сагласан с колизионим моделом у томе што при ниском напону нема брзих атома; разлику према једносмерном огледу на 320 V, у коме се слабо ширење види, рад објашњава само хипотезом о нехомогености пражњења (стр. 116), без бројне провере. Поглавље исход исказује тачно — концентрација брзих атома „је испод границе детекције методе“ (стр. 112) — а Закључак јаче: „забележено је потпуно одсуство брзих атома при секундарном пробоју“ (стр. 138). На стр. 108 закључак да Доплеров померај у трансверзалним профилима из негативног светљења потиче од атома одбијених од

катоде образложен је симетријом профила, која из геометрије посматрања следи за сваку популацију; закључак је исправан, али из разлога који рад наводи у другом поглављу — у негативном светљењу Доплеров померај дају само атоми настали рефлексијом (стр. 41).

Ситније бројчане неусклађености у поглављу не мењају налазе: исти притисак означава се као 4 и као 4,3 mbar, тренутак максималне позитивне струје као 28 μs (сл. 6.16) и као 30 μs (сл. 6.18), слагање импулсне и једносмерне струјно-напонске карактеристике (стр. 98) важи само при већим струјама, а време за 1,5 mbar у табели 6.1 не може се проверити, јер тај притисак није приказан ни на слици 6.5 ни на слици 6.6.

Баријерно пражњење

Седмо поглавље рад назива почетним испитивањима, и тако га треба читати. Квалитативни налаз — аномално ширење постоји на 1,3 mbar, а изостаје на 12 и 20 mbar — подржан је подацима. Праг од око 2 mbar испод кога се ширење јавља (стр. 120) није, међутим, документован приказаним подацима: слика 7.2 обухвата само 1,3, 12 и 20 mbar.

Искоришћење „око 60%“ (стр. 120) пореди највећу енергију атома (280 eV) са струјом пондерисаним средњим напоном у гасу (498 V), што даје тачније око 56 %; према највишем напону у гасу током струјног импулса (око 880 V) оно износи око трећине. Бројна вредност зато зависи од избора референтног напона и није истоврсна са искоришћењем из једносмерног режима, где је мерило примењени напон, па је поређење с једносмерним пражњењем бројчано одрживо само уз ту ограду. Сам израз за еквивалентни напон (једн. 7.1) почива на претпоставци, „која је раније показана за случај импулсних пражњења“ (стр. 120), да интензитет линије приближно линеарно прати струју; претпоставка је разумна и сагласна с налазом на стр. 102, али извор за њу није наведен.

Објашњење непромењеног профила при промени амплитуде (стр. 121–122) добро је изведено, али један исказ у њему треба ублажити: пробојни напон у гасу при амплитудама од 1100 и 700 V није практично исти, како текст каже — по слици 7.3 врхови напона у гасу износе око 880 и 760 V. За исход поређења меродаван је струјом пондерисани напон (498 и 487 V), који се разликује за око 2,2 %, а не 2,5 % како стоји у тексту, па закључак о истоветним профилима стоји. Закључак рада, међутим, из тог налаза изводи више него што поглавље тврди: „Установљено је да се аномално проширени профили могу детектовати само на јако ниском притиску, а да је за облик профила одлучујући гасни напон остварен током мерења“ (стр. 138). Гасни напон ни у једном мерењу није битно промењен, а поглавље тај закључак

изводи по аналогији с једносмерним пражњењем и само га назива почетним и указујућим; налаз је сагласан с моделом, али није његова независна провера. На слици 7.3 десна оса носи ознаку I (mA), а вредности су очигледно у амперима.

VII Симулација и поређење с експериментом

Монте Карло део рада добро је замишљен: техника нултог судара исправно је изведена и приписана изворном раду Скулеруда, који рад цитира (погл. 8, [8]), пресеци су узети из Фелпсових препоручених скупова, угаоно расејање из мерених и теоријских диференцијалних пресека, а изостављање молекулских јона и брзих молекула образложено је. Приговори се тичу три ствари: уводног теста у хомогеном пољу, недовољно описаних претпоставки и домета поређења с мерењем.

Уводни тест у хомогеном пољу исказан је повољније него што га слика носи. Рад каже: „Слагање са резултатима Фелпса, добијеним путем beam [10] технике је боље (~10%), што је приказано на слици“ (стр. 128). По самој слици 8.1 одступање износи око 10 % само на 200 Td, а на 100–150 Td и на око 280 Td 30–40 %. Упоредне тачке су, уз то, из Фелпсовог модела енергијског биланса, што рад не наводи. Исто важи за праг бежања протона: „Фелпс је забележио runaway ефекат већ на 300 Td“ (стр. 128). Вредност од 300 Td постоји код Фелпса само у моделу енергијског биланса; препоручени модел биланса импулса, по Фелпсовом сажетку — „Drift velocity calculations predict runaway“ — даје бежање протона у H_2 тек при E/n већем од 700 Td (Phelps 1990a). Рад наводи прву вредност без те ограде и као запажање, иако је реч о прорачуну. Поређење с експериментом у катодном паду (сл. 8.12) тиме није доведено у питање, али уводни тест је слабији него што га текст представља. Експерименталне брзине дрифта с којима се симулација такође пореди („значајно веће од експериментално добијених“, стр. 128) нису ни приказане ни цитиране. Расподела у хомогеном пољу од 500 Td описана је, најзад, као блиска равнотежној (стр. 131), иако рад каже да се изнад 300 Td равнотежа с пољем не успоставља; тачније би било рећи да је квазистационарна.

Неколико претпоставки симулације није испитано ни описано. За све сударе осим молекулских ексцитација симулација користи угаону расподелу измерену на 500 eV, проверену теоријским пресеком на 150 eV, у целом опсегу од неколико eV до око 1,6 keV; пресек је мерен на угловима испод једног степена, а није описано како је продужен на веће углове ни како су за протон сабрани канали расејања. Почетни положаји протона узети су хомогено дуж катодног пада — „Као реална апроксимација“ (стр. 130) — иако пресек за настанак брзог H^+ из H_3^+ над прагом расте неколико пута у опсегу енергија катодног пада, а флукс H_3^+ се дуж пада мења. Рад ту апроксимацију на стр. 133 наводи као могући узрок неслагања с мерењем, али осетљивост досега највећих енергија ни на њу ни на угаону расподелу није проверио. Није наведено ни да ли је измерена расподела поља нормирана на примењени

напон, иако интеграл поља од напона одступа 10–15 %; расположива енергија у односу на коју се наводе вредности од око 90 и 80 % по слици 8.9 одговара примењеном напону. Рад не каже изричито ни да симулација катодног пада не обухвата рефлексију атома с катоде и директну побуду n = 3 у сударима H^+ с H_2; за црвено крило, с којим се симулација пореди, рефлексија није битна, али ограничење је требало изрећи. Поглавље не наводи метод и корак нумеричке интеграције, критеријум за избор највеће сударне фреквенције, ширину бинова ни статистичку несигурност резултата добијених с $2{\cdot}10^5$ протона, па се бројчани налази (око 90 и 80 % расположиве енергије, „10 % више атома“ на 2 mbar, стр. 132) износе без мере несигурности.

Поређење с мерењем тиче се само репа црвеног крила, и то рад у Закључку и каже: „Симулација даје за резултат и црвено крило проширене линије које је у релативно добром слагању са репом спектралне расподеле експерименталног профила“ (стр. 138). Три појединости ипак ограничавају домет. Прво, није наведено како је симулирани профил на слици 8.12 нормиран према експерименталном; досег репа од тога не зависи, али слагање интензитета у далеком крилу без тог податка не може се сматрати независном потврдом. Друго, оцена да су измерене највеће енергије ниже од симулираних „за око 20 %“ (стр. 133) одговара слици 4.17 при 4 mbar и 1 kV; при 2 mbar и 2 kV разлика износи око 25–30 %, а пошто праг којим се највећа енергија очитава није дефинисан, а на слици 8.12 експериментално и симулирано црвено крило гасе се на приближно истом померају, величина неслагања зависи од изабраног критеријума. Рад то неслагање делом приписује угаоном расејању атома — оном истом које је у четвртом поглављу, при претварању профила у расподеле, проглашено занемарљивим (стр. 65, 70); та два исказа нису усклађена ни квантитативно процењена, па је вероватнији главни узрок друга наведена апроксимација, равномерно формирање протона. Треће, исказ „Облик расподеле и место максимума одговарају експерименталним резултатима“ (стр. 133) важи само квалитативно: обе расподеле имају изражен максимум у близини катоде, али положај (око 0,05–0,1 mm у симулацији, око 0,5 mm у мерењу) и облик се не поклапају, што је и очекивано, јер симулација прати само атоме настале из протона, а мерени интензитет садржи и рефлектоване атоме и електронску ексцитацију; за 2 mbar и 2 kV измерена аксијална расподела није ни дата.

Из поређења на слици 8.12 следи, најзад, да атоми настали из протона објашњавају далеки реп црвеног крила, а не већи део његовог интензитета. Закључак по коме „највећи део интензитета крила“ (стр. 134) потиче од јона H_3^+ и H_2^+ изведен је по искључењу, у оквиру колизионог модела, јер молекулски јони и брзи H_2 у симулацији нису праћени; у складу је са структуром расподела из шупље катоде (сл. 4.18), али је симулација сама не доказује. Закључак рада о симулацији не преноси ни податак да су највеће симулиране енергије око 20 % изнад измерених.

VIII Приказ литературе, атомских података и технике

Уводна поглавља рада јесу систематичан и употребљив преглед. Сударни процеси за H^+, H_2^+, H_3^+, H_2 и H с H_2 приказани су с Фелпсовим пресецима, чије порекло рад тачно описује, и тиме дају потпуну основу за симулацију; главни извор несигурности симулација именован је изричито: „Посебан проблем представља недовољно познавање диференцијалних пресека за појединачне процесе јона и атома па се они морају претпоставити“ (стр. 20). Колизиони модел разложен је на проверљиве кораке, а шема на слици 2.9 сваки корак везује за одређено крило профила. Историја модела у главним цртама је уравнотежена и признаје туђе првенство, а конкурентским објашњењима супротстављени су физички аргументи, не само декларације. Приказ рефлексије (дефиниције бројчаног и енергијског коефицијента, енергијска и угаона расподела, молекулски јони, имплантирани водоник) усмерен је управо на оно што се касније користи. Замерке у овом делу, изузев једне, не додирују резултате.

Та једна тиче се приказа конкурентске теорије. Реакцију преноса протона $H_2^+ + H_2 \rightarrow H_3^+ + H$ рад двапут назива ендотермном: „Ендотермна реакција 2.11 је веома ефикасна тј. има велику брзину реакције на ниским енергијама“ (стр. 24), и при приказу рада Лоуреира и Аморима, који „тврде да се проширене линије могу добити из ендотермне реакције протон трансфера (2.11)“ (стр. 36). Реакција је егзотермна: за основна вибрациона стања „the reaction (211) is exothermic by 1.73 eV“ (Janev и др. 2003, стр. 89), а Лоуреиро и Аморим изричито рачунају профиле које ствара „the exothermic reaction“ $H_2^+ + H_2 \rightarrow H_3^+ + H + \Delta E$ (Loureiro и Amorim 2010). Управо ослобођена енергија даје продуктима енергије реда eV на које се ти аутори позивају, а управо зато је реакција брза на ниским енергијама — ендотермна реакција не би била ни једно ни друго. Механизам конкурентске теорије тиме је пренет нетачно. Главни аргумент рада против ње — да измерене енергије досежу стотине eV — од те речи не зависи и стоји. Слабија је, међутим, помоћна тврдња да би профили из те реакције били „на граници детекције за већину спектралних уређаја“ (стр. 36): она није поткрепљена рачуном и за спектрограф самог рада не важи, јер атому од 1 eV одговара померај од око 0,03 nm, изнад инструменталних 0,018 nm. Хидрино-теорија одбачена је, уз то, без позива на објављену критику.

Остале замерке овог дела тичу се прецизности приказа и наводе се сажето. Образац за редуковану Томас-Фермијеву енергију на стр. 31 погрешно је пренет из извора — у бројиоцу треба маса мете M_2 уместо M_1, збир (Z_1^2/3 + Z_2^2/3) треба да буде под квадратним кореном, а константа 32,5 важи за енергију у keV (Ito и др. 1985) — али га рад не користи за рачун, јер коефицијенте чита са слике 2.6. Рефлексиони коефицијенти које пето поглавље чита са слике 2.6 за енергије испод око 1 keV (C) и 5 keV (Cu) потичу из семиемпиријских формула, изван опсега мерења за те мете, што рад не наглашава; квалитативни однос C < Cu тиме није доведен у питање.

Претпоставка да се брзи неутрални атоми рефлектују с истим коефицијентима као протони (стр. 33) изречена је без извора. Тврдња да испод 1 keV практично сва Hα емисија у сударима H + H_2 потиче од ексцитације пројектила (стр. 27) приписана је мерењима која почињу тек на 1,5 keV, па је реч о продужетку измереног тренда. Неколико вредности из компилација пренето је заокружено или приписано погрешном процесу (удео од око 7 % продуката електронске јонизације приписан је на стр. 37 јону H_3^+ уместо H^+, супротно исправном навођењу на стр. 23; граница „већим од 7 eV“ за измену наелектрисања $H^+ + H_2$ на стр. 24 не следи из Фелпсових пресека), али симулација користи пресеке непосредно, па то на резултате не утиче.

Уводни опис пражњења и ширења линија има и неколико уџбеничких непрецизности без последица по резултате (нпр. праг од 10^{15} cm^{-3} изнад кога Штарково ширење Hα постаје значајно у односу на Доплерово, стр. 15, превисок је за приближно пола реда величине). Временска одредница „пре нешто више од две деценије“ (стр. 1 и 16, и у Резимеу) не одговара изворима самог рада, по којима су прва запажања из 1984–1985, близу три деценије пре предаје; две деценије одговарају почетку систематског тумачења појаве.

У приказу историје и примена појаве неколико тврдњи је јаче од извора. Да су Барбо и Жоли (1990) први објаснили појаву убрзањем јона у катодном паду и изменом наелектрисања с H_2 (стр. 17) важи само уже — за једносмерно тињаво пражњење, уз изричито именовану измену наелектрисања — јер су Капели и сарадници (1985), које рад наводи, већ као изворе брзих атома навели убрзање јона у омотачу, сударе у гасу и неутрализацију уз рефлексију на електроди. Слично, рад Петровића, Јеленковића и Фелпса (1992) може се назвати првим потпуним објашњењем с јасно раздвојеним механизмима, а не „први квантитативни модел“ (стр. 35). Навод да се аномално ширење у фузионој плазми јавља у близини зида токамака (стр. 17, 36) непрецизан је, јер се један од два наведена рада односи на стеларатор; наводи о „дупли слојеви“ у атмосферама спољашњих планета и о „галактичким небулама“ (стр. 36) немају ослонац у наведеним радовима, који се баве аурором и јоносфером Јупитера, па је и реченица Закључка да су у астрофизичким плазмама „слични ефекти већ забележени“ (стр. 138) шира од онога што ти извори кажу. Рад Милса и сарадника наведен је на стр. 17 као пример забележених врућих атома у микроталасној плазми, иако тај рад тврди управо аномално ширење које радови наведени у истој реченици не потврђују; рад ту тврдњу критички разматра тек у другом поглављу.

Разлагање трансверзалних профила на три Гаусове компоненте, на коме почивају мерења са стране у поглављима 4–6, образложено је, најзад, емпиријски. Рад наводи „веома мали резидуум фита“ (стр. 42) и сагласност са сопственом симулацијом на једном примеру (сл. 2.12), али слика 2.11 приказује фит на линеарној скали, без криве резидуума и без бројне мере квалитета, па се одступања у далеким крилима не

могу проценити; осетљивост површине и ширине компонената на претпостављени Гаусов облик није испитана. Рад, као што је речено, сам изриче да Гаусов облик широке компоненте нема физичко оправдање (стр. 41–42), па је примедба о документовању, а не о прећуткивању.

IX Једначине, слике, табеле и језик

Једначине на којима почива мерење тачне су по садржају, а грешке су у слогу. Једначина 4.2 погрешно је сложена: у аргументу друге суме изостављена је константа $2{,}765\cdot10^{-3}$ nm/(kV/cm) из једначине 4.1, а коефицијент 2 ln 2 у експоненту не одговара ни пуној ни половини ширине на половини висине Гаусовог профила; вредности ширина у фитовима показују да су у рачуну стварно употребљене пуне ширине. Константа у једначини 4.1 за око 0,3 % је већа, а константа Доплерове релације на стр. 59 (1084,33 eV/nm², без навода масе и таласне дужине) за око 0,5 % мања од вредности које следе из масе атома водоника и таласне дужине Hα; енергије из профила зато су систематски ниже за толико, што је далеко испод осталих несигурности. На стр. 49 цепање нивоа n у линеарном Штарковом ефекту погрешно је везано за магнетни квантни број m, иако помак одређује разлика параболичних квантних бројева, како исправно показује слика 4.1. Израз 8.1 уведен је као вероватноћа да се судар догоди после времена t, а реч је о густини вероватноће тренутка првог судара, како га рад у наредном пасусу и користи. У другом поглављу поједини бројеви реакција употребљени су двапут.

Слике су главни носилац резултата рада и по правилу носе услове у натпису; одступања су ипак бројна. Упутства два часописа из физике на које се овде позива, која дисертацију формално не обавезују, али показују шта ти часописи очекују од табеле и слике, за табеле предвиђају једноставна заглавља колона с јединицама („simple column headings giving all units“, J. Appl. Phys., Information for Contributors, 2012), а водич Physical Review тражи да свака оса буде означена величином и јединицом („with the quantity being plotted, including the appropriate units“, Waldron и др. 2011, стр. 11). Том захтеву не одговарају апсциса слике 5.10 (в. одељак V), јединица редуковане густине струје на слици 4.7 (mA cm^{-1} $mbar^{-2}$ уместо mA cm^{-2} $mbar^{-2}$), заглавље Da (cm2) у табели 6.1 (стр. 104) уместо cm^2 s^{-1}, погрешне ознаке јединица (μS уместо μs, U (v)) и скале боја без ознаке величине у шестом и седмом поглављу и слике осмог поглавља без ширине бина и нормирања оса. Натписи неколико слика не слажу се са садржајем, седам унутрашњих упућивања је погрешно, а наслов седмог поглавља у садржају разликује се од наслова у тексту; ништа од тога не утиче на резултате.

Децимални знак у раду је зарез, што је за ћирилични текст исправно: препоруке Међународне уније за чисту и примењену физику зарез наводе као децимални знак у већини европских језика (Cohen и Giacomo 1987, т. 1.3.1: „including Russian and

other languages using the Cyrillic alphabet“). Приговор је само о недоследности: у више поглавља зарез у тексту и тачка на осама истих слика се мешају.

Терминологија није доследна. Поступак раздвајања профила једном је назван деконволуцијом — „развијена техника за деконволуцију и фитовање профила“ (стр. 40) — иако инструментални профил остаје у најужој компоненти; упоредо се јављају аномално и ексцесивно ширење, end on и end-on, фрагментација и фрагментизација. За Гримово пражњење рад каже да је коришћено „у моду са константном струјом“ (стр. 44), иако је напајано напонски стабилисаним извором, а исти уређај назива се и спектрографом и монохроматором (стр. 47). На стр. 68 „на крају негативног светљења“ стоји где слика показује почетак раста компоненте на крају катодног пада. Језичке и словне омашке, најгушће у петом и осмом поглављу, не мењају значење, али указују на недовољну лектуру.

X Научни апарат

Научни апарат је у основи уредан, а његове слабости су претежно омашке у библиографским подацима. Рад цитира бројем у угластој загради, с посебним пописом за свако поглавље; сви бројеви у тексту постоје у одговарајућем попису, нумерација пописа је непрекинута, а јединице су по правилу ређане по реду првог позивања (одступања постоје у другом и петом поглављу, в. ниже), што упутство Универзитета у Београду из 2012 изричито допушта. Радови на којима рад гради преглед области — Бенеш и Ли, Капели и сарадници, Барбо и Жоли, Петровић, Јеленковић и Фелпс, Кураица и Коњевић, Грим, Скулеруд — цитирани су непосредно, а не преко других; за сваку компилацију сударних и рефлексионих података наведени су аутор, година и свеска, за SRIM и верзија, а слике које преносе пресеке увек означавају извор. Референце без наслова радова нису мана: то је основни облик који за своје часописе, међу њима и J. Appl. Phys., даје сам издавач, по коме се за чланак наводе свеска, прва страна и година („give the volume number, the first page number, and the year of publication“, AIP Style Manual 1990, одељак II.C.10).

Једна примедба има писано мерило. Упутство Универзитета у Београду о садржају дисертације, објављено пре предаје, каже: „У попису литературе не сме бити радова који нису цитирани, ни оних на које се у раду не упућује“ (УБ 2012, т. 2, Литература). Четири јединице се у тексту свог поглавља не цитирају — [16] у другом и [8], [11] и [13] у петом поглављу — а у петом поглављу за [8] и [13] то је последица помереног бројања: три позива воде на погрешну јединицу (за рефлексионе коефицијенте на стр. 86 [5] уместо [6], за дрифтну цев на стр. 89 [9] уместо [8], за SRIM на стр. 94 [12] уместо [13]). У другом поглављу јединица [15] први пут се позива тек на стр. 34, после [34]. На стр. 19 рад Гемишић-Адамов и сарадника цитиран је под [21], а у

попису је под [27]. Реченица о Фелпсовом multi-beam моделу на стр. 130 нема броја референце, а тај рад није у попису осмог поглавља, иако је наведен у другом и четвртом.

Остало су библиографске омашке: у пописима има двоструких јединица и погрешних или непотпуних библиографских података (свеске, почетне стране, имена аутора и часописа), које не спречавају да се дело нађе — где је запис на једном месту погрешан, на другом је по правилу тачан.

XI Однос рада и реферата комисије

Реферат Комисије оцењује да рад „чини значајан допринос научној области Физике јонизованих гасова и плазме“. Та оцена одговара стању у тексту у ономе што рад најуверљивије доноси: сопствена фит процедура за мерење поља у аномално проширеном профилу, оглед с независном променом притиска и напона, обрт односа крила с графитном катодом при контролисаним условима и симулација повезана с измереним пољем. Реферат је тачно разумео и где је тежиште рада: трансформацију профила с графитном катодом назива „евидентним експерименталним доказом о улози коју игра површина катоде у формирању брзих атома“. Оцена да су резултати огледа „верификовали примену колизионог модела и потврдили његову примену на тињава пражњења“ дели, међутим, ширину завршне реченице Закључка (в. одељак III). Реферат не наводи ниједну замерку. Правилник о већима научних области Универзитета, по коме је Веће дало сагласност, налаже Већу да оцени да ли је дисертација урађена у складу с темом на коју је Универзитет дао сагласност и „да ли наводи садржани у реферату потврђују да су се стекли услови за одбрану докторске дисертације“ (Правилник о већима научних области, чл. 23); Веће, дакле, суди на основу реферата, и утолико је важније да он тачно преноси налазе.

У неколико тачака реферат не одговара стању у тексту, и све оне потичу из тога што преузима сажете формулације Закључка уместо резултата. Најважнија је обрнути смер утицаја притиска (в. одељак V): реферат, као и Закључак, наводи да „повећање притиска повећава интензитет крила линије тј. фаворизује продукцију и ексцитацију брзих атома водоника“. Методу мерења поља реферат описује као развијену „на основу Штарковог ширења унутар аномално проширеног Hα профила“, а она почива на Штарковом цепању (в. одељак III). За импулсно пражњење реферат преузима „потпуно одсуство брзих атома при напону супротног знака“, а поглавље каже да је њихова концентрација испод границе детекције; за баријерно пражњење преузима „Установљено је“, а поглавље налаз назива почетним. Све то су преузете реченице Закључка, не нове тврдње реферата; у тим тачкама реферат следи сажетак рада, а не резултате поглавља.

Реферат наводи и да „Списак коришћене литературе садржи 123 референце“, што не одговара ниједној очигледној мери литературе у раду — 214 нумерисаних јединица у осам пописа, односно око 146–148 различитих дела — а критеријум бројања није наведен. Закључак рада о симулацији одмеренији је од реферата: ограничава слагање на реп крила, док реферат каже да је „за случај протона нумерички демонстрирана валидност колизионог модела у делу формирања атома у катодном паду“.

Формални услов за одбрану испуњен је и по Статуту ФФ из 2006 (чл. 75: најмање два рада у међународним часописима с рецензијама) и по строжем мерилу на које се реферат позива — закључку Сената Универзитета од 24. новембра 2010. и Правилнику о докторским студијама и одбрани докторске дисертације Физичког факултета од 11. јуна 2008, „којим су потребна најмање 2 рада у водећим међународним часописима“; реферат наводи три таква рада.

XII Шта остаје

Дисертација Николе Цветановића солидан је и самостално изведен експериментални рад, који физици водоничних пражњења доноси три ствари трајне вредности. Прва је метода мерења електричног поља у катодном паду из Штарковог цепања унутар аномално проширеног Hα профила, с независним контролама и с изричито исказаном осетљивошћу на избор модела фита; њоме измерено поље постало је основа и за анализу по редукованом пољу и за симулацију. Друга је оглед с графитном катодом, у коме само промена материјала катоде при истим условима обрће однос крила (одељак II) — најнепосреднији експериментални аргумент за улогу рефлексије с катоде који рад има. Трећа је скуп контролних огледа у импулсном режиму и у баријерном пражњењу, међу којима се издваја нестанак крила при промени смера струје. Уз то стоје Монте Карло симулација транспорта протона усидрена у измерено поље и уводни прегледи који чине употребљиву основу за даљи рад. Фактографска основа, тамо где се могла упоредити с изворима, у највећем делу држи.

Слабости су четири врсте, и ниједна не руши експерименталне налазе. Прва је закључивање: Закључак доказ против супарничке теорије тражи у зависности профила од услова, уместо у разлучујућим налазима које рад има, завршну оцену шири изван испитаног, а улогу притиска износи у обрнутом облику. Друга је мерна несигурност: осим поља из фита, спектроскопски изведене величине немају ни несигурност ни податак о броју понављања. Трећа је квантитативно тумачење на неколико места где рад каже више од података — у тумачењу односа крила и рефлексије, у табели 6.1, у уводном тесту и претпоставкама симулације. Четврта је апарат и приказ туђих налаза, који су на неколико места пренети нетачно или строже од извора. Над свима њима стоји једна правилност: рад је пажљивији док

мери него док сажима. Резултати су у поглављима по правилу изложени тачно и с оградама; грешке се јављају у закључцима одељака, у Закључку и у сажетим бројевима, а одатле прелазе у реферат. Највећи део онога што треба поправити већ је негде у раду тачно написано — само на погрешном месту.

Пет измена било би најплодније у евентуалном монографском издању или у наставку истраживања. Прво, исправити смер утицаја притиска и аргумент против супарничке теорије изградити на разлучујућим налазима рада. Друго, за спектроскопски изведене величине увести мерну несигурност и број понављања, дефинисати критеријум највеће енергије и проценити системске утицаје. Треће, исправити табелу 6.1 и из ње изведену тврдњу о дифузији, реченицу о енергијској зависности губитка при рефлексији, приказ реакције преноса протона и апсцису слике 5.10. Четврто, у симулацији исказати статистичку несигурност, описати нормирање на слици 8.12 и испитати осетљивост на почетну расподелу протона и на угаону расподелу, а у наставку истраживања, како рад и сам најављује, укључити молекулске јоне. Пето, уједначити пописе литературе и исправити погрешна упућивања.

Уз ту врсту редакције — која највећим делом не тражи ново мерење, него доследно спровођење онога што је рад већ започео — ова дисертација остаје вредан и употребљив рад у спектроскопској дијагностици водоничних пражњења, чија метода мерења поља и оглед с материјалом катоде имају шта да кажу и читаоцу изван уже теме брзих атома.

Литература

Предмет осврта

Цветановић, Никола Н., *Настанак и транспорт брзих атома водоника у тињавим пражњењима* [докторска дисертација]. Физички факултет Универзитета у Београду, Београд, 2012. НаРДуС, https://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/3190.

Кураица, М. М.; Коњевић, Н.; Шашић, О.; Обрадовић, Б., Реферат Комисије за извештај о докторском раду мр Николе Цветановића, Физички факултет Универзитета у Београду, 28. 6. 2012 (материјал 12. седнице Већа научних области природно-математичких наука Универзитета у Београду, 15. 10. 2012).

Физички факултет Универзитета у Београду, Захтев за давање сагласности на извештај о урађеној докторској дисертацији, бр. 533/9, 13. 9. 2012; Веће научних области природно-математичких наука Универзитета у Београду, Одлука 02 бр. 06-20781/15-12, 15. 10. 2012 (исти материјал).

Атомски, сударни и површински подаци

Phelps, A. V., *Cross Sections and Swarm Coefficients for H^+, H_2^+, H_3^+, H, H_2, and H^- in H_2 for Energies from 0.1 eV to 10 keV*, J. Phys. Chem. Ref. Data 19, 653–675 (1990a). DOI: 10.1063/1.555858.

Phelps, A. V., *The Diffusion of Charged Particles in Collisional Plasmas: Free and Ambipolar Diffusion at Low and Moderate Pressures*, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 95, 407–431 (1990б). DOI: 10.6028/jres.095.035.

Phelps, A. V., *Collisional kinetics of non-uniform electric field, low-pressure, direct-current discharges in H_2*, Plasma Sources Sci. Technol. 20, 043001 (2011). DOI: 10.1088/0963-0252/20/4/043001.

Janev, R. K.; Reiter, D.; Samm, U., *Collision Processes in Low-Temperature Hydrogen Plasmas*, Bericht Jül-4105, Forschungszentrum Jülich, 2003.

Loureiro, J.; Amorim, J., *Possibility of nonexistence of hot and superhot hydrogen atoms in electrical discharges*, Phys. Rev. E 82, 035401(R) (2010). DOI: 10.1103/PhysRevE.82.035401.

Ito, R.; Tabata, T.; Itoh, N.; Morita, K.; Kato, T.; Tawara, H., *Data on the Backscattering Coefficients of Light Ions from Solids (a Revision)*, IPPJ-AM-41, Institute of Plasma Physics, Nagoya University, 1985.

Eckstein, W., *Calculated Sputtering, Reflection and Range Values*, IPP-Report 9/132, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, 2002.

Мерна опрема

Princeton Instruments, *PI-MAX/PI-MAX2 System Manual*, Version 5.F, Roper Scientific, 2003–2009, Appendix A (Specifications).

Мерна несигурност, јединице и ознаке

JCGM 100:2008, *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM 1995 with minor corrections), 1. изд., Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.

Konjević, N.; Lesage, A.; Fuhr, J. R.; Wiese, W. L., *Experimental Stark widths and shifts for spectral lines of neutral and ionized atoms (A critical review of selected data for the period 1989 through 2000)*, J. Phys. Chem. Ref. Data 31, 819–927 (2002). DOI: 10.1063/1.1486456.

Cohen, E. R.; Giacomo, P., *Symbols, Units, Nomenclature and Fundamental Constants in Physics*, 1987 Revision, Document I.U.P.A.P.-25 (SUNAMCO 87-1), IUPAP, 1987.

Waldron, A.; Judd, P.; Miller, V., *Physical Review Style and Notation Guide*, American Physical Society, ревизија јун 2011.

Journal of Applied Physics, *Information for Contributors* (упутство на сајту часописа, стање 13. 5. 2012, снимак Internet Archive-a).

Научни апарат

American Institute of Physics, *AIP Style Manual*, 4. изд., AIP, New York, 1990.

Универзитет у Београду, *Докторска дисертација мора да садржи* (упутство на сајту Универзитета, стање 11. 5. 2012, снимак Internet Archive-a).

Прописи и акти (у тексту објављеном пре рока)

Закон о изменама и допунама Закона о високом образовању, „Службени гласник РС“, бр. 44/2010 (чл. 32).

Правилник о већима научних области на Универзитету у Београду, „Гласник Универзитета у Београду“, бр. 134/2007, с изменама бр. 150/2009, 158/2011, 164/2011 и 165/2011 (чл. 23).

Статут Физичког факултета Универзитета у Београду, бр. 442/1 од 10. 10. 2006, с изменама од 27. 6. 2008, 20. 11. 2008 и 19. 3. 2009 (чл. 75); текст објављен на страници Факултета „Прописи“ крајем 2011.