

комбинације и нашла сва решења. Он би применом суперпозиције и коришћењем рачуна вероватноће дао једну најповољнију комбинацију [9]. Наравно, ово су све примери савремених истраживања заснованих на квантној механици.

ЗАКЉУЧАК

Нобеловац William D. Phillips наглашава да су доприноси прве квантне револуције реализовани и поред “Нерешавања следећих најнеобичнијих појмова квантне физике: кохерентна суперпозиција према којој се неки објект може истовремено наћи на два места; и квантног спрезања (испреплетаности) према коме је судбина неког квантног објекта потпуно неизвесна и нераздвојно повезана са судбином неког другог аналогног објекта иако не постоји нека могућност њиховог међусобног деловања“ [11]. Њихово решавање доприноси развоју технологија будућности које се заснивају на другој квантној технолошкој револуцији! Развој фундаменталних научних и технолошких остварења се данас најчешће одвија истовремено: квантним инжењерством 2.0 се систематским и итеративним процесима, користећи научна открића друге квантне револуције, дизајнирају објекти и системи с циљем да се реше неки проблеми; квантном технологијом људи стварају системе, процесе и артефакте да би реализовали неке своје потребе и жеље.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Aspect, Trois test experimentaux des inegalites de Bell par mesure correlation de polarization de photons, *These, Centre de Orsay, 1983*
2. С. Јокић, Анализа интерференционог експеримента с појединачним фотонима, *Sveske fizičkih nauka, SFIN, god.VI, broj 1, str. 135-148, Institut za teorijsku fiziku, Beograd 1993*
3. С. Јокић, Неки епистемолошки проблеми квантне механике, *Дијалектика, број 3-4, стр. 81-93, Београд, 1988.*
4. С. Јокић, Професори физике могу ученицима да објасне основне принципе друге квантне револуције, стр.73-79, Зборник радова 7. Међународне конференције о настави физике у средњим школама, Алексинац, 15-17. март 2019. УРЛ: <https://drive.google.com/file/d/1wK9QTKT8jtjFGax1JgSt3G7211UNVF5/view> (31.11.2022)
5. Љ. и С. Јокић, Квантна криптографија УРЛ: <https://www.youtube.com/watch?v=jVKbw2w4LtQ> (31.11.2022)
6. Љ. и С. Јокић, Класична криптографија УРЛ: <https://www.youtube.com/watch?v=AIB2gZQ6-JA> (31.11.2022)
7. Julien Bobroff, Bienvenue dans la nouvelle revolution quantique (Ordinateur, cryptographie, Internet, spatila, etc.: pourquoi le XXI^e siècle sera quantique., Flammarion, 2022.
8. Ibid. p.231-232.
9. Ibid. p. 134-137
10. Љ и С. Јокић, Игра трговачки путник алгоритам, информатицко мисљење, хеуристика, оптимизација УРЛ: <https://youtu.be/6mk4eknq3ey> (31.11.2022)
11. W.D. Phillips, Mécanicien quantque, *Le plus grand des hasards- Surprises quantque, EditionBelin, 2010, str 46-48, (preveo na francuski A. Aspect)*

Елементарно предавање о плазми

Милан С. Ковачевић, Љубица Кузмановић

Природно-математички факултет, Универзитет у Крагујевцу

Апстракт. Уобичајена агрегатна стања у којима сусрећемо материју у природи су кристал, течност и гас. Познате су многе законитости и карактеристике њихове структуре, унутрашње уређености, као и услови под којима долази до прелаза из једног агрегатног стања у друго. Тако, ако гасу доводимо енергију, његова температура расте и када енергија честица достигне ред величине 10 eV јавља се стање гасна плазма. У земаљским условима плазма представља ретку форму стања материје. Насупрот томе, у васиони плазма је доминатно стање, делом као стеларна плазма, делом као интерстеларни гас. У овом раду је најпре дат преглед основних појмова физике гасне плазме, електричног пробоја гаса, и набројане су методе теоријског изучавања динамике плазме. Поред тога, набројане су неке примене гасне плазме. Акцент је на значају плазме за нуклеарну фузију. На крају, у раду је описан један демонстрациони експеримент са плазма куглом, који би могао бити добар избор када се предаје о плазми у четвртном разреду гимназија.

Кључне речи: плазма, јонизовани гас, температура

АГРЕГАТНО СТАЊЕ ПЛАЗМЕ

Уобичајна агрегатна стања у којима сусрећемо материју у природи су кристал, течност и гас. Откривене су многе законитости и карактеристике њихове структуре, као и услови под којима долази до прелаза из једног агрегатног стања у друго. Свако од ових стања се карактерише одређеним степеном унутрашње уређености, што намеће ограничења у погледу енергије коју честице могу имати у посматраном систему [1,2].

За кристалну структуру карактеристична је мала енергија по једној честици, та енергија је реда величине 10^{-2} eV. Када је течност у питању, честице (молекули или атоми) имају енергију реда величине 10^{-1} eV. Гас је најнеуређеније агрегатно стање које се сусреће свакодневно у земаљским условима. Средња енергија по честици је реда величине до 1 eV. Ако гасу доводимо и даље енергију, његова температура расте и када енергија честица достигне ред величине 10 eV јавља се ново агрегатно стање *гасна плазма*. Плазма је квазинеутрални гас, систем који се састоји делом од наелектрисаних, делом од неутралних честица чије је физичко понашање одређено колективном интеракцијом која је заснована на Кулоновим силама [1, 2]. Термин „плазма“, највероватније, први је употребио Лангмир (I. Langmuir 1881 – 1957) 1929. године да би њиме описао стање гаса у позитивном стубу електричног пражњења у гасу на сниженом притиску.

Концепт температуре

Према молекуларно – кинетичкој теорији, средња енергија молекула гаса је $E_s = (3/2)kT$, где је k Болцманова константа, а T његова температура у Келвинима (К). Можемо рећи да је средња кинетичка енергија по честици реда величине kT . Узимајући вредност за Болцманову константу $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$, енергији реда величине од $kT = 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ одговара температура

$$T = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}} = 11600 \text{ K}$$

Према томе, за 2eV плазму значи да је средња енергија по честици $kT=2\text{eV}$ тј. температура плазме 23200 К.

Неке карактеристике гасне плазме

Неке карактеристике гасне плазме су унапред очевидне ако имамо на уму коликој температури одговара средња енергија по честици од око 10eV. Последица ове вредности средње енергије по честици је повећање средње брзине кретања честица услед чега се оне сударају са све већим енергијама. За разлику од обичног гаса, у гасној плазми се поред еластичних судара почињу јављати и нееластични судари међу којима најважније место заузима *јонизација* атома гаса. За процес јонизације гаса потребно је да енергија бар једног од два атома који се сударају буде већа од *енергије јонизације*. За већину атома ова енергија износи око 10eV што одговара средњој енергији термалног кретања атома гаса при температури око 11600К. Према томе, најупадљивија карактеристика гасне плазме је налажење једног дела њених честица у јонизованом стању. Степен јонизације дефинишемо као однос између броја јонизованих атома по јединици запремине и броја првобитно присутних неутралних атома у истој тој јединици запремине.

Осим термалне јонизације, наелектрисане честице у плазми, могу настати и у другим процесима: јонизација зрачењем (фотојонизација), јонизација наелектрисаним енергетским честицама, стварањем наелектрисаних честица на електродама, захват електрона и измена наелектрисања. Осим јонизације јављају се и процеси екситације приликом судара са другим атомом, у судару са електроном и приликом фотоекситације. Инверзни процеси екситације су процеси деекситације. Деекситација се најчешће одвија путем радијативних прелаза.

Упоредо са јонизацијом јавља се и инверзан процес рекомбинације. Процеси рекомбинације се одвијају у супротном смеру од процеса јонизације. То је нееластични судар електрона и позитивног јона чији је исход формирање неутралног атома или молекула. Процеси нестајања наелектрисаних честица у плазми су такође и радијативна рекомбинација, рекомбинација при судару три честице, дифузија и нестајање честица на електродама. Након релативно кратког времена успоставља се стационарно стање динамичке равнотеже где је у сваком елементу запремине у јединици времена број актова јонизације једнак броју актова рекомбинације.

Јонизовано стање честица у комбинацији са хаотичним кретањем има за последицу да је у плазми, за разлику од неутралног гаса, присутно знатно електромагнетно поље које брзо флукутира у времену и јако се мења од тачке до

тачке, које Лоренцовом силом утиче на кретање наелектрисаних честица плазме. Дакле, посредством електромагнетног поља које потиче од свих честица плазме заједно, свака појединачна честица истовремено интерагује са свим осталим честицама. Овакав тип интеракције је познат као *колективна интеракција*.

Последица постојања колективних интеракција у плазми је тенденција плазме ка електричној неутралности, односно стању у коме је запреминска густина наелектрисања једнака нули. Ова тенденција се испољава када посматрамо довољно велику запремну плазме и довољно дугачак интервал времена. Стога се ова тенденција назива *макроскопска квазинеутралност*. Локално настајање вишка позитивних или негативних наелектрисања, услед термалног кретања у плазми, је праћено појавом интензивног електричног поља које се супроставља сваком кретању које би даље раздвајало наелектрисања, и такво понашање има за последицу тежњу плазме ка макроскопској квазинеутралности. На месту локалног нарушавања електронеутралности плазме, услед термалног кретања честица, јавиће се плазмене осцилације као последица прерасподеле наелектрисања услед дејства електричног поља које настане услед издвајања наелектрисања. Још једна последица колективних интеракција је појава електросатичког екранирања на малим растојањима.

Поред колективне интеракције, у плазми имамо и парне интеракције за које је карактеристично да поједина честица у датом тренутку интерагује са једном честицом из плазме. У највећем броју случајева ово има за последицу скретања обе честице са првобитног правца кретања (расејање).

Параметри плазме

Плазму дефинишемо као систем састављен од наелектрисаних (или делом неутралних и делом наелектрисаних, јонизованих) честица, под условом да физичким понашањем тог система доминира колективна интеракција која је условљена електромагнетним пољем које потиче од присутних наелектрисаних честица [1,2]. Са макроскопског гледишта, плазма је електрично неутрална, али садржи слободне носиоце наелектрисања тако да је електрично проводна.

Поједине врсте честица које улазе у састав плазме зову се компоненте. Са квантитативне стране, састав плазме се карактерише концентрацијама и температурама њених компоненти. Даље, треба увести и средње растојање између две честице исте врсте, и средње растојање између две честице било које врсте.

Средње растојање између било које две честице плазме је $d = n^{-1/3} = \left(\sum_a n_a \right)^{-1/3}$ где

је „укупан број честица по јединици запремине (сумирање се врши по свим врстама честица). У погледу температуре, уколико су све температуре једнаке и ако не постоје никакви градијенти температура и концентрација кажемо да је плазма у термодинамичкој равнотежи. Уколико су све температуре компоненти једнаке кажемо да је плазма изотермна, у супротном је плазма неизотермна. У зависности од реда величине температуре плазме у литератури се прави разлика између нискотемпературне и високотемпературне плазме.

Дебајев радијус плазме

Посматрајмо плазму која има n електрона, елементарног наелектрисања e , и исто толико позитивних јона по јединици запремине. Претпоставимо да је ова плазма изотермна и да је њена температура T , тако да је средња енергија термалног кретања реда величине kT по честици. Максималан радијус сфере r_D из које би могли изаћи сви електрони захваљујући термалном кретању, можемо наћи из услова $e\varphi(r_D) = kT$. Из датог услова добија се карактеристична дужина, позната под називом *Дебајев радијус* (P. Debye) [1,2] (у литератури се користи и ознака λ_D):

$$r_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{e^2 n}} \quad (1)$$

Дакле, Дебајев радијус даје ред величине оне сфере (Дебајеве сфере) из које би услед термалног кретања могле изаћи све честице једног знака наелектрисања при датој концентрацији n и датој температури T .

Електронска плазмена фреквенција

На месту локалног нарушавања електронеутралности плазме развијају се типичне електростатичке осцилације. У овом случају осцилује густина просторног наелектрисања и електрично поље које је одређено овом густином. У плазми се ове осцилације називају *електронске плазмене осцилације*. Фреквенција ових осцилација се назива *електронска плазмена фреквенција* и рачуна се по формули [1,2]:

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}} \quad (2)$$

Електростатичко екранирање у плазми

Једна од манифестација колективне интеракције у плазми је и појава *електростатичког екранирања* на малим растојањима реда величине Дебајевог радијуса (слика 1). Ова појава се састоји у томе да потенцијал електростатичког поља у близини неког јона врсте α , када се он налази у плазми, нема облик Кулоновог потенцијала, већ (Дебај-Хикел-ов или екранирани потенцијал, Debye-Huckel) [1,2]:

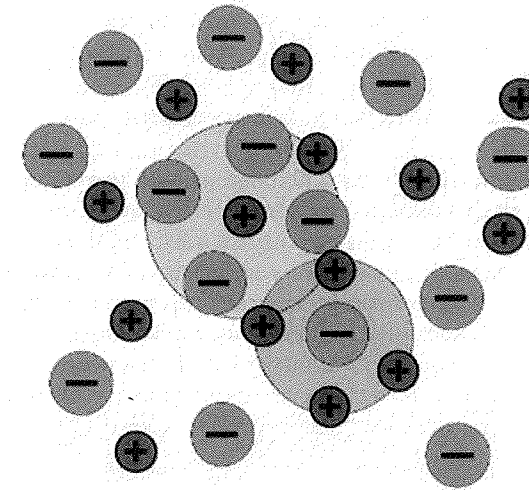
$$\varphi_{\alpha}^{DH}(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e_{\alpha}}{r} \exp\left(-\frac{r}{r_D}\right) \quad (3)$$

Критеријуми плазменог стања

Да би тенденција ка макроскопској електронеутралности дошла до изражаја, димензије области које заузима плазма морају бити знатно веће од димензије сфере одређене Дебајевим радијусом за ту плазму. Према томе, први критеријум плазменог стања можемо записати:

$$r_D \ll D \quad \text{или} \quad r_D^3 \ll V \quad (4)$$

где је D карактеристична дужина области коју заузима плазма, а V је њена запремина. У Дебајевој сфери практично у свим случајевима се налази велики број честица, тако да се горњи критеријум може изразити и као захтев да „Дебајева сфера“ буде бесконачно мала запремина плазме. Број честица у „Дебајевој сфери“ је $N_D = n(4/3)\pi r_D^3$. Услов (4) се своди на $N_D \gg 1$.



Слика 1. Електростатичко екранирање

Тенденција ка макроскопској квазиуеутралности доводи до плазмених осцилација. Да би се оне развиле на месту нарушења, случајног одступања од нулте густине просторног наелектрисања, потребно је да утицај колизионих процеса буде мали. Судари доводе до амортизовања осцилаторног кретања. Генерално, судари спутавају било какво уређено кретање. Утицај судара на плазмене осцилације биће мали, колективни ефекти ће бити доминантни, ако је за сваку врсту наелектрисаних честица испуњен услов:

$$\omega_{p\alpha} \gg \nu_{\alpha} \quad (5)$$

где је $\omega_{p\alpha}$ плазмена фреквенција (фреквенција плазмених осцилација) за честице врсте α , а ν_{α} тотална колизиона фреквенција честица те врсте. Ако параметри једног система наелектрисаних честица (или делом наелектрисаних и делом неутралних) задовољавају неједнакости (4) и (5), тај систем можемо звати плазма.

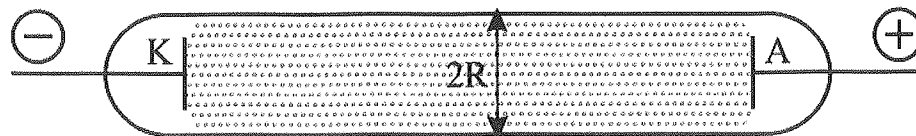
Налажење плазме у природи

У земаљским условима плазма представља ретку форму стања материје. Неки од примера плазменог стања су муња, поларна светлост и јоносфера. Насупрот томе, у васиони плазма је доминантно стање. Процена је да се преко 90% целокупне материје васионе налази у плазменом стању, делом као стеларна плазма, делом као интерстеларни гас. Интерстеларни гас се одликује веома малом густином, док се стеларна плазма одликује великом густином, постигнутом дејством снажних

гравитационих поља и високом температуром. Захваљујући таквим условима потпуно „ољушћена“ језгра, лишена електронског омотача, поседују довољну енергију за савладавање Кулонове баријере и могу ступити у термонуклеарне реакције фузије. У горњим слојевима атмосфере Земље налазимо на слој под називом јоносфера, која настаје фотојонизацијом разређених гасова горњих слојева атмосфере ултраљубичастим зрачењем Сунца. Јоносфера се састоји од неколико Хевисајдових слојева који имају различит састав и различит степен јонизације. На знатно већој удаљености од Земље, налазе се Ван Алениви радијациони појасеви Земље, састављени од наелектрисаних честица космичког порекла заробљених нехомогеним магнетним пољем Земље.

Плазма у лабораторији

У лабораторији, најчешћи начин добијања плазме је коришћењем електричних пражњења у гасовима са константним или променљивим електричним пољем. У овим пражњењима извршен процес атома гаса (или молекула) налази се у јонизованом стању, а радна супстанца се у извесним областима пражњења налази у стању плазме. На слици 2 је приказана типична цев гасног пражњења. Две металне електроде, спојене на DC напајање, уграђене су у стаклену епрувету. Епрувета (цев) је таква да се може празнити и пунити различитим гасовима на различитим притисцима. Зависне, односно, независне променљиве у експерименту са гасним пражњењем су напони између електрода и струје у колу [3, 4].



Слика 2. Типична цев гасног пражњења [3]

Како ће се процес развијати зависи од више фактора: напона између електрода U , дијаметра цеви d , притиска у цеви p , врсте гаса, врсте електрода итд. Када се на електроде прикључи мали напон, неколико десетина волти (приближно) не долази до видљивих ефеката, иако осетљиви инструменти могу да бележе изузетно ниске вредности струје (реда величине од $10^{-5}A$). Ако се напон повећава, онда ће се и струја, при некој вредности напона, нагло повећати и, на одређеној вредности напона U_s , уочава се емисија светлости. Ово су манифестације пробоја, једног од најважнијих процеса електричног пражњења у гасовима. Експерименти показују да се за сваки конкретан случај може наћи извршен *напон паљења* U_s . На притиску од $p \sim 1 \text{ mbar}$ и међуелектродном размаку од $d \sim 1 \text{ cm}$, пробојни напон је неколико стотина волти. За сваки гас или смешу гасова, при датом дијаметру цеви, постоји нека вредност производа pd на којој је напон паљења минималан. Више детаља о врстама пражњења и њиховим карактеристикама налазимо у [3, 4].

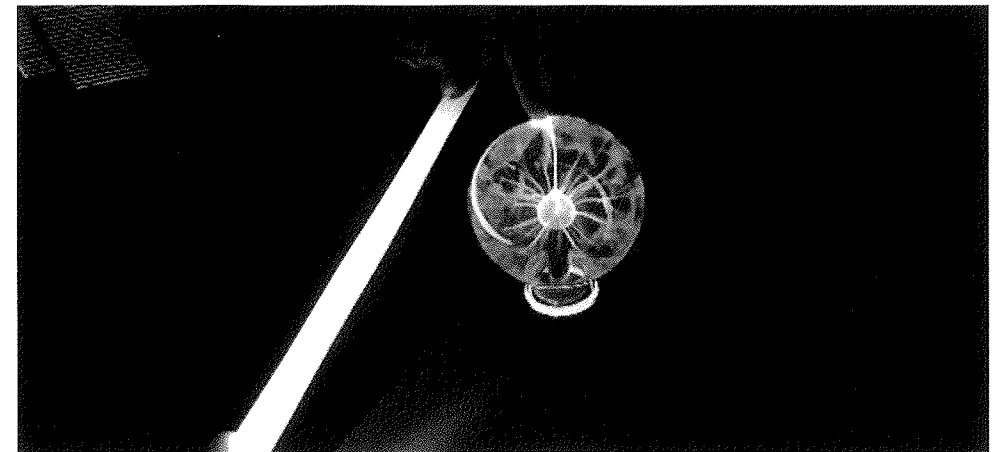
Неке примене гасне плазме

Примене плазме подразумевају широк интервал вредности параметра n и величине kT_e : параметар n варира од 10^6 до 10^{34} m^{-3} , док величина kT_e се креће у

интервалу од 0,1 до 10^6 eV . Најчешће комерцијалне примене плазме обухватају: процесирање површина, третман отпадних гасова и вода, хемијска синтеза, разни светлосни извори, плазма дисплеји, ласери, анализа метала, контролисана термонуклеарна фузија, енергетски конвертори, имплантација јона, и др. Многи сматрају да модерна физика плазме почиње отприлике 1952, са идејом да се искористи контролисана фузиона реакција за потребе фузионог реактора.

Демонстрациони експеримент са плазма куглом

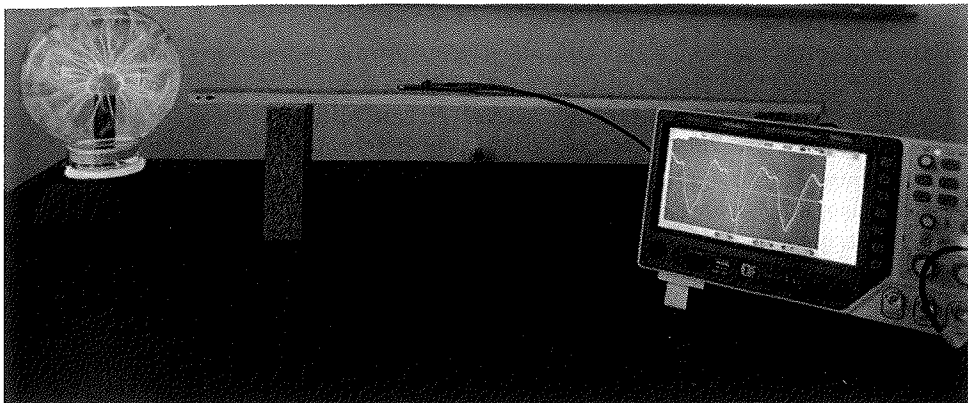
Експеримент са плазма куглом је пре свега намењен за демонстрацију плазме када се говори овом агрегатном стању у четвртом разреду средње школе. Такође, помоћу плазме кугле може се демонстрирати осбина електричног поља да опада са квадратом удаљености од кугле. Кугла је обично од стакла унутар којег се налази најчешће гас неон на ниском притиску кроз који пролази високофреквентна наизменична струја око 35 kHz, што одговара напону од 2 до 5 kV. Висок напон се производи помоћу Теслиног калема који се налази унутар кугле. Струја која тече кроз плазму ствара електромагнетно поље које стакло као изолатор не спречава да се шири у простору око кугле. Стакло игра улогу изолатора код електричног кондензатора који се ствара између гаса и наше руке када руком додирујемо куглу. На слици 3 је приказана кугла коришћена у нашој лабораторији.



Слика 3. Плазма кугла пречника 125 mm у нашој лабораторији

Због јонизације гаса који окружује централну электроду (Теслин калем) ствара се стање плазме око саме електроде. Ово се примећује као плаво љубичаста боја која излази из високо напонске електроде. Настали искре са централне електроде се простиру кроз гас у балону у облику интензивних светлих кривудастих трака (филаменти) и крећу се према горе, према површини кугле. За мерење електричног поља плазма кугле користили смо осцилоскоп (слика 3). Квалитативно електрично поље се описује помоћу јачине електричног поља. За наелектрисану сферу важи да електрично поље у простору око сфере се мења са растојањем R по формули $E=kQ/R^2$ где је Q укупно наелектрисање сфере. Електрично поље плазма кугле специфично је јер је последица наизменичног напона високе фреквенције. При томе

формирају се електромагнетни таласи, а настало електрично поље је осцилирајуће. Такво поље такође зависи од квадрата удаљености од центра кугле по закону $E \propto 1/R^2$.



Слика 4. Мерење електричног поља плазма кугле помоћу осцилоскопа

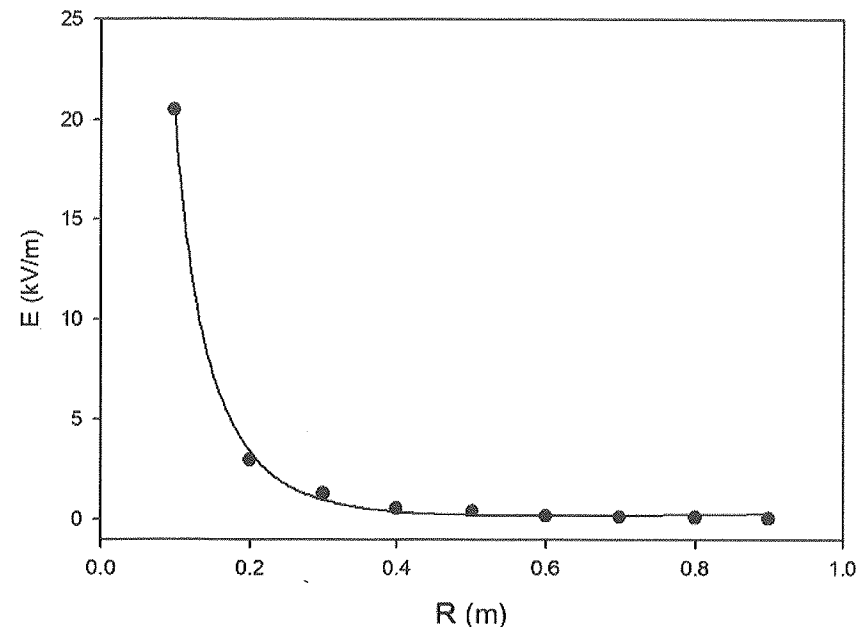
Квалитативна анализа

Најпре смо посматрали укључену плазма куглу у потпуном мраку како бисмо што боље могли описати шта се дешава са филаментима у плазми у различитим условима или на њеној површини, кад је рука или прст на кугли, кад се на куглу ставе различити материјали, проводници, изолатори. Предлажемо следеће активности, затим на основу визуалних опажања направити и квалитативну анализу појава:

1. Посматрање и уочавање правилности у формирању и распореду искри, облик филамената, њихово кретање и нестајање унутар плазма кугле.
2. Ставити руку или прст руке на врх или са стране плазма кугле. Уочити шта се дешава. Која је разлика у односу на случај описан под 1.
3. Уочити шта се догађа ако се на врх кугле стављају различити предмети (папир, дрво, пластика, алуминијумска фолија).
4. Површини кугле приближити штедну сијалицу или неонску цев. Посматрати шта се дешава.
5. Коришћењем осцилоскопа измерити потенцијал у функцији од растојања R . Нацртати одговарајућу функцију $E=f(R)$.
6. Осмислити активност описану под 5. коришћењем стандардног мултиметра.

Квантитативна анализа

Након квалитативне анализе приступили смо мерењу потенцијала на различитим удаљеностима од кугле. Електрично поље у простору око кугле а које је последица електромагнетског зрачења насталог у кугли, израчунавамо по формули $E=U/R$. Резултати мерења су приказани на графику (слика 4). За вредности јачине електричног поља су узете средње вредности за три мерења за свако R .



Слика 5. Графички приказ електричног поља плазма кугле у функцији од удаљености од кугле у хоризонталном правцу

На слици 4 је пуном линијом приказана функција која најбоље одговара добијеним мерењима (црни кружићи на слици 4) што нам омогућава да проверимо хипотезу да електрично поље опада са квадратом удаљености од наелектрисане кугле.

ЗАКЉУЧАК

Вишегодишње искуство аутора (М. Ковачевић) у предавању Физике плазме студентима основних академских студија физике, мотивисао нас је да напишемо овај рад који може послужити као припрема наставника физике за предавање о плазми. У раду је дат кратак преглед агрегатног стања плазме и неких основних карактеристика овог агрегатног стања. За више детаља препоручујемо две одличне књиге [1,2].

На крају рада је дат предлог једног демонстрационог експеримента са плазма куглом. Посматрањем уочава се правилност у распореду и настајању искри унутар плазма кугле. Искре настају са доње стране завојнице (централне електроде) и крећу се према горе, према површини кугле. Њихов облик је кривудава, и при врху често гранају у 2 или 3 нове. Доласком на површину стакла оне нестају. Стављањем руке или прста на врх кугле, филаменти се скупљају у један интензивнији, који је усмерен према руци или прсту. Број осталих филамената у кугли се знатно смањује. Ако се неки дрвени предмет стави на површину плазма кугле без придржавања истог, не

учавамо никакве промене. Ако на куглу ставимо комад алуминијумске фолије такође се не учављују промене. Када се фолија ухвати руком може се видети да су се искре разгранале по целој фолији. Ако површини кугле приближимо неонску цев или штедљиву сијалицу, неонска цев и сијалица, када се нађу у јаком електричном пољу, почињу да светле. Њиховим удаљавањем од површине кугле интензитет светла је све слабији јер је и јачина електричног поља све мања.

ЗАХВАЛНИЦА

Аутори се захваљују др Саше Симићу, ванредном професору на ПМФ-у у Крагујевцу, и Игору Танасијевићу, професору физике у О Ш “Милутин и Драгиња Тодоровић” у Крагујевцу, за корисне сугестије и дискусију при мерењу електричног поља око плазма кугле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Милић С. Б., Основе физике гасне плазме, Београд: Грађевинска књига, 1989, стр. 1-54.
2. Chen F. F., Introduction to plasma physics and controlled fusion, New York: Springer, 2016, pp. 1-13.
3. Raizer P. Y., Gas Discharge physics, New York: Springer-Verlag, 1987, pp. 1-6.
4. Engel von A., Ionizovani gasovi, Beograd: Naučna knjiga, 1970, pp 4-22.
5. Guilbert R. N., 1999, Deconstructing a plasma globe, *The Physics teacher*, **37**, 11-13.
6. Lincoln J., 2018, Plasma globe revisited, *The Physics Teacher* **56**, 62-63.
7. Gonzalez Y. J., 2016. Plasma: the fourth state, *Science in School* **37**, 51-55.

О демонстрацији бестежинског стања динамометром у слободном паду

Ивана Круљ¹, Јосип Слишко², Љубиша Нешић³, Александар Ристић⁴,
Биљана Живковић⁵, Јелена Цветковић⁶

¹Академија техничко-васпитачких струковних студија, Ниш, Србија

²Facultad de Ciencias Físico Matemáticas Department, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Mexico

³Природно-математички факултет, Ниш, Србија

⁴Електронски факултет, Ниш, Србија

⁵Основна школа „Вук Стефановић Караџић“, Крагујевац

⁶Гимназија „9. мај“, Ниш

Апстракт. Један од огледа који су у уџбеницима предложени за демонстрацију бестежинског стања је слободан пад динамометра за чију је опругу окачен тег. Објашњење које се при томе пружа упућује ученике на појаву да током слободног пада динамометар показује нулу и да се тиме доказује да је, тада, тежина тела једнака нули. Ипак, током слободног пада, због осциловања опруге које при том настане, динамометар показује нулу само у одређеним тренуцима. С обзиром на то да сила еластичности наставља да делује и када локално нема гравитационог поља, што се према принципу еквиваленције остварује при слободном паду, поставља се питање да ли поменута демонстрација бестежинског стања, као стања током кога тело нема тежину, следи принцип очигледности и да ли је упутније да се она другачије искористи за детаљније проучавање бестежинског стања. У раду је описана дигитална симулација наставка постојања силе еластичности у систему који се нађе у бестежинском стању и представљене су могућности те симулације за примену у настави физике у основној и средњој школи и на факултетима.

Кључне речи: бестежинско стање, слободан пад, еластична опруга, сила еластичности

БЕСТЕЖИНСКО СТАЊЕ

Локално нестајање гравитационог поља у слободно падајућем систему референце последица је његове неинерцијалности тј. убрзаног кретања. Ајнштајн је размишљајући о овоме дошао на идеју да је гравитационо поље релативно. Једнакост гравитационе и инертне масе је кључна за доношење овог закључка. У Њутновој механици једнакост поменутих маса се сматра сплетом околности због