

Зборник радова конференције “Развој астрономије код Срба III”
Београд 25-28. април 2004,
уредник М. С. Димитријевић
Публ. Астр. друш. “Руђер Бошковић” бр. 6, 2005, 263-271

РУЂЕР БОШКОВИЋ И ЧЕСТИЧНО - ТАЛАСНИ ДУАЛИЗАМ

АЛЕКСАНДАР ТОМИЋ

Народна опсерваторија, Калемегдан, Горњи град 16, 11000 Београд, Србија

Резиме. У историји науке епизода са Бошковићевом идејом из 1773. г. како утврдити да ли је природа светлости честична (како је он веровао) или таласна, познатија као “аберација светлости и телескоп испуњен водом”, није испричана до краја.

Тражећи тачан одговор многи физичари давали су свој допринос. При томе су најалост заборавили текст самог питања, па нису извели очигледан закључак о дуалној природи ни после Ејријевог мерења 1871. г. За то су биле потребне још 52 године и нови експерименти. Комптонови експерименти били су теоријски боље припремљени, и што је веома важно, хипотеза о честично-таласном дуализму била је присутна. Бошковићево питање било је веома актуелно, али прерано постављено.

1. СВЕЛОСТ - ДО БОШКОВИЋА

У човеку је још увек присутан, поред научне слике света, свет детета и свет песника, који најчешће подржавају и одражавају свет првобитног човека. Ову паралелу са науком изузетно успешно је обрадио Н. Јанковић (Јанковић, 1996). Како је изгледало исконско поимање човека о светлости?

Вид и светлост сматрају се идентичним, а светлост је телесне природе. Еуклид изводи теорију одбијања светлости од равних и сферних огледала сматрајући да светлост излеће из очију. Епикур и Лукреције говоре о маскама које с предмета одлећу на све стране.

У старом Египту сматра се да су Сунце и око у односу Бога и човека. У науци су 2000 година јасна само геометријска својства светлосних зрака. Тек у 17. веку Снелијус (1620. г.) открива, а Декарт формализује закон преламања светлости, потом Грималди открива 1665.г. дифракцију, Хук исте године описује боје танких слојева, а Њутн 1672. г. помоћу призме даје сјају и боји објективну меру.

Око није у стању да разликује сложену белу светлост од неке простије, а призма то чини просторним раздвајањем. За опис преламања Њутн уводи као меру индекс преламања и утврђује да тај број зависи од брзине светлости. Потом проналази (преко тзв. Њутнових прстена) периодичност у светлости,

па уместо индекса преламања за опис светлости уводи дужину, као мерљиву величину. Истовремено Ремер (1675. г.) из посматрања Јупитерових сателита одређује брзину светлости, као велику, али коначну величину.

Тек тада се коначно одбацује идеја о светлости која излази из ока, јер Сунце се види одмах чим отворимо око, док светлост путује од њега 8 минута. Открива се и то да брзина светлости у супстанцији зависи и од саме светлости. Уведен је појам фреквенције (учестаности) као количник брзине светлости и интервала дужине, аналогних онима који се појављују у Њутновим прстенима. Показује се да је фреквенција иста без обзира у којој средини се светлост простира.

Кеплер из посматрања комета открива притисак светлости, што се уклапа у честично представљање светлости.

Грималди износи хипотезу да различите боје потичу од различитих фреквенција, слично звуку. Откривена је поларизација светлости, коју детаљно описује Хајгенс 1690.г. Ово указује на могућу таласну природу светлости. Али, светлост у интеракцији са супстанцијом врши притисак, бива расејана, поларизована, апсорбована, чак и настаје у интеракцији с њом (фосфоресценција), врши хемијске промене. Анализа хемијског дејства светлости указује да светлосни сноп није хомоген, јер се распадају поједини молекули, а не сви на изложеној површини. Дакле, енергија је концентрисана у појединачним центрима. Ово указује на честичну природу светлости.

Заступник ове друге идеје јесте и Њутн, који покушава да то објасни својом динамиком. У тим покушајима он, вероватно први, наслућује да природа светлости није просто честична. Питању природе светлости враћа се у више наврата, а као главну замерку таласној теорији наводи одсуство материјалне средине која би преносила таласе у празном међузвезданом простору, наводећи пример непростирања звука у вакууму.

Тако је крај 17. века обележен ривалитетом честичног и таласног представљања светлости.

2. ЊУТН И ПЕРИОДИЧНОСТ СВЕТОСТИ

Периодичност, коју открива Њутн у тзв. Њутновим прстенима, по схватању присталица таласне теорије јесте један од принципа те теорије. Занимљиво је Њутново мишљење о природи те периодичности. У својој Оптици (видети нпр. Njuton, 1954) он избегава да се изјасни по том питању: *'Које врсте је то дејство или размештај? Ја овде не истражујем да ли се оно састоји од ротационог или осцилаторног кретања светлости или средине, или још нечег'*. За оне који замишљају конкретну слику догађања он предлаже следећи модел.

Светлосни зраци ударају у неку одбојну или преломну површину, побуђују осцилације у преломној или одбојној средини, принудивши тврде делове преломног или одбојног тела да се крећу. Може се претпоставити да

се тако настала осциловања простиру у тој преломној или одбојној средини, слично томе како се осциловања простиру у ваздуху, производећи звук, и крећу брже него зраци - претичући њих. Када се зрак (светлости) налази у делу осциловања који је усаглашен са његовим кретањем, он лако пролази кроз преломну површину, ако се нађе у супротном делу осциловања, које омета његово кретање, лако се одбија. Следи, сваки зрак се повремено лако одбија или лако пропушта, од стране сваке осцилације која га претиче.

Ову хипотезу, познату под именом 'теорија приступа', анализирали су историчари, углавном доказујући њену неодрживост или противречност. Било је и покушаја стављања у ранг претходнице савремене теорије о дуалности елементарних честица. Али, код Њутна нема никакве дуалности. Светлост је за њега увек само честична. Таласи које светлост ствара у разним срединама јесу нешто спољашње у односу на светлост, а које настаје од светлости. (Kipnis, Pogrebisskaja, 1978) У неком смислу реалним моделом за то било би Черенковљево зрачење (нпр. Томић, 1974).

Њутна није бринула заснованост ове хипотезе, јер она припада спекулативним хипотезама, које не произлазе из експеримента, а против којих се он борио целог живота. Зато он пише: *'Ја не разматрам да ли је тачна или погрешна ова хипотеза. Просто, задовољавам се открићем да светлосни зраци, из овог или оног разлога, повремено се распоређују ка одбијању или ка преламању, много пута заредом'*. Даље он изводи везу између периодичности и индекса преламања средине: $T_1/T_2 = n_{21}^2$, чиме ограничена периодичност пре карактерише средину него светлост.

3. ДРУГАЧИЈА РАЗМИШЉАЊА

Њутн је био цењен од савременика, и касније, због својих истраживања боја танких и дебelih листова. Многи су касније понављали и модификовали његове експерименте. Тако Хершел и Кнокс 1709. г. реализују нове експерименте које Њутнова теорија не може да објасни.

Мелвил 1753. г. предлаже варијанту Њутнове теорије по којој свака честица светлости има два пола, слично магнету, један се привлачи други одбија са другим телима. Истовремено са праволинијским простирањем светлосне честице ротирају око свог центра, а свакој боји одговара сопствени период ротације. (Melville, 1753)

Руђер Бошковић сматра да светлосни зрак на целом путу простирања по напуштању извора трпи Њутнове 'приступе'. Еластично међудејство делова зрака светлости може дати објашњење. У тренутку израчења светлости, светлеће тело делује јаче на ближи део светлосне честице, него на остале делове и изазива осцилације. Различит карактер међудејства делова светлосних честица разних боја обезбеђује различите интервале приступа. Њутнов приступ за светлосну честицу заправо представља исто што и фаза за талас. (Kudrjavcev, 1974). Зависност интервала приступа од упадног угла

Бошковић повезује са променом оријентације саставних делова у светлосној честици.

Пристли је 1772. г. против Њутнове хипотезе о таласима који прстижу светлосну честицу, јер би то довело до независности величине прстена од дебљине плочице. Такође стање светлосног зрака на првој површини зависило би од растојања светлосног извора до површине. На основу Мичелове примене Бошковићеве криве интеракције на интеракцију светлости и супстанције, Пристли излаже свој модел појаве.

У својој *'Историји оптике'* Пристли оцењује овај Њунов рад речима: *'Нема оптичких огледа у којима је сер Исак Њутн уложио више труда него у огледима са бојама прстена на танким листићима. Ту је исказао велику проицљивост и као филозоф и као математичар. Ипак, без обзира на то, ни у једном другом предмету свог занимања није превидео више важних чињеница у посматраним појавама, нити више грешио у вези њихових узрока.'*

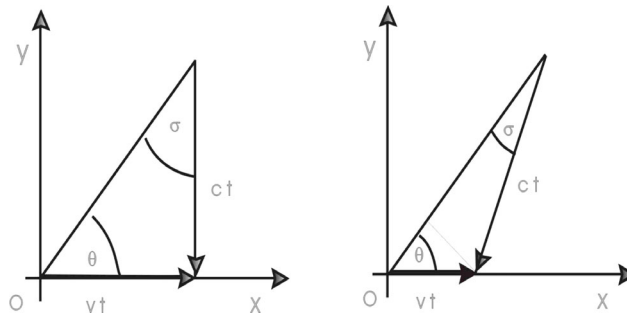
Иако Бошковић говори јасно и директно о осциловању СВЕТЛОСТИ, а Мелвил више индиректно, Кипнис и Погребенскаја у цитираном раду ипак изричито наводе да *'до почетка 19. века нико није оценио да основна врлина теорије приступа лежи у доказу постојања у светлости неке периодичности'*. Чак ни Ојлер, заступник таласне теорије. По њему молекули супстанције могу да осцилују неком фреквенцијом зависном од дебљине тела, а побуда на осциловање потиче од упадне светлости. Таква, резонантна теорија, захтева једнозначно да светлосни талас ствара периодичне осцилације, па према томе периодичност светлости уводи Ојлер, али само као хипотезу, сматрају Кипнис и Погребисскаја. Тако је ово Ојлерово мишљење одиграло улогу само посредно својим утицајем на погледе Т. Јанга. Тек он уводи, као замену за Хајгенсове таласе - импулсе, периодичне таласе у етру, али тек пошто је открио интерференцију светлосних зрака.

У експериментима са поларизацијом светлости Био је код светлосних честица увео осу поларизације и тако надоградио Мелвилову идеју (Biot, 1812). Он коначно уводи појам фазе (уместо) приступа и предлаже синусоидалну зависност интензитета приступа. По њему светлосне честице добијају различите фазе већ у чину испуштања.

Коначно Френел својим огледима ставља тачку на експериментална заснивања доказа периодичности светлости увођењем принципа интерференције (в. нпр. доступније издање - Френел, 1955). Тако се развијало схватање од светлости као честице до светлости као таласа.

4. АБЕРАЦИЈА (ЧЕСТИЧНЕ) СВЕТЛОСТИ

Астроном Бредли 1725.г открива аберацију светлости. Он уочава из прецизних мерења положаја звезда у току године да звезде описују круг, елипсу или праву линију око средњег положаја. Бредли то објашњава годишњим кретањем Земље око Сунца брзином v и коначношћу брзине простирања (честичне) светлости, c .



Слика 1. Бредлијево објашњење аберације светлости.

Његово објашњење је усклађено са честичном природом светлости, јер следи Њутнову механику. Брзина честице у покретном систему (u') и непокретном систему (u) зависи од брзине кретања покретног система (v): $u = u' + v$. Ако светлосна честица путује дуж y -осе, брзином: $u_y = -c$, у покретном систему појављује се компонента брзине у правцу кретања система: $(u_x)' = u_x - v = 0 - v = -v$. Због тога постојаће и отклон од нормале за угао σ' одређен односом (Сл. 1): $\tan \sigma = (u_x)' / (u_y)' = v/c$. Угао σ је мали па је тангенс једнак синусу, а синус самом углу израженом у радијанима.

Ако светлост већ долази под неким углом θ према правцу кретања Земље, нормална компонента брзине биће: $-c \sin \theta$, а у правцу кретања: $-c \cos \theta$, па је одступање (Bradley, 1728, или доступније Lang, 1974):

$$\tan \sigma = \frac{v \cdot \sin \theta}{c + v \cdot \cos \theta}.$$

Развој у Тејлоров ред даје:

$$\sigma = (v/c) \sin \theta.$$

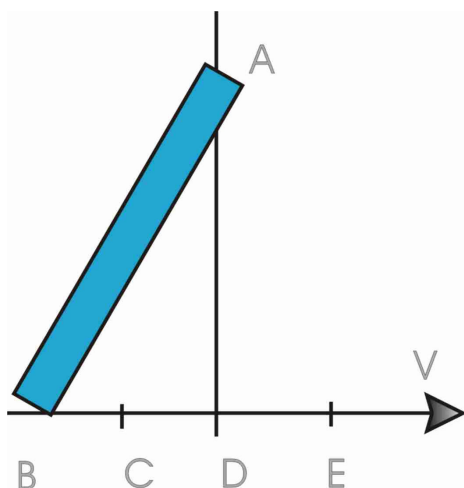
Бредлијев резултат добија се и без постављања питања природе светлости, чисто геометријски. На Сл. 1- десно, примена синусне теореме даје:

$$(v \cdot t) / \sin \sigma = (c \cdot t) / \sin \theta,$$

што је исти резултат, уз то потврђен посматрањем. Осим могућности корекције - свођења астрономских мерења, ово је Бредли сматрао и другим мерењем брзине светлости.

У таласној теорији објашњење није овако просто.

По механицистичкој таласној теорији светлости неопходна је средина у којој се простиру светлосни таласи. То је хипотетички етер, у односу на којег се простира светлост, али такође креће и извор односно пријемник. Ако је ω



фреквенција светлости у систему непокретног етра према извору светлости, \vec{N} јединични вектор правца простирања таласа, c - брзина таласа у односу на етер, таласни број је $\vec{k} = (\omega / c)\vec{N}$, фаза таласа $\varphi = (\omega - \vec{k} \cdot \vec{v})t$. Овде је \vec{v} вектор брзине извора - пријемника у односу на етер. Како извор и пријемник могу различито да се креће према етру који мирује, резултат неће бити једнозначан, чак и за једнаке брзине (по амплитуди).

Управо ту на сцену ступа Бошковић.

Слика 2. Положај телескопа и тачке у које би требало да стиже светлост.

5. АБЕРАЦИЈА СВЕТОСТИ КАО КРИТЕРИЈ УМ ИСПРАВНОСТИ ТЕОРИЈА О ПРИРОДИ СВЕТОСТИ

Брзина светлости у вакууму износи: $c = 300000 (km/s)$. У супстанцији индекса преламања n она је мања и износи: $c' = c/n$. Бошковић се овде појављује са идејом да се мерењем аберације у два телескопа, од којих је један испуњен ваздухом, други водом, утврди која теорија је тачна. Бошковић је тврдио да ће мерење потврдити честичну природу светлости. По његовој Теорији природне филозофије, као и по Њутновом схватању, супстанција треба да убрза светлосне честице у води, док по таласној теорији то не би био случај. Било би обрнуто, па два таква, иначе идентична телескопа, не би измерила једнака аберациона скретања. Бошковић је то објавио у Opera pertinentia (Boscovich, 1785) али по његовом писму Лаланду из 1773. г. то је овај пре описао у свом уџбенику астрономије, 1781. г. (Lalande, 1781). Тако би се мерење аберације светлости појавило као критеријум за утврђивање природе светлости. Зато је овај замишљени експеримент, за који је Бошковић вршио озбиљне припреме о чему сведоче сачувана Бошковићева писма у опсерваторији Брера, из 1784. и 1785. г. (Boscovich, 1887-88) али није доживео да га изведе, привукао велику пажњу физичара.

Шкотланђанин Робисон 1788.г констатује да би овако било могуће утврдити и апсолутно кретање Земље у односу на нешто према чему се светлост креће увек истом брзином. Он ипак очекује исти резултат на оба телескопа. (Robison, 1790; Moller-Pederson K.: 1980; Ziggelar, 1987)

Још 1782. г. предвидео је П. Вилсон негативан резултат, тј. неразликовање резултата мерења у оба телескопа, следећим размишљањем. (Ziggelar, 1987; Wilson, 1782) Светлосни зрак од звезде која је посматрачу нормално изнад равни Земљиног кретања улази у телескоп са водом у тачки А, а посматрач је у В. Због Земљиног кретања телескоп се мора нагнути за угао BAD . Светлост стиже до посматрача у D тј. прелази пут AD док посматрач пређе BD (Сл. 2). Ако се телескоп напуни водом светлост у води путује n пута брже (по корпускуларној теорији) и стиже до линије којом путује посматрач раније. Посматрач стиже само до тачке С, на растојање $BC = BD/n$. Ипак, на води догађа се и преламање па зрак не путује ка D него ка С, ако су BD, BC синуси упадног и преломног угла. Резултат је да посматрач сусреће светлосни зрак у тачки С уз исти нагиб телескопа као што је то у тачки D ако је у цеви ваздух. Ту је дакле Бошковић погрешно, превидео је преламање светлосног зрака на води. Ако је светлост честичне природе оба телескопа морају имати исти нагибни угао.

Али, шта се догађа ако је светлост таласне природе? Мерење би ипак имало смисла, јер...По Хајгенсу, брзина светлости у води мања је n пута, па посматрач стиже у тачку Е, даљу од D, јер је време путовања продужено, док светлост пролази кроз С, због преламања на води. Посматрач би морао додатно нагнути телескоп са водом. Зато је 100 година касније Ејри ипак извео мерење, и добио негативан резултат.

Са становишта таласне теорије тачно објашњење даје Френел 1818. г. (Fresnel, 1818; в. нпр. Rosser, 1964; Sivuhin, 1980) Он сматра да се мора узети у обзир отпор етра кретању Земље. Ако се супстанција индекса преламања n креће кроз светлосни етер брзином v , етер унутар супстанције бива делимично повучен са супстанцијом брзином $(1-v^2/c^2)v$. У непокретној течности брзина светлости износи: $u = c/n$, а у покретној: $u' = (c/n) + (1-1/n^2)v$. Пола века касније исто добија Лоренц другачијим путем, а то такође следи из касније изведене теорије релативности.

По Френелу, тј. према таласној теорији светлости, светлосни зрак је повучен за износ: $(1-1/n^2)BE$ док пролази кроз воду у телескопу. За време док посматрач стигне из В у Е светлост би због преламања на води стигла до С, а због увлачења етра још би се померила за: $(1-1/n^2)BE$. Због односа: $BE = n \cdot BD = n^2 \cdot BC$ и светлост и посматрач стигли би истовремено у тачку Е. Значи исти крајњи резултат предвиђа и коректна таласна теорија светлости.

Бошковићу се не може замерати што није знао ово што су касније други докучили, не баш лако. Његова идеја била је привлачна због значаја одговора који је сматрао Бошковић доступним на овај начин. Стога он пре **заслужује**

похвалу за осећај шта је заиста битно у посматрачким чињеницама, него критику за неке превиде које је он при томе учинио.

Шта је даље било? Да оба телескопа дају исте мерене вредности експериментално је потврдио Ејри, (Airy, 1872) јер телескоп испуњен водом осим велике апсорпције донео је и низ других проблема који су отежали његову реализацију. А тек 1905. г. Ајнштајн објављује специјалну теорију релативности из које следи принципијелна немогућност разликовања мерених аберација или одређивања апсолутног кретања уколико се координатни систем (Земља) креће без убрзања. Наиме, у координатном систему везаном за телескоп, без обзира чиме је испуњен, па и у сочивима, влада изотропија. Зато у телескопу светлост не скреће додатно због његовог кретања. Прелаз на покретни систем референције има смисла тек после напуштања телескопа. Зато аберација и постоји, јер светлост прелази из покретног система у односу на телескоп у непокретни систем везан за телескоп. Али, не зависи од тога чиме је телескоп испуњен.

6. ЧЕСТИЧНО - ТАЛАСНИ ДУАЛИЗАМ СВЕТЛОСТИ

Од изношења идеје до њене коначне провере прошао је готово један век. Вероватно зато ни Ејри, који својим мерењем даје коначно експериментални одговор шта је резултат експеримента замишљеног од стране Бошковића, не даје и одговор на Бошковићево питање: каква је природа светлости, честична или таласна ?

Да је Бошковић био у праву, шта би био одговор после Ејријевог мерења? Свакако: светлост је једнако честичне и таласне природе. А који би био одговор с обзиром на све претходно речено ? Одговор би морао бити исти ! Обе теорије дају исто предвиђање, мерење даје за право и једној и другој. Светлост је једнако и честица и талас. Али, експеримент који је замислио Бошковић не може послужити као критеријум за елиминацију једне од хипотеза.

И тако... одговор на Бошковићево питање каква је природа светлости - није изречен. Чека се још пола века да се на основу посве другачијег експеримента о томе изјасни Комптон. Само, тада ће постојати сви неопходни предуслови за тако нешто: (рана) квантна физика и релативистичка физика биће формулисане, а хипотеза о честично-таласном дуализму изречена. Комптонов експеримент, за разлику од Ејријевог, имао је одговарајуће теоријске припреме.

Показало се још једном да је Бошковићева идеја била изречена сувише рано. Као што је Гил написао у наслову своје књиге, Бошковић је био претеча, и по овом питању. (Gill, 1942)

Литература

- Airy, G. V.: 1872, *Phil. Mag.*, **XLIII**, 310/313.
Biot, J.: 1812, *Memoire de l'Institute*, 1-317.

- Boscovich, R.: 1785, *Opera pertinentia ad opticam et astronomiam*, Basano, tom II, str. 248-346.
- Boscovich, R.: 1887-88, *Rad JAZU*, knj. LXXXVII, LXXXVIII i XC, Zagreb, str. 371 do 396.
- Bradley, J.: 1728, *Phil Trans.*, **6**, str. 149.
- Frenel, O.: 1955, *Izabrannnye trudy po optike*, Gostehizdat, Moskva.
- Fresnel, A. J.: 1818, *Annales de chimie et de physique*, **9**, str. 57 i 286.
- Gill, H. V.: 1941, *Roger Boscovich, S.J.-Forerunner of Modern Physical Theories*, Dublin.
- Janković, N.: 1996, *Otkrivanje Vasiona*, Muzej nauke i tehnike i Zavod za udžbenike, Beograd, 1996.
- Kipnis, N. Sh., Pogrebisskaja, E. I.: 1978, *Dve problemi fizicheskoj optiki na rubezhe 17.-18. vv*, str. 72 u zborniku *Mehanika i fizika vtoroj poloviny 18. veka*, (red. A. N. Bogoljubov), Nauka, Moskva.
- Kudrjavcev, P. C.: 1974, *Kurs istorii fiziki*, Prosveshchenie, Moskva, str. 68.
- Lang, K. R.: 1974, *Astrophysical Formulae*, Springer, tačka. 5.1.3.
- Lalande, J.: 1781, *l'Astronomie*, Paris, tom IV, str. 687/8.
- Melville, T.: 1753, *Phil. Trans.*, **48**, 261.
- Moller-Pederson, K.: 1980, *Centaurus*, **24**, No.4, str. 335.
- Njuton, I.: 1954, *Optika, ili traktat ob otrazheniyakh, prelomleniyakh, izgibaniyakh i cvetah sveta*, Moskva, Gostehizdat, str. 212.
- Robison, J.: 1790, *Trans. Roy. Soc.*, **2**, str. 84.
- Rosser, W. G. V.: 1964, *An Introduction to the Theory of Relativity*, London, t. 2.1.4/6.
- Sivuhin, D. V.: 1980, *Optika*, Moskva, str. 667.
- Tomić, A.: 1974, *Vasiona*, **22**, br. 3, 61.
- Wilson, P.: 1782, *Phil. Trans.* **LXXII**, str. 58/70.
- Ziggelar A.: 1987, str.153 u *Filozofija znanosti Ruđera Boškovića*, Zagreb.

RUDJER BOSCOVICH AND THE PARTICLE-WAVE DUALISM

In the history of science the episode with Boscovich's idea from year 1773rd (how examine the nature of the light- is it corpuscular, what Boscovich believed, or wavy, known as aberation of the light and water-inside telescope), is not narated to the end.

Many physicists gaves their contribution searching for answer to Boscovich's question. But, in this undertaking they forgotten exact text of the question and from this reason – the evident conclusion on the dual nature of light was not developed, even after Airy's measure, in the year 1871. This conclusion nedded for a new experiment and a new half century. Compton's experiment, opposite to that of Boscovich, was teoretically better prepared, and what is very important, the hypothesis on the duality was carried out. Boscovich's question was actual, but articulated too early.