

ОСЛУШКИВАЊЕ КОСМОСА ЗВУЧНИМ СКУЛПТУРАМА

ЕДИ БОН¹ и ИВАН БОН²

¹*Астрономска опсерваторија, Београд, Србија*

E-mail: ebon@aob.rs

²*Факултет савремених уметности, Београд, Србија*

E-mail: ivanbon@gmail.com

Резиме: Научни концепти, посебно у космологији, могу бити веома сложени за разумевање и тешко доступни широј публици. Уметност може послужити да ове сложене идеје постану приступачније кроз доживљај и интеракцију са публиком. У нашем пројекту представљамо звучне скулптуре инспирисане телескопима у облику рога (тзв. "хорн" антене) који су коришћени за истраживање раног универзума. Ове скулптуре функционишу као мини радио телескопи, омогућавајући публици да чује космичку микроталасну позадинску радијацију (CMBR). Ово зрачење, које потиче из епоха раног универзума, неких 380.000 година након Великог праска и најстарије је зрачење које можемо детектовати, старо око 13,3 милијарде година. За његово откриће додељена је Нобелова награда Пензијасу и Вилсону, који су користили телескоп у облику рога и њиме први детектовали изотропан позадински шум, тзв. позадинско микроталасно зрачење (cosmic microwave background radiation - CMBR), које представља кључни доказ постојања Великог праска, односно тренутка настанка свемира. Овакви телескопи су послужили као инспирација настанка скулптура за ослушкивање свемира. Ове звучне скулптуре представљају мале радио телескопе за пријем електромагнетног позадинског зрачења, које преко радио пријемника бива претворено у звук, који се затим, емитује кроз те скулптуре. Звук се простире кроз форму рога ових скулпура (уједно, рог служи и за усмеравање сигнала који прима антена) и акустички појачава и резонира, стварајући аналогију са првим акустичким таласима у свемиру, тзв. барионским акустичким осцилацијама (БАО), који су се простирали у раној плазми, пре него што је свемир постао прозрачан. Током овог раног периода, универзум је био испуњен примордијалном барион-фотонском плазмом, кроз коју су први акустички таласи у универзуму резонирали, остављајући иза себе флукуације густине утиснуте у CMBR, чији остаци данас сачињавају структуре на великим скалама. Ови одједи првих звучних таласа користе се у одређивању брзине експанзије универзума, односно степена убрзавања ширења (тај резултат је донео још једну Нобелову награду). Ови космички звучни таласи имају невероватну важност за многе аспекте космологије.

Кључне речи: позадинско зрачење, скулптура за ослушкивање свемира, звучне скулптуре

Веза између науке и уметности је често била инспирација, како научницима тако и уметницима. Многи чувени научници су уједно, били и еминентни уметници. Данас, у савременим методама визуализације података у астрофизици, чест је случај трансформисања података у звучне записе, како би се они једноставније анализирали, али и боље дочарали и описали (Barrass и Kramer 2010). Као резултат једне такве сарадње вајара и астрофизичара, настале су звучне скулптуре за ослушкивање рађања Космоса (Bon и Bon 2024).

Ове звуковне скулптуре функционишу као мали радио телескопи, осмишљени за детекцију електромагнетног космичког позадинског зрачења. Прикупљени сигнал се помоћу радио пријемника претвара у звук, који затим резонира кроз скулптурални објекат у облику рога, који у исто време служи и као пасивни усмеривач сигнала антене. По аналогiji са раним акустичким таласима у свемиру – познатим као барионске акустичке осцилације (БАО), који су се ширили кроз врелу фотонско-барионску плазму у раним фазама космоса, пре него што је постао прозачан за зрачење. Рани свемир је био испуњен мешавином бариона и фотона, чија интеракција је изазивала осцилације притиска, остављајући трагове у расподели густине који су данас видљиви у космичком микроталасном позадинском зрачењу (CMBR – Smoot 1992, Planck Collaboration 2018, Hinshaw 2013, Fixsen 2009, Eisenstein и Hu 1998) и на структурама на великим скалама (Springel, Frenk и White 2006, Percival 2010, Cole 2005, Anderson 2012, 2014, Dawson 2013, Alam 2017, Eisenstein 2005). Те осцилације су својеврсни "звучни отисак" раног универзума и данас представљају кључни алат у мерењу космичке експанзије (DESI Collaboration 2023, 2024, Riess 1998) и откривању убрзаног ширења свемира (Perlmutter 1999, Schmidt 1998), за шта је такође додељена Нобелова награда. Улога тих древних космичких акустичких таласа изузетно је значајна у савременим истраживањима структуре и еволуције универзума. Звуковне скулптуре могу радити и без напајања, користећи примљени електромагнетни сигнал као извор енергије, док се уместо додатног појачала за звучник, користећи пиезо-звучник, може чути акустички појачан звук, где је појачање извршено акустички самом формом скулптуре. По својој форми су веома сличне модерним звучним скулптурама Луиђи Русола, који је својим концептом "Уметност буке" (манифест "The art of noises") производио буку индустријских машина (Russolo 1913, 2012, 2018). За разлику од њих, ове скулптуре за ослушкивање космоса емитују звук шума космоса, односно позадинског зрачења,

Заправо, 380 000 година након Великог праска, плазма раног универзума се охладила на температуру од око 3000 K (Fixsen 2009), што је омогућило да тадашњи свемир постане прозачан. Зрачење које је у том тренутку емитовано, данас детектујемо у облику позадинског шума, односно микроталасног позадинског зрачења (CMBR), које се може слушати помоћу обичног кућног радио пријемника када се подеси на фреквенције које нису заузеле емисијом људских радио станица. Акустичко ослушкивање постаје још занимљивије постављањем антене и радио пријемника у звучне скулптуре, које својим обликом подсећају на старе радио телескопе у облику рога (тзв. рог или "хорн"

антене), које су коришћене за проналазак позадинског микроталасног зрачења (за чију детекцију (Penzias и Wilson 1965) су Арно Пензиас и Роберт Вилсон добили Нобелову награду 1964. Године). Помоћу радио пријемника смештених у скулптурама, ови електромагнетни таласи се претварају у звучне, који се затим, репродукују помоћу звучника смештеног у резонаторском делу скулптуре, који својим карактеристичним обликом рога врши акустичко појачање и модулисање емитованог звука.

Претварање ових електромагнетних таласа у звучне, помоћу радио пријемника унутар скулптура, заправо симболизује прве акустичке таласе раног Универзума, насталие због притиска зрачења на непрозрачну, барион-фотонску плазму. Ови акустички таласи простирали су се изузетно великим брзинама (од око половине брзине светлости) и остали су замрзнути у слици позадинског зрачења у тренутку у коме је плазма раног свемира постала прозрачна (видети сл. 3). Савременим инструментима, структуре ових таласа се могу детектовати у облику малих флукуација у просторној слици позадинског зрачења. То зрачење заправо, није баш потпуно изотропно у простору, као што се то раније мислило, већ се виде структуре различитих густина и температура, како оне пројектоване на небеску сферу у позадинском зрачењу, тако и у различитим епохама старости свемира, што се види на великим структурама у свемиру. Ови акустички таласи барион-фотонске плазме су веома значајни, јер се управо они користе за одређивање старости свемира, као тзв. "стандардни лењери". Позадинско зрачење је заправо, најдаља дистанца у свемиру коју можемо детектовати и налази се на црвеном помаку од $z=1100$. На основу реконструкције еволуције ширења свемира ови таласи указују на старост свемира од 13.7 милијарди година, што је у складу са проценама из других метода.

Ови таласи су заправо, први акустички таласи у свемиру, па је одатле инспирација да се шум позадинског зрачења акустички послушкује помоћу звучних скулптура. Саме скулптуре су осмишљене да својим обликом подсећају на рог антене које су коришћене за прву детекцију микроталасног зрачења, и одређивање температуре данашњег свемира, која одговара температури црног тела од око 2.7 K. Управо овај податак је био важан за идеју да се свемир шири из тзв. "Великог праска", када је био веома малих димензија, и екстремно великих температура. Приликом ширења се температура свемира снижавала, тако да је у тренутку када је постао прозрачан (неких 380 000 година након самог Великог праска) температура пала на вредности испод 3 000 K, а у данашњем тренутку, након 13,1 милијарди година, та температура износи око 2.7K. У време када је пронађено микроталасно зрачење, сами проналазачи који су га детектовали (Арно Пензиас и Роберт Вилсон, 1964. године) нису знали природу и порекло овог зрачење, већ су детекцију извршили радећи на тада, најсавременијем усмереном радио телескопу у облику рога (Холмдел хорн радио телескопу у Њу Џерсију, направљеним специјално за комуникацију са сателитима), који су покушавали да калибришу и пуне у рад, међутим нису могли да уклоне шум који се константно чуо из пријемника, без обзира на разне покушаје да га елиминирају. Тај шум је долазио са свих страна, изотропно, без обзира на смер у коме би окренули антену. У разним покушајима да елиминирају овај шум, чак су и помисли да можда он потиче од измета голубова који је остајао унутар телескопа, међутим и константим и детаљним чишћењем свих делова конструкције овај

шум није могао бити елиминисан. На једној од дискусија о том константном шуму који се чуо из њихове суперосетљиве опреме, један колега им је предложио да контактирају Роберта Дикија, физичара са Принстон универзитета, који је са својом групом трагао за доказом о Великом праску, али нису имали средстава да направе један такав телескоп којим би то могли то да истражују. Пензиас и Вилсон су у телефонском разговору са Дикијем сазнали шта су заправо они детектовали. Међутим, ово откриће је публиковано у посебном раду (Penzias и Wilson 1965), без објашњења о чему се заправо ради, док је у истом броју часописа *Astrophysical Journal Letters* заједно са овим радом, објављен и рад у коме је било и теоријско објашњење (Dicke, Peebles и Wilkinson 1965). На крају, Нобелову награду су добили само Пензиас и Вилсон 1978-ме године за детекцију позадинског зрачења, и поред тога што нису знали шта су детектовали, док су научници који су разјаснили појаву остали у сенци, што претставља једну од највећих контроверзи везаних за доделу Нобелове награде.

У скорије време, уређаји постављени на специјано израђеним сателитима у Земљиној орбити детектовали су прецизније слику позадинског зрачења, па тако знамо за fine флукуације у температури и густини плазме раног универзума (Smoot 1992, Planck Collaboration 2018, Hinshaw 2013). Такође, структуре пореклом са ових акустичких таласа видљиве су и у структури филамената груписања галаксија на различитим дистанцама, које имају облик и карактеристике управо ових акустичких таласа, само су њихове димензије одговарајуће величинама очекиваним на тим дистанцама, због ширења свемира (Springel, Frenk и White 2006, Percival 2010, Cole 2005, Anderson 2012, 2014, Dawson 2013, Alam 2017, Eisenstein 2005, DESI Collaboration 2023, 2024, Riess 1998). Важност ових првих акустичких таласа у универзуму је дала инспирацију за акустичко ослушкивање позадинског зрачења, у коме је сакривена слика последњег тренутка осциловања првих акустичких таласа у свемиру.

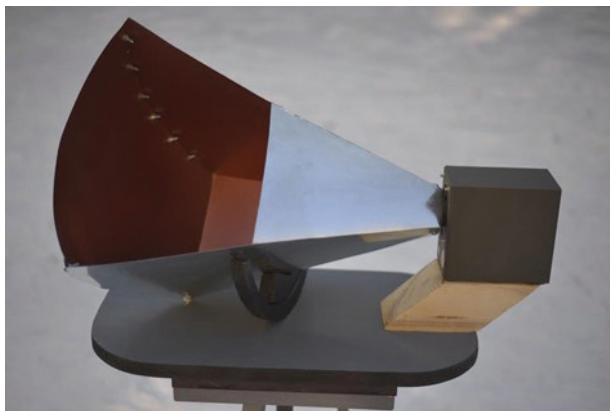
Сличност форме ових звучних скулптура са радио телескопима у облику рога заправо има двоструку улогу да прикупља и усмерава сигнал електромагнетног зрачења из смера у коме је скулптура усмерена (као и на самим телескопима у облику рога), како би радио антена у њему заиста добила сигнал позадинског зрачења, и да омогући слушање конвертованог сигнала (помоћу радио пријемника и звучника) у звук, појачавајући овај звук акустички, својим обликом.

Звучне скулптуре, као и звучни инструменти, обично у себи садрже резонатор, који појачава и боји звук емитован кроз њу. Резонатори су форме у којима се таласи, својим простирањем појачавају на тај начин што у њима, таласи тачно одређених таласних дужина успевају да се појачају поновним пролазом у резонатору, чиме се врши сабирање њихових амплитуда. Пошто се таласи чија таласна дужина не одговара карактеристичној дужини од $l=n(\lambda/2)$ веома брзо расипају губећи енергију простирањем кроз средину, онда у резонатору "преживљавају" дуже само оне фреквенције које испуњавају овај услов, појачавајући амплитуду таласа при сваком поновљеном пролазу. Ове фреквенције се називају хармоници и карактеришу сваки резонатор, дајући му другачију "боју" звука (ово нам омогућава да препознамо боју различитих музичких инструмената).

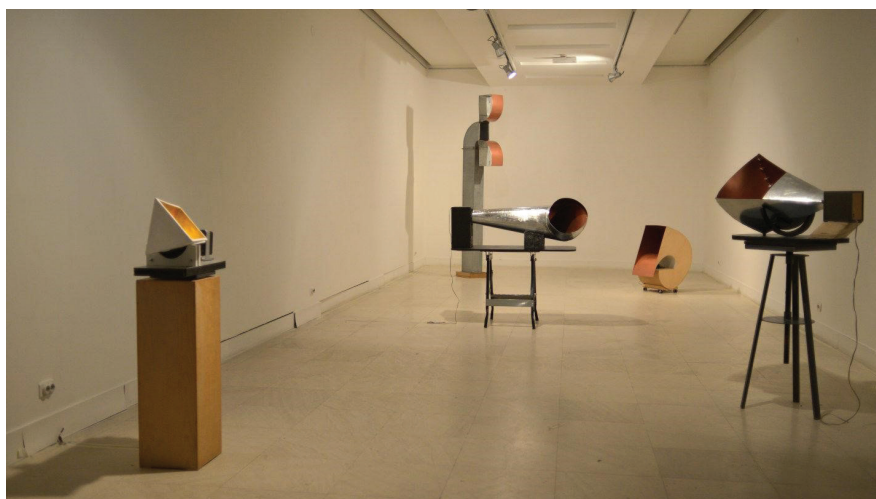
Како форме ових усмерених рог антена подсећају на акустичке појачиваче звука (облици слични рогу, попут хорни на старим грамофонима, или форма-

ма које комбинују цев и левак итд.), као у футуристичким звучним инсталација Луиђи Русола, ове скулптуре се могу сврстати у концептуално сличне, са разликом што у овом случају, уместо Луиђијеве буке машина и индустријских постројења, ове звучне инсталације испуштају шум добијен у радио пријемнику, електромагнетних таласа пореклом из епохе близу Великог праска (рађања самог свемира).

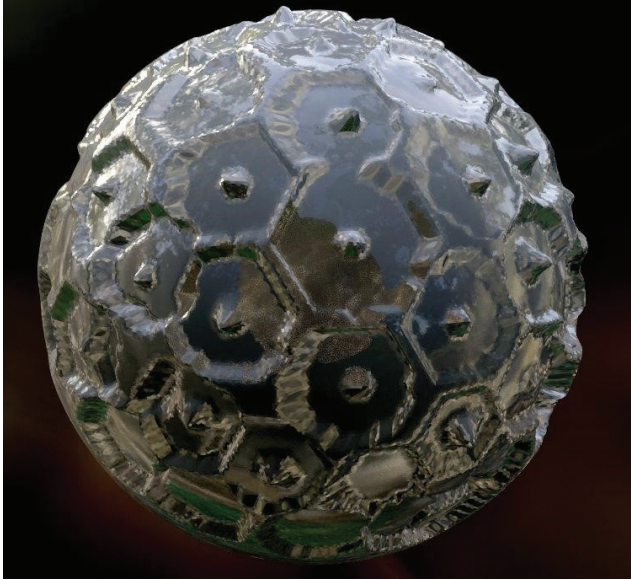
У овом конкретном случају, кроз скулптуру звучник емитује акустички бели шум добијен из радио пријемника, који је електромагнетни сигнал позадинског зрачења претворио у звук. Овај шум се карактеристичним обликом резонатора (у облику рога), појачава и модулише резонатором, као потсећање на резонантне фреквенције хармоника првих акустичких таласа у пра-свемиру. Отуда идеја ослушкивања почетка свемира, што у неку руку потсећа на ослушкивање сигнала у којој су утиснуте слике првих таласа у свемиру. Ови акустички таласи су такође, били резонантни таласи раног свемира, попут таласа у резонатору звуковних скулптура.



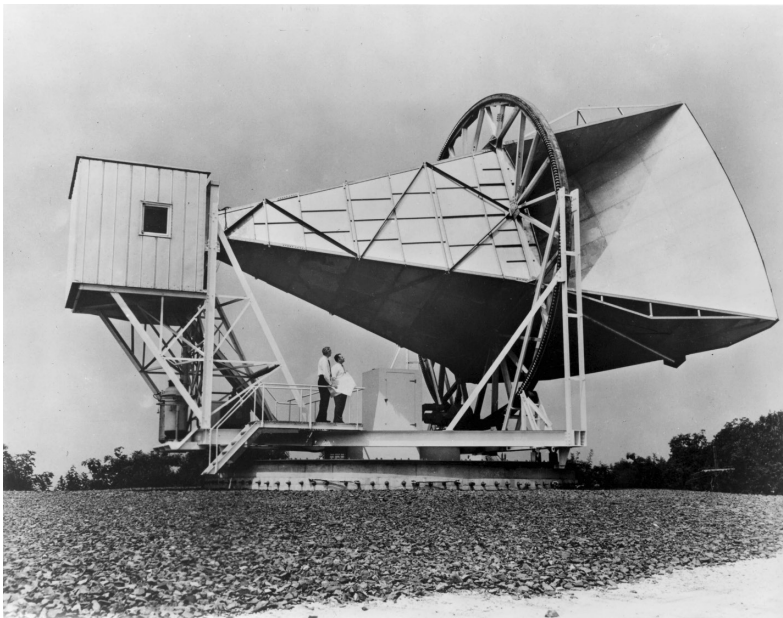
Слика 1. Скулптура за ослушкивање раног свемира, инспирисана усмереним радио телескопима у облику рога (тзв. рог антене).



Слика 2. Изложба скулптура за ослушкивање раног свемира



Слика 3. Скулптура шематског приказа акустичких таласа раног свемира замишљене сферне љуске закривљеног простор-времена која се шири са ширењем раног свемира, на коме су приказани резонантни акустички таласи (уметничка визија).



Слика 4. Холмдел хорн телескоп (Bell Telephone Laboratories, Њу Џерси) направљен за комуникацију са сателитима. Радио астрономи Роберт Вилсон и Арно Пензиас су њиме 1964. године открили космичко микроталасно позадинско зрачење, за шта су 1978 добили Нобелову награду за физику. (Извор, Flickr: NASA on The Commons)

Веза између барионских акустичких осцилација (БАО) и формирања примордијалних супермасивних црних рупа (SMBH) отвара нову перспективу у разумевању настанка структура у раном свемиру. Густе региони, које су генеровали БАО таласи, могли су створити повољне услове за брзо формирање црних рупа огромних маса, што би могло објаснити њихово присуство већ у веома раним фазама развоја свемира (на великим црвеним помацима), као и јаз у масама између звезданих и супермасивних црних рупа.

Супермасивне црне рупе (SMBH) обично се налазе у средиштима галаксија, укључујући и наш Млечни пут. Њихове масе могу бити од неколико милиона па све до неколико милијарди пута веће од масе Сунца. Због изузетно снажне гравитације, оне утичу на кретање звезда и гасова у својој околини, остављајући специфичне трагове које астрономи могу детектовати и проучавати.

Формирање и раст супермасивних црних рупа (SMBH) у раном свемиру, посебно на великим црвеним помацима ($z > 6$), представљају озбиљан изазов за савремене астрофизичке моделе. Недавна посматрања помоћу телескопа Џејмс Веб (James Webb) – JWST, открила су квасаре које покрећу SMBH на црвеним помацима већим од 10, што значи да су те црне рупе достигле огромне масе у свега неколико стотина милиона година након Великог праска (Finkelstein 2022, Labbé 2023). Овакви налази доводе у питање стандардне моделе акреције и указују на могућност да су SMBH настале у густо збијеним областима које су формиране деловањем барионских акустичких осцилација у раној фази еволуције свемира. Тренутна и будућа посматрања помоћу телескопа као што су James Webb Space Telescope (JWST) и других савремених инструмената (попут DESI и LSST пројката) наставиће да испитују ову хипотезу и допринеће прецизнијем разумевању механизма настанка црних рупа у најранијим епохама космоса.

У случају веома удаљених галаксија, где није могуће директно мерити брзине кретања звезда, астрономи се ослањају на трагове које оставља материја док пада у супермасивну црну рупу. Током тог процеса формира се акрециони диск – структура од загрејаног гаса који ротира око црне рупе и емитује огромне количине зрачења, препознатљиве по карактеристичном спектру. Супермасивне црне рупе које активно привлаче велике количине материје у језгрима галаксија појављују се као активне галаксије и квазари (квазизвездани објекти). То су неки од најсјајнијих објеката у свемиру (Netzer 2013). Квазари могу да засене светлост целе галаксије у којој се налазе, и због своје изузетне светлости видљиви су на милијардама светлосних година удаљености. Њихов интензиван сјај омогућава астрономима да проучавају супермасивне црне рупе из раних епоха свемира, односно на великим црвеним помацима. Светлост из удаљених галаксија бива померена ка црвеном делу спектра због ширења свемира. Мерењем тог црвеног помака (redshift), астрономи могу да процене удаљеност до галаксије, а самим тим и да тиме мапирају свемир на великим скалама. Инструменти попут SDSS и DESI пружају важне резултате на овом пољу.

Поред оваквих одређивања удаљености користе се и такозване, "стандардне свеће" (види на пример Perlmutter (1999)). У космологији, "стандардна свећа" је астрономски објекат чија је права светлост позната, па се поређењем са посматраном светлошћу може одредити његова удаљеност. Најпознатији пример су супернове типа Ia, али се у новије време истражују и квазари као

потенцијалне стандардне свеће (Risaliti и Lusso 2015). Посебно занимљиви су квазари са екстремним акрецијама, јер достижу природни праг у сјају, чиме се додатно стандардизују њихова својства (Wang 2013, Dultzin 2019, Bon, Marziani и Bon 2020, Negrete 2018). Иако се ова метода још развија и није тако стабилна као код супернова, квазари нуде велику предност јер се могу посматрати на много већим удаљеностима и из раних епоха свемира. Тиме постају важан алат у истраживању експанзије свемира и тамне енергије.

ЗАКЉУЧАК

Интеграција уметничких звучних скулптура са научним мотивима из космологије, као што су космичко микроталасно позадинско зрачење и барионске акустичке осцилације, отвара нове могућности за комуникацију научних идеја кроз форму. Ове скулптуре не само да представљају естетски израз, већ и функционишу као концептуални мост између науке и публике, омогућавајући интерпретацију космичких процеса кроз звук и форму. Тиме се доприноси популаризацији савремених космолошких открића и развија нова димензија интеракције између науке, технологије и уметности.

Ове скулптуре су приказане на бројним изложбама (Bon 2015, 2019, 2023, 2024, Bon и Bon 2010, 2013, 2017, 2021). Премијерно су представљене 2017. године у Галерији Дома омладине у Београду, а данас се налазе као део сталне поставке Музеја Института за физику у Земуну. Једна од скулптура је награђена на Летњем салону скулптуре у Павиљону "Цвијета Зузорић" у Београду (Bon 2019). Једна оваква скулптура ће ускоро бити постављена и на Астрономској опсерваторији.

ЛИТЕРАТУРА

- Alam, S.: 2017, The clustering of galaxies in the completed SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: cosmological analysis of the DR12 galaxy sample, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **470**(3), 2617–2652.
- Anderson, L.: 2012, The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Baryon acoustic oscillations in the Data Release 9 spectroscopic galaxy sample, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **427**(4), 3435–3467.
- Anderson, L.: 2014, The Clustering of Galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Baryon Acoustic Oscillations in the Data Release 10 and 11 Galaxy Samples, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **441**(1), 24–62.
- Barrass, S., Kramer, G.: 2010, The sonification of scientific data, in: *The Sonification Handbook*, 209–236, Logos Verlag Berlin.
- Bon, I.: 2015, *Tin Gutter Antena Soundsculpture*, August 2015, Exhibition and performance at Sound Installations, Colony in Jalovik, Jalovik, Serbia.
- Bon, I.: 2019, *Radio Telescope No. 1 Soundsculpture*, Summer Sculpture Salon, Exhibition of Sculptors of Serbia 2019, August 2019 group exhibition and award, Cvijeta Zuzorić Pavilion, Belgrade, Serbia.
- Bon, I.: 2023, *Horant 2*, Galerija 73, December 2023 group exhibition, 36. Čukarički Art Salon, Belgrade, Serbia.
- Bon, I.: 2024, *Horant 2 Soundsculpture*, Thirty years of the Zvono gallery, the third time, February 2024 group exhibition, Vilina Vode Gallery, Belgrade, Serbia.

- Bon, I., Bon, E.: 2010, *Soundsculptures*, Exhibition and performance at the Sound Sculptures, Mikser festival, 2010, Belgrade, Serbia.
- Bon, I., Bon, E.: 2013, *Soundsculptures*, Exhibition and performance at Sound Sculptures, November 2013, DK Studentski grad, Belgrade, Serbia.
- Bon, I., Bon, E.: 2017, *Sounds of the Cosmos*, 31.01.-18.02.2017, Solo Exhibition, DOB gallery, Belgrade, Serbia; *Catalog* **791**, 17.
- Bon, I., Bon, E.: 2021, *Sounds of the CMBR*, 2021 exhibition, Institute of Physics, Belgrade, Serbia.
- Bon, E., Bon, I.: 2024, Relics of the First Sound Waves in the Cosmos Through Soundsculptures, Zbornik Radova "A hidden harmony: Mathematics and Music through the Ages" - Matematički institut SANU, Beograd. ISSN: 0351-9406, ИСБН: 978-86-80593-80-7 29/21, pp. 41-67. https://doi.org/10.18485/mi_sanu_zr.2024.29.21.ch3
- Bon, N., Marziani, P., Bon, E.: 2020, Searching for Extremely Accreting Quasars, XIX Serbian Astronomical Conference 100, 57–65.
- Cole, S.: 2005, The 2dF Galaxy Redshift Survey: Power-spectrum analysis of the final dataset and cosmological implications, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **362**(2), 505–534.
- Dawson, K. S.: 2013, The Baryon Oscillation Spectroscopic Survey of SDSS-III, *Astrophys. J.* **145**(1), 10.
- DESI Collaboration: 2023, The DESI Experiment: Preliminary Results and Future Prospects, *Astrophys. J.*
- DESI Collaboration, DESI 2024 IV: Baryon Acoustic Oscillations from the Lyman Alpha Forest, arXiv, doi: 10.48550/arXiv.2404.03001
- Dicke, R. H., Peebles, P. J. E., Wilkinson, D. T.: 1965, Cosmic black-body radiation, *Astrophys. J.* **142**, 414-419.
- Dultzin, D.: 2019, Extreme quasars as distance indicators in cosmology, *Front. Astron. Space Sci.* **6**, 80.
- Eisenstein, D. J., Hu, W.: 1998, Baryonic features in the matter transfer function, *Astrophys. J.* **496**(2), 605-614.
- Eisenstein, D. J.: 2005, Detection of the Baryon acoustic peak in the large-scale correlation function of SDSS luminous red galaxies, *Astrophys. J.* **633**(2), 560-574.
- Finkelstein, S. L.: 2022, First JWST Observations of Galaxy Structure at Redshifts Above 10, *Astrophys. J. Letters* **940**(1), L55.
- Fixsen, D. J.: 2009, The temperature of the cosmic microwave background, *Astrophys. J.* **707**(2), 916–920.
- Hinshaw, G.: 2013, Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Parameter Results, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **208**(2), 19.
- Labbé, I.: 2023, JWST detection of massive black holes in the early universe, *Nature* **613**, 727–732.
- Matei, D., Russolo Luigi: 2018, *The Work and Influence of a Visionary - The Birth of Noise-Music*, Senior Projects Spring 2018, 224.
- Negrete, C. A.: 2018, Highly accreting quasars: The SDSS low-redshift catalog, *Astron. Astrophys.* **620**, A118.
- Netzer, H.: 2013, *The Physics and Evolution of Active Galactic Nuclei*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Penzias, A. A., Wilson, R. W.: 1965, A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s, *Astrophys. J.* **142**, 419.

- Percival, W. J.: 2010, Baryon acoustic oscillations in the Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 galaxy sample, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **401**(4), 2148-2168.
- Perlmutter, S.: 1999, Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae, *Astrophys. J.* **517**(2), 565-586.
- Planck Collaboration: 2018, Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters, *Astron. Astrophys.* **641**, A6.
- Riess, A. G.: 1998, Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant, *Astrophys. J.* **116**(3), 1009-1038.
- Risaliti, G., Lusso, E.: 2015, A Hubble Diagram for Quasars, *Astrophys. J.* **815**(1), 33.
- Russolo, L.: 1913, *L'arte dei rumori* (The Art of Noises), Ubu Editions.
- Russolo, L.: 2012, The Art of Noises, in: C. Black (ed.), *The Art of Noise, Destruction Of Music By Futurist Machines*, Sun Vision Press, 2012.
- Schmidt, B. P.: 1998, The high-Z supernova search: Measuring cosmic deceleration and global curvature of the universe using type Ia supernovae, *Astrophys. J.* **507**(1), 46-63.
- Smoot, G. F.: 1992, Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps, *Astrophys. J.* **396**, L1-L5.
- Springel, V., Frenk, C. S., White, S. D. M.: 2006, The large-scale structure of the universe, *Nature* **440**(7088), 1137-1144.
- Wang, J.-M.: 2013, Super-Eddington Accreting Massive Black Holes as Long-Lived Cosmological Standard Candles, *Phys. Rev. Lett.* **110**(8), 081301.

LISTENING TO THE COSMOS WITH SOUND SCULPTURES

Scientific concepts, especially in cosmology, can be very complex to understand and difficult to access for a wider audience. Art can serve to make these complex ideas more accessible through experience and interaction with the audience. In our project, we present sound sculptures inspired by the horn-shaped telescopes (so-called "horn" antennas) that were used to explore the early universe. These sculptures function as mini radio telescopes, allowing the audience to hear the cosmic microwave background radiation (CMBR).

Keywords: background radiation, sculpture for listening to the universe, sound sculptures