



Универзитет у Новом Саду, Природно - математички факултет, Департман за физику

# АНАЛИЗА КОМПЛЕКСНОСТИ ВРЕМЕНСКИХ СЕРИЈА КОСМИЧКОГ ЗРАЧЕЊА МЈЕРЕНИХ У НИСКОФОНСКОЈ ЛАБОРАТОРИЈИ ИНСТИТУТА ЗА ФИЗИКУ У БЕОГРАДУ

- МАСТЕР РАД -

Ментор: Проф. др Илија Арсенић

Кандидат: Снежана Костић

Нови Сад, 2017.

Овом приликом желим да се захвалим професору др Илији Арсенићу на савјетима, сугестијама и помоћи приликом реализације овог рада. Велику захвалност дугујем професорима и асистентима које не бих посебно да именујем, да не бих неког изоставила, који су ми предавали током студија и чији је труд и велико залагање да нам обезбједе што боље знање резултирало успјешним завршетком студија.

Захваљујем се свима који су вјеровали у мене и бодрили ме; колегама и колегиницама на помоћи током студирања, нарочито Сари и Милошу, без којих студирање не би било лако и забавно.

Посебно се захваљујем својим пријатељима, Милици, Миљани, Иринеји, Јелени и Божици, на незаборавним студентским данима, и на свим добрим и лошим стварима које смо прошли заједно. Хвала вам што сте ми били подршка и вјетар у леђа.

Највећу захвалност дугујем својој породици, Николи, Наташи и Микију, баки и стрицу и родитељима који су ми били немјерљива морална и финансијска подршка током школовања, који су вјеровали у мене и омогућили ми да будем овдје гдје јесам.

# Садржај

1	Увод	4
2	Космичко зрачење 2.1 Примарно космичко зрачење	${\color{red} 6} 7$
3	Космичко зрачење у атмосфери и на повр-	
	шини Земље       1         3.1 Особине секундарног космичког зрачење       3.2         3.2 Миони у атмосфери	<b>L 1</b> 12 16
4	Комплексност         2           4.1         Колмогоровљева комплексност         4.2           4.2         Трчећа комплексност         4.3           Фуријеова анализа посматраних временских серија         4.3	<b>20</b> 20 24 25
5	Коришћени подаци	30
6	Добијени резултати и дискусија       3         6.1       Комплексност временских серија       3         6.2       Фуријеова анализа посматраних временских серија и испитиваних комплексности       3	<b>34</b> 35 38
7	Закључак 4	41
8	Биографија 4	42

### Абстракт

Циљ овог мастер рада је анализа комплексности временских серија космичког зрачења, које су измјерене у Нискофонској лабораторији Института за физику у Београду. Испитивано је постојање периодичности комплексности посматраних временских серија.

На самом почетку речено је нешто више о честицама које чине космичко зрачење, и понашању поменутих честица при проласку кроз атмосферу.

У поглављу број 3 дата су својства секундарног космичког зрачења, механизми стварања секундарних честица у атмосфери, као и њихови појединачни доприноси укупном интензитету секундарног космичког зрачења. У овом поглављу дат је још и кратак опис лабораторије у којој су извршена мјерења.

У четвртом поглављу речено је нешто о комплексности, као и о начину одређивања комплексности неког низа. Кратко је описана и Фуријеова трансформација и алгоритам на коме је заснован програм помоћу кога је вршена анализа комплексности.

У поглављима 5 и 6 приказани су коришћени подаци, добијени резултати и кратка дискусија, а на крају је дат закључак и кратка биографија.

### 1 Увод

Аустријски физичар Виктор Франц Хес (*Victor Franz Hess*) открио је 1912. године космичко зрачење серијом експеримената у балонима на различитим висинама, примјетивши да се електроскоп много брже разелектрише на већим надморским висинама него на површини Земље [1]. Експериментима је показано да интензитет овог зрачења незнатно опада на висини од 1 km, али са даљим повећањем висине, на око 5 km, интензитет је знатно већи него на површини. Сумирајући резултате Хес је закључио да се експериментални подаци најбоље могу објаснити под претпоставком да ово зрачење потиче из свемира, тј. да постоји радијација која улази у атмосферу одозго, и ово представља почетак проучавања космичких зрака. За то откриће Хес је Нобелову награду 1936. године. То је била прва у низу Нобелових награда за проучавања везана за космичко зрачење [2].



Слика 1.1: Балон који је Хес користио за експерименте (лијево) и Хес током експеримента (десно). Извор [2].

*W. Kolhörster* је у својим експериментима показао да интензитет зрачења не зависи од тога да ли је дан или је ноћ (чак су вршена мјерења и за вријеме помрачења Сунца која су дала исте резултате) и закључио да је мала вјероватноћа да је Сунце значајан извор зрачења. *R. A. Millikan* је овом зрачењу,1925. године дао име - космичко зрачење [3].

Истраживања су касније преусмјерена на природу космичког зрачења. У почетку се вјеровало да је оно електромагнетне природе (отуда и назив зрачење) али је уочено да на њега утиче Земљино магнетно поље те стога мора бити наелектрисано. До 50-их година XX вијека космичко зрачење било је једини извор високоенергетских честица у експерименталној физици високих енергија, што је довело до открића нових елементарних честица укључујући позитрон, мион и пион. Заједно са Хесом, Карл Андерсон је добио Нобелову награду за откриће позитрона, 1936. године [4].

Поријекло космичког зрачења је и даље питање научне дебате. Различити објекти у нашој галаксији предложени су као вјероватни ињектори (убризгивачи) честица и познати су различити механизми убрзања којима се космичко зрачење убрзава и до енергија од око  $10^6$  до  $10^7$  GeV, неке честице чак и до  $10^9$  GeV. Међутим, иако су предложени различити модели и процеси, остаје мистерија гдје и како честице са енергијама од  $10^{10}$  GeV и више, добијају своју енергију [1].

Испитивања физичке природе варијација интензитета космичког зрачења, на различитим временским скалама, важан су предмет изучавања физике космичког зрачења и астрофизике. Модулације космичког зрачења су важан алат којим се описују различити услови у хелиосфери. Посматрано на дужим временским скалама, варијације интензитета повезане су са циклусом соларне активности док брже варијације, реда минуте, сата или дана, могу бити повезане са разним активностима на Сунцу, геомагнетним промјенама или различитим феноменима у атмосфери. Када се анализирају варијације у интензитету космичког зрачења мјереног детекторима на површини земље не смију се игнорисати атмосферски ефекти на флукс секундарних честица. Ефекти које производе притисак и температура производе значајне позадинске варијације [5]. У овом раду анализирана је комплексност временских серија интензитета космичког зрачења за сирове податке и податке који су кориговани у односу на притисак

### 2 Космичко зрачење

Под термином *космичко зрачење* подразумијевају се високоенергетске честице које су ослобођене из разних бурних процеса у Васиони и које на Земљу стижу скоро сталним средњим интензитетом, равномјерно из свих праваца. Један дио овог зрачења скрене Земљино магнетно поље а преостало зрачење губи енергију сударима приликом проласка кроз атмосферу тако да само незнатан дио космичког доспјева до површине Земље.

Поријекло космичког зрачења највиших енергија је и даље непознато због немогућности утврђивања који од вјероватних процеса су одговорни за њихову продукцију, односно за њихово убрзавање до ултрависоких енергија. Познато је да практично сваки астрономски објекат са магнетизованом космичком плазмом може бити извор космичког зрачења. Према поријеклу, сходно томе, према енергији, космичко зрачење може бити :

- вангалатичко енергија од 10<sup>10</sup> до 10<sup>15</sup> GeV. Генерише се у радио галаксијама, квазарима и другим објектима у Васиони изван Млијечног пута.
- галатичко енергија од 10 до 10<sup>10</sup> GeV. Потиче углавном из експлозија супернових, од остатака супернових, у магнетосферама пулсара и двојних звијезда или ударних таласа у међузвјезданом простору.
- соларно енергија од 1 до 10 GeV. Настаје у Сунчевој корони у периодима јаке Сунчеве активности (соларне бакље и короналне ерупције)
- међупланетарно енергије до 100 MeV. Чине га честице убрзане терминалним ударним таласима на ивици хелиосфере или у међупланетарном простору.

Највећи дио честица има енергије у интервалу од 100 MeV до 10 GeV. Средња енергија галактичког космичког зрачења је око 10 GeV, а густина енергије око  $1eV/cm^3$ , што је приближно једнако густини енергије галактичког магнетног поља или густини термалне енергије међузвјезданог гаса.

Мјерења хемијске и изотропске композиције директног космичког зрачења могу помоћи у разумјевању који аспекти материје која чини Сунчев систем су заједнички за Млијечни пут као цјелину и да ли постоје неки атипични феномени који би довели до неких сазнања у вези са настанком Сунчевог система. Пошто су честице космичког зрачења наелектрисане на њихове путање утичу међузвјездана магнетна поља па стога оне носе информације о природи тих поља на великим удаљеностима од Земље. У сударима са језгрима међузвјезданог гаса космичко зрачење мијења своју композицију и те промјене је могуће мјерити. Такође, у тим сударима се производи гама зрачење које може да се детектује на Земљи, дајући информације о расподјели међузвјезданог гаса.

У највишим слојевима атмосфере, усљед интеракције честица *примарног* космичког зрачења са језгрима честица у атмосфери, настају каскаде нових честица а ово ново зрачење се назива *секундарним космичким зрачењем*. Примарно космичко зрачење је практично једини директан узорак материје која се налази изван Сунчевог система [4].

### 2.1 Примарно космичко зрачење

Космичко зрачење које долази до горње границе атмосфере назива се примарно космичко зрачење и оно се у великој мјери састоји од јонизованих језгара, приближно 90% водоника, око 9% хелијума и језгара тежих елемената као што су гвожђе, угљеник, итд. Ово зрачење чине релативистичке честице са енергијама које могу достићи и  $10^{20}eV$ . Са повећањем енергије повећава се удио тежих језгара па самим тим и средња маса примарних честица.

Познавање хемијског састава космичког зрачења на високим енергијама је ограничено малим интензитетом зрачења, а хемијска композиција има још једну занимљиву карактеристику. Већина елемената присутна је са истом релативном хемијском обилношћу као и у Сунчевом систему и на Земљи. Међутим, експерименти показују да је обилност неких елемената у космичком зрачењу знатно већа од њихове универзалне обилности, тј. обилности на Земљи и у Сунчевом систему, и то за неколико редова величине. Разлика је најизраженија код лаких елемената Li, Be, и B, а нешто мања разлика уочава се код Sc, Ti, Cr, V и Mn [4]. Могући узрок одступања је спалација убрзаних језгара космичког зрачења у њиховим интеракцијама са међузвјезданом материјом, при чему се стварају ови елементи који се називају још и секундарним компонентама примарног зрачења. Остала језгра, са обилношћу која је једнака оној у Сунчевом систему, чине примарну компоненту (H, He, C, O, Ne, Mg, Si i Fe).

Магнетно поље Земље дјелује на наелектрисане честице космичког зрачења - закривљује им путању и спрјечава нискоенергетске честице да допру до атмосфере, односно Земљине површине. Да ли ће честица успјети стићи до површине зависи од интензитета и смјера геомагнетног поља на датој локацији, као и од смјера кретања честице и његове чврстоће или ригидности  $(R \equiv pc/Ze[GeV])$ . Ригидност описује способност наелектрисане честице да се одупре скретању у магнетном пољу, па ће само честице ригидности веће од неке минималне (гранична геомагнетна чврстоћа) успјети да допру до површине. Посљедица овога је рез у флуксу примарног зрачења.

Најчешћа судбина високоенергетског протона који стиже из дубина Васионе до наше атмосфере отприлике је следећа. Прва интеракција која га сачека још у високим слојевима атмосфере је јака интеракција са неким језгром атома атмосферских гасова. Притом језгро најчешће озбиљно страда (спалација) а енергија протона се добрим дијелом трансформише у велики број хадрона. Ту доминирају пиони, лаки мезони прве генерације који нису обавезно праћени својим антимезонима, а тежих бариона и мезона друге и треће генерације, који се обавезно креирају у истом броју као и њихове античестице, има знатно мање. Све те честице крећу се првенствено у правцу кретања упадног протона, и у складу са својим (кратким) животима распадају се углавном слабим интеракцијама на лакше и стабилније честице нижих генерација. Пиони, којих има највише, распадају се на средњем путу од десетак метара у мионе и неутрина, који настављају пут ка површини Земље. Миони се затим распадају на електроне и нова неутрина. Сва ова такозвана атмосферска неутрина данас се детектују на Земљи, одакле се извлаче значајне информације о њиховим особинама.

Енергетски спекар хадронске компоненте космичког зрачења пружа се преко великог опсега енергија, од 10<sup>6</sup> eV до преко 10<sup>20</sup> eV, као што може да се види на Слици 2.1. Нискоенергетски дио спектра, до 10 GeV је подложан јаким варијацијама, усљед соларне модулације, а у складу са 11—огодишњим соларним циклусом, што се манифестује континуираним промјенама интензитета са временом. У том дијелу флукс зависи од датума посматрања, тј. фазе соларног циклуса. Изнад енергије од 10 GeV ефекти модулације постају занемарљиви. Код енергија између 10<sup>9</sup> eV и 10<sup>15</sup> eV флукс опада са енергијом по степеној функцији, са изложиоцем  $\gamma = 2.68$  На енергијиама  $E\approx 10^{15}$  eV благо се мијења изложилац степене функције (постоји прекид) и овај дио спектра представља "knee". Даљим повећањем енергије флукс опада брже ( $\gamma = 3.25$ ), а на  $E\approx 10^{19}$  eV поново се мијења нагиб степене функције и овај дио спектра представља "ankle" (Слика 2.1). На енергијама вишим од 10<sup>19</sup> eV флукс опада али вриједност изложиоца није одређена због малог броја података. Јавља се око 1 честице по  $km^2$  годишње (детектовано је свега неколико честица са енергијама вишим од 10<sup>20</sup> eV). Претпоставља се да су космички зраци ових енергија настали ван наше галаксије па механизми њиховог убрзавања нису познати [3].



Слика 2.1: Диференцијални енергетски спектар примарног космичког зрачења. Извор [1].

Поред претежно хадронске компоненте, космичко зрачење садржи и врло мали флукс других честица: електрона, позитрона, фотона и неутрина као и мали проценат антипротона. Дио високоенергетских електрона и позитрона настају дијелом у распаду пион - мион - електрон (позитрон), као резултат судара примарне хадронске компоненте са међузвезданим медијумом и интеракција са пољем позадинског зрачења. Извјестан допринос електронском флуксу космичког зрачења дају и креације електронско - позитронских парова високенергетским фотонима различитог поријекла у интеракцијама са међузвезданом материјом.

Извори фотона примарног космичког зрачења су различити галактички и вангалактички објекти као тачкасти извори, као и дифузно галактичко и вангалактичко зрачење. Дифузно зрачење је последица интеракција језгара и електрона са међузвјезданом материјом, и настаје усљед распада неутралних пиона, закочног зрачења електрона и инверзног Комптоновог ефекта. Додатно, на континуум гама зрачења суперпонирају се линије из распада радиоактивних изотопа насталих нуклеосинтезом или нуклеарним реакцијама, као и из анихилације позитрона.

Неутрина највећим делом потичу са Сунца (соларна неутрина). Извори неутрина ван соларног система су супернове, бинарни системи, пулсари, активне галаксије и други компактни објекти. Антипротони се креирају у сударима језгара примарног космичког зрачења са међузвјезданом материјом [4].

# 3 Космичко зрачење у атмосфери и на површини Земље

Када се високоенергетске честице примарног космичког зрачења сударе са језгрима атома у горњим слојевима атмосфере производе каскадни пљусак (shower) мноштва нових честица које скупа чине секундарно космичко зрачење. Прво се у тим интеракцијама производе пиони, као и мање обилни каони и други мезони и хадрони. Неутрални пиони се затим распадају на високоенергетске фотоне, а наелектрисани пиони и каони на мионе и неутрина. Дио миона се распадне у атмосфери, а остатак успјева да продре до површине Земље. Из распада миона и из интеракција миона и гама зрачења са атомима настају електрони и позитрони. Високоенергетски електрони из распада миона у интеракцијама са атомима атмосферских гасова, чија је густина све већа како се честице приближавају површини Земље, емитују високоенергетске фотоне закочног зрачења. Ови високоенергетски фотони на језгрима у дубљим слојевима креирају нове електрон - позитронске парове, који опет емитују ново закочно зрачење, и тако се развија такозвана електромагнетна лавина, или "широки атмосферски пљусак". На тај начин, високоенергетска примарна честица може створити милионе секундарних честица које се, усљед стечених трансверзалних импулса и расијања, латерално шире око средишње осе каскаде. Број, односно интензитет, честица које доспију до површине Земље у непосредној је вези са енергетским спектром и композицијом примарног космичког зрачења. Тако, мјерећи све честице ове лавине на површини Земље, које могу да покрију и неколико квадратних километара, добијамо податке о честици примарног зрачења која ју је изазвала [6].

Честице електромагнетних лавина на површини Земље, због релативно мале продорности електрона, називамо меком компонентом космичког зрачења. Али не распадну се сви миони прије него што стигну до површине Земље. Будући да миони имају најдуже вријеме живота од свих секундарних честица космичког зрачења, а потпомогнути релативистичком дилатацијом времена, њихов знатан број успјева да стигне до Земље. На нивоу мора има их око 150 по квадратном метру у секунди. Због своје велике продорности они се називају тврдом компонентом космичког зрачења.

### 3.1 Особине секундарног космичког зрачење

Пропагација честица кроз атмосферу зависи од флукса и енергије честица и њихових интеракција, као и од структуре атмосфере. Основни параметар атмосфере од значаја за интеракције примарних и стварање секундарних честица, и на тај начин и стварање каскадних пљускова, је количина материје изнад слоја атмосфере у коме честица интерагује. Она се квантификује величином која се назива атмосферска дубина. Атмосферска дубина која се мјери од врха атмосфере дуж путање честице назива се нагибна дубина, за разлику од вертикалне атмосферске дубине која је најкраће растојање од врха атмосфере до опсервационог нивоа гдје је честица интераговала. У стварности температура ваздуха, а самим тим и скалирана висина, опада са надморском висином до висине 10 - 15 km (тропосфера), а изнад ове висине је прво константна (тропопауза) а затим благо расте (стратосфера). Одавде слиједи да се зависност температуре од висине може апроксимирати са три функције, са параметрима одређеним стандардним атмосферским моделима. Постоји више модела атмосфере који описују промјене физичких својстава (притисак, температуру, густину) атмосфере са надморском висином. Међународна стандардна атмосфера даје висину тропосфере 11 km, средњу температуру на нивоу мора  $15^{\circ}$ C и средњи пад температуре са висином  $6, 5^{\circ}$ C/km.

Компоненте секундарног космичког зрачења могу се класификовати на више начина, према различитим, углавном феноменолошким, критеријумима. У зависности од тога да ли се зрачење апсорбује јако или слабо, разликују се мека и тврда компонента. Меку компоненту чине честице ниских енергија које се апсорбују у олову дебљине 15*cm* (еквивалентно 167 $g/cm^2$ ), и у основи се састоји од електрона. Тврда компонента пролази кроз 15*cm* олова и чине је теже честице. На малим надморским висинама то су углавном миони.

Према типу интеракције честица са материјом разликују се нуклеонска и електромагнетна компонента секундарног космичког зрачења. Нуклеонска компонента састоји се од неутрона и протона и резултат је вишеструких генерација хадрона. Електромагнетну компоненту чине електрони, позитрони и фотони из, прије свега, распада неутралних пиона, при чему се образује каскадни пљусак ових честица (Слика 3.2). Она настаје у релативно танком слоју атмосфере, честице се емитују под великим угловима у односу на правац кретања упадне честице и брзо се апсорбују. Са друге стране, нуклеони и наелектрисани пиони емитују се ближе правцу кретања примарне честице, имају веће слободне путеве и самим тим се слабије апсорбују. Пиони, као и миони из њиховог распада, понекад се сврставају у посебну мезонску компоненту, која је еквивалентна тврдој компоненти. Миони ниских енергија могу да допринесу електромагнетној компоненти, својим распадом или производњом  $\delta$  - електрона. Шематски, везе међу различитим компонентама секундарног космичког зрачења могу се приказати на следећи начин:

1. За ниске енергије примарне честице:



### 2. За високе енергије примарне честице:



Слика 3.1: Везе међу компонентама секундарног космичког зрачења. Извор [4].

У интеракцијама нуклеона и тежих језгара у атмосфери ствара се велики број пиона, као и мањи број каона и других хадрона. Процеси стварања секундарних пиона у нуклеарним интеракције се називају пионизацијом космичког зрачења. Из принципа независности наелектрисања слиједи да је однос броја неутралних и броја наелектрисаних пиона  $N_0/(N_+ + N_-)$  једнак 1/2. Неутрални пиони се директно распадају на парове фотона високих енергија, који затим генеришу каскадни пљусак електромагнетне компоненте:

$$\pi^0 \to \gamma + \gamma \tag{3.1}$$

Наелектрисани пиони се распадају на мионе и неутрина:

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu \tag{3.2}$$

$$\pi^- \to \mu^- + \bar{\nu_\mu} \tag{3.3}$$

Дио нискоенергетских миона се распада на електроне и неутрина:

$$\mu^+ \to e^+ + \nu_e + \bar{\nu_\mu} \tag{3.4}$$

$$\mu^- \to e^- + \bar{\nu_e} + \nu_\mu \tag{3.5}$$

Неутрина пролазе кроз атмосферу и Земљу углавном без интеракције али у сударима са језгрима, односно нуклеонима, неутрина и антинеутрина могу индуковати друге честице:

$$\nu_{\mu} + n \to p + \mu^{-} \tag{3.6}$$

$$\bar{\nu_{\mu}} + p \to n + \mu^+ \tag{3.7}$$

$$\begin{array}{l}
\nu_{e} + n \rightarrow p + e^{-} \\
\bar{\nu_{e}} + p \rightarrow n + e^{+}
\end{array} \tag{3.8}$$

$$\bar{\nu_e} + p \to n + e^+ \tag{3.9}$$

Наелектрисани и неутрални каони, К, имају више канала распада. Од значаја за космичко зрачење у атмосфери су:

$$K^+ \to \mu^+ + \nu_{\mu}, \qquad K^- \to \mu^- + \bar{\nu_{\mu}}$$
 (3.10)

$$\begin{array}{ll}
 K^+ \to \mu^+ + \nu_{\mu}, & K \to \mu^- + \nu_{\mu} & (3.10) \\
 K^+ \to \pi^+ + \pi^0, & K^- \to \pi^- + \pi^0 & (3.11) \\
 K^0 \to \pi^+ + \pi^- & K^0 \to \pi^0 + \pi^0 & (3.12)
 \end{array}$$

$$K_s^0 \to \pi^+ + \pi^-, \qquad K_s^0 \to \pi^0 + \pi^0$$
 (3.12)

Каони директно доприносе мионској компоненти, а у мањем обиму и преко створених наелектрисаних пиона (Слика 3.1). Такође, мали број неутралних пиона из распада каона додаје један мали дио електромагнетној компоненти [4].



Слика 3.2: Дијаграм каскадног пљуска честица секундарног космичког зрачења. Извор [1].

### 3.2 Миони у атмосфери

Миони имају масу око 207 пута већу од масе електрона, и имају одговарајућу античестицу  $\mu^+$  (еквивалентност миона и антимиона је утврђена до  $10^4$ ). Горња граница за полупречник миона је  $r_{\mu} \leq 10^{-19}$  m и спада у тачкасте честице. Основне карактеристике миона дате су у Табели 1:

Maca	$105.658367(4) { m MeV}/c^2$
Средњи живот	$2.197034(21) \cdot 10^{-6}$ s
Наелектрисање	- e
Спин	1/2

Табела 1: Основне карактеристике миона

Мион се распада на електрон, електронски антинеутрино и мионски неутрино (антимион се распада на коњуговане честице) као што може да се види на Фојмановом дијаграму распада миона (Слика 3.3):



Слика 3.3: Распад миона. Извор [3].

Када се у атому један од електрона замијени мионом формира се *мионски атом*. Антимиони са електроном формирају *миониум*, атом код кога антимион има улогу језгра. Овакав атом је краткоживећи, понаша се као водоник и користи се за проучавање електромагнетне интеракције јер пар антимион - електрон чине двије елементарне честице без унутрашње структуре, између којих дјелује само електромагнетна интеракција.

Поменуто је раније да распадом пиона на надморској висини од око 15 km настају миони који имају приближно исти правац као пиони и добијају око 80% њихове енергије. На висини од 10 km формира се око 90% миона од укупног броја који настаје у атмосфери. Критична енергија миона у ваздуху је око 1.11 TeV [3]. Миони са енергијом већом од критичне губе енергију зрачењем (стварање парова, закочно зрачење или фотонуклеарна интеракција). За мионе са енергијама мањим од критичне доминантан процес је јонизација или екситација. Приликом проласка кроз атмосферу миони своју енергију губе углавном јонизацијом.

Приликом проласка кроз атмосферу, уколико изгубе довољно енергије, миони се распадају, при чему електрон односи око 1/3 кинетичке енергије коју је имао мион, а остатак енергије добијају неутрини. Максимална кинетичка енергија коју могу добити електрони распадоом миона који мирује је око 50 Mev а средња енергија електрона је око 40 Mev [7]. Средњи флукс миона на површини Земље је 1 мион сваког минута на сваки *ст*<sup>2</sup> површине, што значи да 20% миона са енергијама 1 GeV и 80% миона са енергијама 10 GeV прође кроз атмосферу. Вријеме живота миона је приближно  $2, 2\mu s$  а ефикасни пресјек за нуклеарне интеракције је мали па мионе одликује велика продорност у атмосфери. Миони имају велику енергију (брзине су им блиске с) па им је средњи слободни пут усљед распада врло велики и због тога највећи дио миона успјева да прође кроз атмосферу, што их чини доминантном компонентом космичког зрачења дубоко у атмосфери (на малим надморским висинама), као и под земљом. Флукс миона на површини Земље јако зависи од географске ширине (већи је на већим географским ширинама а мањи у близини екватора, због магнетног поља Земље), а мјења се и у зависности од активности Сунца. Иинтензитет миона зависи и од угла под којим се мион посматра.

Секундарне космичке зраке на површини Земље чине и друге честице; поред протона и миона, електрони, позитрони и фотони чине дио флукса секундарног зрачења на површини Земље, с тим да дио електрона и позитрона потиче из распада миона и антимиона. Неутрони чине трећину свих језгара која стигну до нивоа мора. Неутрални дио флукса чине електронски и мионски неутрино који настају распадима мезона и миона [7].

Укупан флукс меке компоненте на нивоу мора износи 35 – 40% флукса миона. Због тога је од посебног значаја проучавање мионске компоненте космичког зрачења и одређивање њиховог интензитета и енергетског спектра ниско у атмосфери и на нивоу мора, чиме би се могла наћи веза са примарним космичким зрачењем, а самим тим и његов интензитет и спектар.

# 3.3 Мјерење интензитета миона из космичког зрачења у Нискофонској лабораторији Института за физику у Београду

Од 2002. године мјери се интензитет космичког зрачења у поменутој лабораторији, чији је географски положај такав, да се космичко зрачење које се детектује у основи састоји од мионске тврде компоненте, уз извјестан проценат и меке компоненте (географска ширина  $44^{\circ}51N'$ , географска дужина  $20^{\circ}23'$ , надморска висина 78*m*; геомагнетна ширина  $39^{\circ}32'N$ , гранична вертикална геомагнетна чврстоћа 5, 3GV). Лабораторија се састоји од надземног и плитко укопаног подземног дијела на дубини од 12m испод површине, као што може да се види на Слици 3.4. Због својих нискофонских карактеристика, лабораторија је оспособљена за изучавања различитих појава генерисаних космичким зрачењем [8].

Миони из космичког зрачења детектују се пластичним сцинтилационим детекторима који су смјештени и у надземну и у подземну лабораторију. Експерименталне апаратуре у обје лабораторије су идентичне и чине их парови сцинтилационих детектора правоуганог облика, као и инструментациони модули за аквизицију података. Један пар чине велики детектор димензија  $100cm \times 100cm \times 5cm$  и мали детектор димензија  $50cm \times 23cm \times 5cm$ , који су постављени хоризонтално својим највећим странама. Њихов узајамни положај је мање - више флексибилан, што омогућава извођење различитих типова експеримената.

На мале детекторе је везан по један фотомултипликатор пречника основе 5cm, који преко одговарајућег свјетловода прикупља сцинтилациону свјетлост са дуже бочне стране ( $50cm \times 5cm$ ). Код великих детектора сцинтилациону свјетлост скупљају четири фотомултипликатора постављена на ћошкове детектора, усмјерени дуж дијагонале детектора. Претпојачавачки сигнали са два фотомултипликатора који су на истој дијагонали се сабирају. Модули за аквизицију података су два брза четвороканална аналогно -дигитална конвертора.



Слика 3.4: Скица Нискофонске лабораторије Института за физику у Београду. Извор [9]

Пошто миони учествују у електромагнетним и нуклеарним интеракцијама са материјом при чему се производе нове честице које такође интерагују са средином, на површини Земље космичко зрачење садржи меку електромагнетну компоненту (електрони и позитрони), чији флукс на нивоу мора износи 35-40% мионског флукса. Због тога укупан експериментални спектар сцинтилационих детектора у надземној лабораторији је сума мионског и електронског  $\Delta E$  - спектра. И интензитет космичког зрачења је укупни интензитет мионске и електронске компоненте.

### 4 Комплексност

Комплексан систем је систем који је састављен од више различитих дијелова који међусобно интерагују нелинеарно и овакав систем је немогуће просто раставити на саставне дијелове због великог броја веза између њих. За разумијевање понашања комплексног система, поред понашања саставних дијелова, потребно је разумјети и начин на који они формирају понашање цјелине. Комплексни системи посједују следеће особине:

- постојање самоорганизације и појава особина или понашања које појединачни дијелови не испољавају;
- систем је организован на нецентралан, дистрибутиван начин, са мноштвом веза између саставних дијелова, и
- тешко је моделирати и предвидјети понашање система чак иако су познати дијелови и међусобне везе [11].

Да би се на неки начин квантификовала комплексност система потребно је увести величине које ће описивати комплексност. У овом раду је коришћена Колмогоровљева комплексност у анализи временских серија космичког зрачења. На интензитет космичког зрачења утичу различите активности које се јављају на Сунцу, као и атмосферски услови (притисак и температура). Пошто су наведени елементи међусобно зависни на комплексан начин, космичко зрачење можемо посматрати као комплексан систем.

### 4.1 Колмогоровљева комплексност

Представља мјеру непериодичности, насумичности и неуређености система, а у овом раду је коришћена у анализи временских серија космичког зрачења. Осмислили су је Соломонов (*Ray Solomonoff*) и Колмогоров независно један од другог, шездесетих година прошлог вијека а тек касније Лемпел и Зив су осмислили алгоритам који омогућава њено израчунавање. Колмогоровљева комплексност K(x), низа дужине x се дефинише као дужина, у битима, најкраћег програма који када се покрене на Универзалној Тјуринговој машини U одштампа дати низ и тада се заустави [12].

Дакле, информација о комплексности неког објекта може се добити као дужина његовог најкраћег описа. На примјер, низ

### 010101010101010101010101010101010101

има кратак опис '16 понављања 01', док низ

### 11001000011000011101111011101100

вјероватно нема једноставнији опис него је потребно навести све чланове низа у правилном редослиједу. Насумични низови имају већу Колмогоровљеву комплексност у односу на уређене низове исте дужине, јер се не могу уочити обрасци помоћу којих би се смањила дужина програма који репродукује дати низ [13].

Како би се добила израчунљива мјера Колмогоровљеве комплексности Лемпел и Зив су предложили алгоритам који се своди на пребројавање различитих образаца који се јављају у серији. Мјера комплексности низа је укупан број образаца. Приликом испитивања Колмогоровљеве комплексности временску серију  $x_i$  (i = 1, 2, 3, ...N) је потребно претворити у бинарни низ,  $s_i$  који се састоји само од нула и јединица, на следећи начин:

$$s_i = \begin{cases} 0 & x_i < x_t \\ 1 & x_i \ge x_t \end{cases}$$

$$(4.1)$$

Све вриједности из посматране серије пореде се са вриједности која представља праг,  $x_t$  (најчешће је то средња вриједност). Ако је члан серије мањи од изабраног прага онда се на његово мјесто у серији уписује 0, а уколико је већи или једнак вриједности прага онда се на његово мјесто уписује вриједност 1. Секвенца која се не понавља представља један образац. Потребно је дефинисати још и бројач комплексности c(N) као минималан број различитих образаца садржаних у посматраном низу [14].

Принцип рада Лемпел-Зивовог алгоритма може се објаснити на следећи начин:

- 1. Прва цифра је увијек први образац, без обзира да ли је у питању 0 или 1.
- Прави се подниз А који представља скуп свих чланова серије који припадају већ препознатим обрасцима; број чланова овог низа расте док се не испита цијела серија.
- 3. Прави се подниз В тако што му се додају још неиспитани чланови серије, како би се пронашли нови обрасци.
- 4. Прави се низ АВ тако што се на низ А додаје низ В.

- 5. Прави се низ AB $\pi$  (подниз AB) тако што се из низа AB уклони последња цифра.
- 6. Поставља се питање да ли је низ В садржан у  $AB\pi$ .
- 7. Уколико је В садржан у  $AB\pi$  додаје му се следећа цифра из кодиране серије и то се понавља све док је овај услов задовољен.
- Уколико В није садржан у ABπ онда је низ В нови образац. Тако добијен образац се додаје списку претходно препознатих образаца који се назива ријечник - R. Низ AB сада постаје нови низ A а низ B се празни.

Уочава се да Лемпел - Зивов алгоритам дијели низ на поднизове који нису уочени раније, чиме се формирају кодови који омогућавају да се низови који су дугачки кодирају са малим индексима. Како би се горе наведене ставке илустровале примјенићемо Лемпел - Зивов алгоритам на следећи низ:

#### 1011010010011010010011101001001100010

Алгоритам ће у њему препознати следеће обрасце:

- Прва цифра је први образац; $\longrightarrow R=1$ ·
- A=1, B=0, AB=10, AB $\pi$ =1, B $\notin \nu$ (AB $\pi$ ); $\longrightarrow$ R=1.0.
- A=10, B=1, AB=101, AB $\pi$ =10, B $\in \nu(AB\pi); \longrightarrow R=1.0.1$
- A=10, B=11, AB=1011, AB $\pi$ =101, B $\notin \nu$ (AB $\pi$ ); $\longrightarrow$ R=1.0.11.
- A=1011, B=0, AB=10110, AB $\pi$ =1011, B $\in \nu(AB\pi); \longrightarrow R=1.0.11.0$
- A=1011, B=01, AB=101101, AB $\pi$ =10110, B $\in \nu(AB\pi); \longrightarrow R=1.0.11.01$
- A=1011, B=010, AB=1011010, AB $\pi$ =101101, B $\notin \nu$ (AB $\pi$ );  $\longrightarrow$ R=1.0.11.010.
- A=1011010, B=0, AB=10110100, AB $\pi$ =1011010, B $\in \nu$ (AB $\pi$ );  $\longrightarrow$ R=1 $\cdot$ 0 $\cdot$ 11 $\cdot$ 010 $\cdot$ 0
- A=1011010, B=01, AB=101101001, AB $\pi$ =10110100, B $\in \nu$ (AB $\pi$ );  $\longrightarrow$ R=1 $\cdot$ 0 $\cdot$ 11 $\cdot$ 010 $\cdot$ 01
- A=1011010, B=010, AB=1011010010, AB $\pi$ =101101001, B $\in \nu$ (AB $\pi$ );  $\longrightarrow$ R=1 $\cdot$ 0 $\cdot$ 11 $\cdot$ 010 $\cdot$ 010

- A=1011010, B=0100, AB=10110100100, AB $\pi$ =1011010010, B $\in \nu$ (AB $\pi$ );  $\longrightarrow$ R=1 $\cdot$ 0 $\cdot$ 11 $\cdot$ 010 $\cdot$ 0100
- A=1011010, B=01001, AB=101101001001, AB $\pi$ =10110100100, B $\in \nu(AB\pi)$ ;  $\longrightarrow$ R=1 $\cdot$ 0 $\cdot$ 11 $\cdot$ 010 $\cdot$ 01001
- A=1011010, B=010011, AB=1011010010011, AB $\pi$ =101101001001, B $\notin \nu$ (AB $\pi$ );  $\longrightarrow$ R=1·0·11·010·010011· .....

Симболом · одвајају се различити обрасци. Ако овај поступак поновимо до краја низа, издвојиће се следећи обрасци:

### 1, 0, 11, 010, 010011, 0100100111, 01001001100, 010

Последњи образац представља остатак. Бројач комплексности у овом случају износи c(N) = 8 а може се примјетити да Колмогоровљва комплексност добијена помоћу овог алгоритма води рачуна о редослиједу појављивња вриједности у серији [11].

Још један примјер Лемпел - Зивовог алгоритма за низ:

### 100010011010111

Ако се запетом одвоји сваки подниз који раније није уочен онда је резултат партиције следећи:

### 1, 0, 00, 10, 01, 101, 011, 1

Партиција може да се представи бинарним дрветом, као што је приказано на Слици 4.1. Низови који су садржани у партицији путем Лемпел - Зивовог алгоритма представљени су црним чворовима, на поменутом бинарном дрвету, док су бијели чворови низови који нису садржани у партицији. Сваки чвор је тачно једно појављивање низа (последњи може бити понављен већ виђени чвор).

Када је компресија низа велика тада је комплексност мала, што се представља дугачким, раштрканим бинарним дрветом. Комплексност низа је велика када је компресија низа мања, то јест када је бинарно дрво краће, са гушће попуњеним нивоима. Уколико су сви поднизови потомци исте гране онда је компресија низа највећа.



Слика 4.1: Лемпел - Зивов алгоритам за низ: 100010011010111. Извор: [13]

### 4.2 Трчећа комплексност

Уколико посматрамо временске серије са великим бројем података могуће је испитивати унутрашњу структуру комплексности датог низа, односно, рачунати комплексност у одређеним дијеловима (подскуповима) временске серије. Подскуп је дефинисан као прозор ширине NM (Додатак А).

Код ради на следећи начин:

Потребно је дефинисати 'ширину прозора', односно посматрати одређени интервал података, који шетамо кроз посматрану временску серију. Најинтересантнији резултати се добијају ако прозор шетамо од почетка до краја временске серије (Помоћу DO петље по KK шетамо се од почетка до краја временске серије, а помоћу DO петље по KC посматрамо шта се дешава унутар посматраног прозора).

Бројач комплексности који добијамо на начин који је објашњен у претходном потпоглављу, рачуна се за изабрану ширину прозора, до краја временске серије. Као резултат добијамо ход комплексности, а добијени резултати су приказани у Поглављу 6.

# 4.3 Фуријеова анализа посматраних временских серија

Према теорији Фуријеових редова, сваку периодичну функцију или сигнал можемо развити у Фуријеов ред, односно, представити збиром бесконачно много синусних и косинусних функција. Дефиниција Фуријеовог реда, за неку функцију која је периодична на интервалу од a до b, са периодом L дата је следећот формулот:

$$f(x) = \frac{1}{L} \sum_{n = -\infty}^{\infty} f_n e^{\frac{i2\pi nx}{L}}$$

Инверзна формула је:

$$f_n = \int_a^b f(x) e^{\frac{-i2\pi nx}{L}} dx$$

Ово важи за периодичне функције. Идеја Фуријеове трансформације је да видимо шта се дешава уколико немамо периодичну функцију. За било коју апериодичну функцију можемо рећи да ће се поновити у бесконачности, тј. у овом случају,  $a \to -\infty \ b \to \infty$  тј.  $L \to \infty$ , а  $\frac{2\pi n}{L}$  замијенићемо са  $\omega$  односно:

$$\frac{1}{L}\sum_{n} \longrightarrow \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} d\omega$$

па можемо записати Фуријеову трансформацију (FT) функције f(x), као:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)^{-i\omega x} dx$$
(4.2)

а инверзна Фурије трансформација је:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)^{i\omega x} d\omega$$
(4.3)

FT пар се често пише као  $f(x) \leftrightarrow F(\omega)$  или као  $\mathcal{F}(f(x)) = F(\omega)$ , гдје је  $\mathcal{F}$  оператор Фурије трансформације. FT трансформише улазну функцију која је нпр. функција времена (мјереног у секундама) и лежи у временском домену у другу функцију која лежи у фреквенцијском домену ( $\frac{1}{s} = Hz$ ) и мијења базисне функције у синусе и косинусе.

### Дискретна Фуријеова трансформација

Дискретна Фуријеова трансформација (discrete Fourier transform, DFT) је једна од најчешће коришћених трансформација у дигиталној обради сигнала. Она омогућава да се дискретни периодични сигнал представи сумом синусоидалних компоненти, придружујући свакој компоненти одговарајућу амплитуду и фазни помјерај. Фуријеова трансформација дискретног апериодичног сигнала израчуната у коначном броју тачака на основном периоду  $[0, 2\pi)$  заправо представља DFT. Помоћу DFT се дискретан апериодичан сигнал коначног трајања из домена дискретног времена трансформише у дискретну апериодичну секвенцу коначног трајања у спектралном или фреквенцијском домену. Општа формула за рачунање DFT је:

$$A_k = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-i\frac{2\pi}{N}kn} a_n \tag{4.4}$$

гдје је N број еквидистантних одабирака спектра дискретног сигнала, на учестаностима  $\omega = \frac{2\pi}{N}$ .

Чешће се среће запис облика:

$$A_k = \sum_{n=0}^{N-1} W_N^{kn} a_n \tag{4.5}$$

Израз  $a_n$  је инверзна дикретна Фуријеова трансформација израза  $A_k$ . Формула за инверзну DFT:

$$a_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} W_N^{-kn} A_k \tag{4.6}$$

Формула је<br/>истог облика с тим што су A и aзам<br/>јењене улоге, као и k и n. Експонент ко<br/>дW је негативан и постоји фактор нормализациј<br/>е $\frac{1}{N}$ испред израза.

## Примјер: DFT за двије тачке

N = 2

$$W_2 = e^{-i\pi} = -1$$
$$A_k = \sum_{n=0}^{1} (-1)^{k \cdot 0} a_0 + (-1)^{k \cdot 1} a_1 = a_0 + (-1)^k a_1$$

$$A_0 = a_0 + a_1 + a_2 + a_3$$
$$A_1 = a_0 - ia_1 - a_2 + ia_3$$

# Примјер : DFT за четири тачке

$$N = 4$$

$$W_4 = e^{\frac{-i\pi}{2}} = -i$$

$$A_k = \sum_{n=0}^3 (-i)^{k \cdot n} a_n = a_0 + (-i)^k a_1 + (-i)^{2k} a_2 + (-i)^{3k} a_3 = a_0 + (-i)^k a_1 + (-1)^k a_2 + i^k a_3$$

$$A_0 = a_0 + a_1 + a_2 + a_3$$

$$A_1 = a_0 - a_1 - a_2 + ia_3$$

$$A_2 = a_0 - a_1 + a_2 - a_3$$

$$A_3 = a_0 + ia_1 - a_2 - ia_3$$

Да би А израчунали брже модификује се претходни израз:

$$A_0 = (a_0 + a_2) + (a_1 + a_3)$$
$$A_1 = (a_0 - a_2) - i(a_1 - a_3)$$
$$A_2 = (a_0 + a_2) - (a_1 + a_3)$$
$$A_3 = (a_0 - a_2) + i(a_1 - a_3)$$

Треба нагласити да је свако сабирање или множење овдје комплексна операција. Ако искористимо следећи дијаграм за комплексно множење и сабирање



онда за четири тачке дијаграм (који се због изгледа назива и лептир - *butterfly*) изгледа:



Слика 4.2: Дијаграм тока лептир FFT алгоритма за N = 4 тачака

### Брза Фуријеова трансформација FFT

FFT је брзи алгоритам за рачунање DFT. Уколико се посматра DFT за двије тачке и за четири тачке и генерализује за 8 тачака, 16 тачака, ...,  $2^r$ тачака, добија се FFT алгоритам. FFT је заправо скуп метода које користе особине симетрије које постоје у рачунању DFT и на тај начин повећавају ефикасност израчунавања. Да би се израчунао DFT за израз од N тачака коришћењем једначине 4.5 потребно је  $O(N^2)$  множења и сабирања, док FFT алгоритам рачуна DFT коришћењем  $O(N \log N)$  множења и сабирања [15].

FFT алгоритам разлаже DFT на различите етапе, при чему се број етапа рачуна као :  $N_{etapa} = \frac{\log N}{\log 2}$ . Ако посматрамо N = 8 тачака, као на слици изнад, онда ће алгоритам бити подјељен на три етапе; за N = 16 алгоритам ће бити подјељен на 4 етапе, итд. Свака етапа садржи одређени број лептира, на примјеру од N = 8 тачака прва етапа садржи 4 групе лептира, а свака група по двије тачке које се везују у једног лептира; друга етапа садржи 2 групе, свака група садржи по 4 тачке кооје се везују у два преплетена лептира; трећа етапа садржи једну групу са 8 тачака које су повезане у 4 преплетена лептира. Дакле, суштина је да се одређени сигнал дужине N раставља на два подниза дужине N/2, а сваки подниз се истим поступком разбија на два подниза упола мање дужине и поступак се понаља док крајњи поднизови не буду имали по два елемента.

Постоји много различитих варијанти FFT алгоритма. На Слици 4.3 је приказан дијаграм тока лептир FFT алгоритма за N=8 посматраних тачака, при чему је

$$W = W_8 = e^{-i\pi/4} = (1-i)/\sqrt{2}$$



Слика 4.3: Дијаграм тока лептир FFT алгоритма за ${\cal N}=8$ тачака

### 5 Коришћени подаци

Подаци коришћени у овом раду преузети су са сајта Института за физику у Београду, а изглед поменуте web - странице дат је на Слици 5.1. Ови подаци заправо представљају одброј честица у току одређеног времена, мјерен сцинтилационим детектором.



Слика 5.1: Web страница са које су преузети подаци: http://147.91.87.156/cgi-bin/bcrs.

Посматрана је временска серија од 01.01.2014. до 01.01.2017. године. Треба нагласити да дата временска серија није непрекидна, постоје вриједности које су изостављене из различитих разлога (инструменталних или због потреба да се дата опрема ангажује на другим мјерењима). Такође, уклоњени су 'лоши' подаци, првенствено они чија је вриједност била 0 или знатно нижа/виша од просјечне вриједности цјелокупне серије.

Сирови подаци пролазе различите корекције - корекцију детекторског система, корекцију у односу на притисак и корекцију у односу на температуру [10] . У овом раду коришћени су подаци који су били доступни; сирови и они који су кориговани у односу на притисак. На Слици 5.2 приказана је временска серија 5 - минутних сума одброја честица. На горњем панелу приказани су сирови подаци док су на доњем панелу подаци који су кориговани у односу на притисак. У току 5 минута детектује се око 50000 честица.



Слика 5.2: 5-минутна сума одброја честица; сирови подаци - горњи панел; подаци који су кориговани у односу на притисак - доњи панел.

Може се примјетити да су амплитуде варијације космичког зрачења мање на доњем панелу, тј. код података који су кориговани у односу на притисак, што може да се објасни чињеницом да су приликом корекције отклоњене варијације притиска које доприносе укупној варијацији сирових података. На Слици 5.3 приказана је временска серија часовних сума одброја честица, при чему се за сат времена детектује око 600000 честица. Горњи панел показује сирове податке док су на доњем панелу подаци који су кориговани у односу на притисак. И овдје се може примјетити да су амплитуде варијације космичког зрачења мање на доњем панелу, тј. код података код којих је извршена корекција у односу на притисак, што може да се протумачи на исти начин као у претходном случају.



Слика 5.3: Чсовне суме одброја честица; сирови подаци - горњи панел; подаци који су кориговани у односу на притисак - доњи панел.

Усредњене дневне суме одброја честица добијене су тако што су сабране сатне вриједности и подјељене са бројем мјерења за дати дан (пошто су подаци непотпуни, тј. постоје дани код којих нису забиљежена мјерења у сваком сату). На Слици 5.4 приказана је временска серија усредњених дневних сума одброја честица, и то за сирове податке (горњи панел) и за податке који су кориговани у односу на притисак (доњи панел).



Слика 5.4: Усредњена дневна сума одброја честица; сирови подаци - горњи панел; подаци који су кориговани у односу на притисак - доњи панел

Одброј детектованих честица је максималан зими а минималан током љета, а није утврђено одаке потиче пад интензитета космичког зрачења који може да се уочи на све три слике, а јавља се у мају 2016. године.

# 6 Добијени резултати и дискусија

Комплексност посматраних система испитивана је помоћу кода који је дат у Додатку А, док је Фуријеова анализа вршена помоћу програма који је направио професор Илија Арсенић, чија је употреба демонстрирана на следећој слици:



Слика 6.1: Програм за Фурије анализу; улазни подаци - горњи панел; нормализоване амплитуде - доњи панел

Након учитавања података црта се график директних података као што је приказано на горњем панелу а резултати анализе на којима су приказане нормализоване амплитуде дати су на доњем панелу.

### 6.1 Комплексност временских серија

На Слици 6.2 приказана је комплексност временских серија приказаних на Слици 5.2. у - оса графикона показује број различитих образаца који се појављују у серији, а на х - оси је посматрани временски период. Графикони су цртани у Grace - у, а кроз добијене резултате провучен је и покретни просјек, како би се боље уочио ход комплексности. На обје слике могу се уочити максимуми комплексности који се јављају у јулу/августу, и минимуми који се јављају зими, у јануару/фебруару. Комплексност код података који су кориговани у односу на притисак је већа, али је амплитуда хода комплексности мања.



Слика 6.2: Трчећа комплексност за 5 - минутне вриједности; сирови подаци - горњи панел, и подаци који су кориговани у односу на притисак - доњи панел

Исти ход комплексности може се уочити на Слици 6.3 на којој је приказана комплексност временских серија часовних сума одброја честица. На доњем панелу су подаци који су кориговани у односу на притисак и чији ход комплексности се прилично поклапа са ходом комплексности сирових података (горњи панел). И у овом случају се може уочити већа комплексност а мање амплитуде варијације комплексности код података код којих је извршена корекција у односу на притисак.



Слика 6.3: Трчећа комплексност за сатне вриједности; сирови подаци - горњи панел, и подаци који су кориговани у односу на притисак - доњи панел

Нешто другачији ход комплексности добија се уколико се користе усредњени дневни подаци. Као што може да се уочи на слици испод, јављају се додатни минимуми и максимуми. Максимуми комплексности јављају се у августу/септембру и фебруару/марту посматраних година, док се минимуми јављају у мају/јуну и децембру.



Слика 6.4: Трчећа комплексност за уседњене дневне вриједности; сирови подаци - горњи панел; подаци који су кориговани у односу на притисак - доњи панел

На претходно приказаним сликама у овом поглављу уочава се да је ход комплексности код података који су кориговани на притисак и сирових података приближно исти, док је комплексност код података који су кориговани на притисак већа. Дакле, код података коригованих на притисак амплитуда варијације интензитета зрачења је мања али је комплексност већа. Могуће објашњење за овакав резултат је да сам поступак корекције података на притисак носи одређене особине које утичу на то да се комплексност временске серије података коригованих на притисак повећа.

# 6.2 Фуријеова анализа посматраних временских серија и испитиваних комплексности

За испитивање периодичности посматраних временских серија и израчунате комплексности коришћен је програм који је направљен на Пољопривредном факултету Универзитета у Новом Саду, од стране професора Илије Арсенића а који се базира на брзој Фуријеовој трансформацији. Треба нагласити да су варијабилност флукса космичког зрачења и квази - периодичности које су повезане са тим ефектом још увијек предмет изучавања. Добијени резултати су приказани у следећим табелама.

У Табели 2 може се видјети да је најизраженија амплитуда са периодом од 365 дана а затим са периодом од  $\approx 27$  дана, и код сирових података и код података коригованих на притисак. Поред њих, уочавају се квази - периодичности са периодима од 219,  $\approx 9$ ,  $\approx 55$ , и  $\approx 122$  дана код сирових података и  $\approx 13$ ,  $\approx 137$ ,  $\approx 17$ ,  $\approx 548$  и  $\approx 64$  дана, код података који су кориговани на притисак.

Табела 2: Нормализоване амплитуде комплексности 5 - минутних вриједности; лијево - сирови подаци; десно - подаци кориговани на притисак

Бр. дана	Нормализоване амплитуде	Бр. дана	Нормализоване амплитуде
365.0	112.02204000	365.0	53.23064162
26.1	47.75287053	28.1	29.78478428
34.2	40.93128853	12.9	27.47449161
219.0	36.12009816	136.9	27.20343394
8.8	34.82191012	17.4	27.09028828
54.8	34.04528462	547.5	26.98843020
121.7	33.76885195	64.4	26.21065454

У радовима везаним за испитивање периодичности интетнзитета космичког зрачења показано је да временска промјена интетнзитета космичког зра-

чења показује и квази - периодичност, са средњим периодом од 27 дана. Ова периодичност је у вези са Сунчевом ротацијом која има период од 27 дана, и посљедица је промјене интензитета соларног космичког зрачења. Оваква квази - периодичност уочава се и код промјене комплексности испитиваних временских серија.

Бр. дана	Нормализоване амплитуде	Бр. дана	Нормализоване амплитуде
365.0	40.17842826	547.5	34.67799311
91.3	17.72685985	219.0	31.79165833
121.7	11.99013310	52.1	24.29326039
60.8	11.25900173	99.5	22.88839934
1095.0	11.06951190	273.8	19.57298533
273.8	10.87923047	182.5	17.88598253

Табела 3: Нормализоване амплитуде комплексности сатних вриједности; лијево - сирови подаци; десно - подаци кориговани на притисак

Табела 4: Нормализоване амплитуде комплексности усредњених дневних вриједности; лијево - сирови подаци; десно - подаци кориговани на притисак

Бр. дана	Нормализоване амплитуде	Бр. дана	Нормализоване амплитуде
219.0	14.10574850	1095.0	16.51774129
1095.0	13.58883938	182.5	15.90714366
156.4	9.95357169	136.9	14.86475435
365.0	8.64460283	219.0	14.58295047
547.5.	6.29162458	365.0	10.95008535
182.5	4.42256853	156.4	10.76365330

У Табели 3 уочава се да је најизраженија амплитуда комплексности сатних сума одброја честица са периодом од 365 дана, затим од  $\approx 91$ ,  $\approx 122$ , 60, 1095 и  $\approx 274$  дана код сирових података а код података коригованих на притисак са периодом од 547.5 дана, затим 219, 52,  $\approx 100$  дана,  $\approx 274$  и 182 дана.

У Табели 4 уочава се да је најизраженија амплитуда комплексности усредњених дневних сума одброја чстица са периодом од 219 дана, затим од 1095, 156, 365,  $\approx$  548 и 182 дана код сирових података а код података коригованих на притисак са периодом од 1095 дана, затим 182, 137, 219, 365 и  $\approx$  157 дана.

H. Mavromichalaki at al. у раду [16] испитивао је податке везане за мониторинг неутрона тражећи периоде од неколико мјесеци до 11 година. Идентификовани су сигнали са максималним амплитудама са 3, 4, 4.5, 5.2, 7.1, 8.4, 9.1, 10 мјесеци, годину дана и 1.7 година. Квази - периодичност временске промјене интензитета космичког зрачења, са периодима од  $\approx$  170 дана година, као и  $\approx$  150 дана уочена је у радовима [18], [19].

Периодичности које се појављују код испитивања комплексности а дате су у претходним табелама, од  $\approx 90$ ,  $\approx 120$ ,  $\approx 135$  и  $\approx 548$  дана у сагласности су са већ осмотреним периодичностима варијације интензитета космичког зрачења.

Периодичност комплексности од  $\approx 150$  поклапа се са периодичности која је уочена у раду [20] а везана је за варијације у броју Сунчаних пјега. Треба споменути да је амплитуда соларне активности временски зависна и показује периодичне и апериодичне одлике. Периодично појављивање Сунчевих пјега у 11 - годишњим циклусима доводи до повећања јачине магнетног поља што доводи до скретања наелектрисаних честица на путу ка унутрашњости соларног систма, односно, смањења интензитета космичког зрачења које улази у Земљину атмосферу. Нерегуларности локалних Сунчевих догађаја, бакљи и ерупција, изазивају и нерегуларности тока соларног вјетра и магнетног поља које је са њим у вези.

Квази - периодичност комплексности испитиваних серија са периодом од 547.5 дана у сагласности је са периодичностима временске промјене интетнзитета космичког зрачења, ( $\approx 1.2 - 1.7$  година) која су уочене у радовима [17], [19]. Периодичност комплексности од  $\approx 210$  која се поклапа са периодичности варијације интензитета космичког зрачења, која је испитивана у раду [21], везана је за варијације спољашњег магнетног поља.

Нарочиту пажњу треба обратити на периодичност чији је период 1095 (3 године) и 182 дана (око пола године) и која се јавља код комплексности података који су кориговани на притисака чије објашњење још увијек није познато.

### 7 Закључак

У овом раду је испитивана комплексност временских серија космичког зрачења које су мјерене у Нискофонској лабораторији Института за физику у Београду, као и постојање периодичности код комплексности испитиваних временских серија.

Комплексност је испитана помоћу кода који је дат у Додатку А, а добијени резултати, приказани у Потпоглављу 6.1 показују ход комплексности у току посматране три године. Уколико се упореде комплексности сирових података и података код којих је извршена корекција на притисак може се уочити то како корекција података на притисак доводи до смањења амплитуде варијације интензитета космичког зрачења али до повећања комплексности код коригованих података.

За добијене вриједности комплексности временских серија извршена је Фуријеова анализа, помоћу програма који се заснива на FFT алгоритму, са циљем испитивања постојања периодичности код комплексности. Добијени резултати показују слагања са испитивањима периодичности временских промјена интензитета космичког зрачења која су рађена раније, у многим радовима.

Слагања код периодичности говоре у прилог да је овакав поступак испитивања временских серија обећавајући и њиме се могу отворити нека нова питања на која још немамо одговор али која указују на чињенице које постоје. Овај приступ би могао наћи примјену не само у овој области физике, већ и у многим другим.

# 8 Биографија

Снежана Костић је рођена 03. јануара 1993. године у Фочи, Република Српска, Босна и Херцеговина. Основну школу Веселин Маслеша завршава у Фочи као ђак генерације, а потом и гимназију у Фочи, као носилац Вукове дипломе.

Након завшрене средње школе уписује Физику, смјер Метеорологија, на Природно - математичком факултету у Новом Саду. Основне студије завршава 2016. године и исте те године уписује мастер студије Метеорологије. Полаже све испите предвиђене планом и програмом у јулу наредне године и приступа писању овог рада.



Као студент била је учесник великог броја фестивала и промоција физике као науке.

### Литература

- [1] Peter K. F. Grieder, Cosmic Rays at Earth: Researchers Reference Manual and Data Book. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 2001.
- Интернет страница: http://www.telescopearray.org/index.php/history/ introduction-to-cosmic-rays?showall=&start=1. Последњи пут приступљено страници 24.10.2017. године у 11h 52 min.
- [3] A. Dimitrievska, Vremenska spektroskopija nuklearnih reakcija kosmičkih miona, Diplomski rad, Novi Sad, 2010.
- [4] Дејан Јоковић, Детекција и спетроскопија миона из космичког зрачења пластичним сцинтилационим детекорима, Докторска дисертација, Београд, 2011.
- [5] De Mendonca, R. R. S., J. -P. Raulin, E. Echer, V. S. Makhmutov, and G. Fernandez, Analysis of atmospheric pressure and temperature effects on cosmic ray measurements, J. Geophys. Res. Space Physics, 118, 1403–1409, 2013.
- [6] H. M. Mok, K. M. Cheng, The Day night Variation of Cosmic Rays Intensity at Sea Level Under the Influence of Meteorological Fronts and Troughs, Cornell University Library, 2001.
- [7] P. Theodorsson, Measurement of Weak Radioactivity, World Scientific Publishing Co Pte Ltd, Singapore, 1997.
- [8] A. Dragić, THE NEW SET-UP IN THE BELGRADE LOW-LEVEL AND COSMIC-RAY LABORATORY, Nuclear & Technology Radiation Protection, Vol. 26, No. 3, pp.181-192, 2011.
- [9] N. Veselinović, A. Dragić, D. Maletić, D. Joković, M. Savić, R. Banjanac, V. Udovičić, and I. Aničin, Cosmic rays muon flux measurements at Belgrade shallow underground laboratory, AIP Conference Proceedings, Vol 1645, pp.421-425, 2015.
- [10] M Savić, D Maletić, D Joković, N Veselinović, R Banjanac, V Udovičić, A Dragić, Pressure and temperature effect corrections of atmospheric muon data in the Belgrade cosmic - ray station, Journal of Physics, 2015.
- [11] G. Mimić, Nelinearna dinamička analiza fizičkih procesa u životnoj sredini, Doktorska disertacija, Novi Sad, 2016.

- [12] G. Mimić, D. T. Mihailović, D. Kapor, Complexity analysis of the air temperature and the precipitation time series in Serbia, Theoretical and Applied Climatology, 2015.
- [13] S. C. Evans, J. E. Hershey and G. Saulnier, Kolmogorov Complexity Estimation and Analysis, Sixth World Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando, Florida, USA, 2002.
- [14] M. Hutter, Algorithmic Kolmogorov Complexity, Scholarpedia, 2008.
- [15] P. Heckbert, Fourier Transforms and the Fast Fourier Transform (FFT) Algorithm, Computer Graphics 2, 15-463, 1995.
- [16] H. Mavromichalaki, P. Preka-Papadema, B. Petropoulos, I. Tsagouri, S. Georgakopoulos, and J. Polygiannakis, J. Low and high frequency spectral behavior of cosmic-ray intensity for the period 1953-1996 Annales Geophysicae 21, 1681-1689 2003.
- [17] A. Joshi, Cosmic ray periodicity at 170 days, Sol. Phys. 185, 397-403, 1999.
- [18] K. Kudela, H. Mavromichalaki, A. Papaioannou, M. Gerontidou, On Mid -Term Periodicities in Cosmic Rays, Solar Phys,173 - 180, 2010.
- [19] A. Dragić, R. Banjac, V. Udovičić, D. Joković, J. Puzović, I. Aničin, Periodic Variations of CR Muon Intensity in the Period 2002 - 2004, Proceedings of the 21st European Cosmic Ray Symposium, Slovakia, 2008.
- [20] E. Rieger, G.H. Share, D.J. Forrest, G. Kanbach, C. Reppin, and E.L. Chup,-Nature 312, 623, 1984.
- [21] P. Kunagu, G. Balasis, V. Lesur, E. Chandrasekhar and C. Papadimitriou, Geophysical Journal International, 192, 946–950, 2013.

### Додатак А

```
PROGRAM COMPLEXITY
PARAMETER (N1=28638,N=N1,NM=500)
CHARACTER *30 infile(4),outfile(4)
DIMENSION S(NM),IS(NM)
DIMENSION T(N1),A(N1),RN(N1),B(N1)
DIMENSION TA(NM), TB(NM), TS(NM)
!_____
                       ------!
!======READ INPUT DATA ========!
!______
infile(1)='podaci.dat'
  OPEN (2,FILE='OUTPUT.DAT')
  OPEN (3,FILE='kompleksnost.dat')
  OPEN (1,FILE=infile(1))
N2=0
10 READ (1,*,end=101)RN(N2)
n2=n2+1
GOTO 10
101 Print *,N2
CLOSE(1)
  KM=N1
  DO KK = 1, KM, 10
\mathrm{KC} = \mathrm{nm}/2 + \mathrm{KK}
  DO LL = 1, NM
TA(LL) = RN(KC - NM/2 + LL)
ENDDO
  rma=MAXVAL(TA)
rmi=MINVAL(TA)
TB = (TA-rmi)/(rma-rmi)
\mathrm{TS}=\mathrm{TB}
SUMA = SUM(TS) / NM
  is = 0
  DO \mathrm{II}=1 , NM
IF (TS(II) .GE. SUMA) IS(II) = 1
ENDDO
   CALL KOLMOGOROV(IS,NM,COMP)
WRITE (2,*)FLOAT(Kc),COMP
WRITE (3,'(F10.5)') COMP
  ENDDO
END
  SUBROUTINE KOLMOGOROV(IS,N,COMP)
DIMENSION IS(n)
\mathbf{C} = \mathbf{0}
```

```
L = 1
```

I = 0K = 1KMAX = 1ISTOP = 0DO WHILE ( ISTOP .EQ. 0 ) IF ( IS(I+K) .NE. IS(L+K) ) THEN ! print \*,is(i+k),is(l+k) IF (K.GT.KMAX) KMAX = K I = I + 1IF (I.EQ.L) THEN  $\mathbf{C}=\mathbf{C}+\mathbf{1}$ L = L + KMAXIF ((L+1).GT.N) THEN ISTOP = 1ELSE  $\mathbf{I} = \mathbf{0}$ K = 1KMAX = 1ENDIF ELSE K = 1ENDIF ELSE K = K + 1IF ((L+K).GT.N) THEN C = C + 1ISTOP = 1ENDIF ENDIF ENDDO !\_\_\_\_\_ !===== CALCULATING COMPLEXITY ========! B = FLOAT(N)B = B \* LOG10(2.0) / LOG10(B) $! \text{ COMP} = C / \dot{B}$  $\operatorname{COMP} = \operatorname{C}$ !\_\_\_\_\_ 

END

### УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ ПРИРОДНО - МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

### КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број: РБР

Идентификациони број: ИБР

Тип документације: <b>Т</b> Д	Монографска документација
Tun записа: ТЗ	Текстуални штампани материјал
Врста рада: <b>ВР</b>	Мастер рад
Aymop: AY	Снежана Костић
Ментор: <b>МН</b>	Илија Арсенић
Наслов рада: НР	Анализа комплексности временских серија космичког зрачења мјереног у Нискофонској лабораторији Инсти- тута за физику у Београду
Језик публикације: ЈП	српски (ћирилица)
Језик извода: ЈИ	српски/енглески
Земља публиковања:	Република Србија
Λ	7

### ЗП

Уже географско подручје: УГП	Војводина
Година: ГО	2017
Издавач: ИЗ	Ауторски репринт
Место и адреса: МА	Природно - математички факултет, Трг Доситеја Обрадовића 4, Нови Сад
Физички опис рада: ФО	8 поглавља, 46 страна, 21 референца, 4 табеле, 18 слика
Научна област: НО	Физика
Научна дисциплина: НД	Метеорологија
Предметна одредница/ кључне речи: ПО	Космичко зрачење, Колмогоровљева комплексност, трчећа комплексност, Фуријеова трансформација, FFT, пе-
УДК	риодичност
Чува се: ЧУ	Библиотека департмана за физику, ПМФ-а у Новом Саду
Важна напомена: ВН	нема
Извод: ИЗ	У овом раду је испитивана комплек- сност временских серија космичког зрачења које су мјерене у Нискофон- ској лабораторији Института за фи- зику у Београду, као и постојање пе- риодичности код комплексности ис-

ђењем комплексности сирових података и комплексности података код којих је извршена корекција на притисак уочава се да корекција података на притисак доводи до смањења амплитуде варијације интензитета космичког зрачења и до повећања комплексности код коригованих података. Фуријеова анализа комплексности временских серија показала је постојање периодичности код анализирања комплексности. Добијени резултати показују слагања са испитивањима периодичности временских промјена интетнзитета космичког зрачења која су позната од раније. Датум прихватања теме од НН 25.10.2017. већа: ДП Датум одбране: 31.10.2017. ДО Чланови комисије: KO Председник: др Миодраг Крмар, редовни професор на Природно-математичком факултет Универзитета у Новом Саду др Илија Арсенић, ванредни профементор: сор Пољопривредног факултета Универзитета у Новом Саду др Петар Мали, доцент на Департчлан: ману за Физику Природно - математичког факултета у Новом Саду

питиваних временских серија. Поре-

### UNIVERSITY OF NOVI SAD FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

### **KEY WORDS DOCUMENTATION**

Accession	number:
ANO	

Identification number: INO

Document type: DT	Monograph publication
Type of record: <b>TR</b>	Textual printed material
Content code: CC	Master thesis
Author: $\mathbf{AU}$	Snežana Kostić
Mentor: MN	prof. dr Ilija Arsenić
Title: <b>TI</b>	Complexity Analysis of the Cosmic Ray time series measured by the Low Background Laboratory at Belgrade Institute of physics.
Language of text: LT	Serbian/ Cyrillic
Language of abstract: LA	Serbian/ English

Country of publication: CP	Republic of Serbia
Locality of publication: LP	Vojvodina
Publication year: <b>PY</b>	2017
Publisher: <b>PU</b>	Authors reprint
Publication place: <b>PP</b>	Faculty of Science and Mathematics, Novi Sad
Physical description: <b>PD</b>	8 chapters, 46 pages, 21 literature, 4 tables, 18 pictures
Scientific field: SF	Physics
Scientific discipline: SD	Meteorology
Subject/ Key words: SKW	Cosmic rays, Kolmogorov complexity, running complexity, Fourier Transform,
UC	FF1, periodicity
Holding data: HD	Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4
Note: N	none
Abstract: AB	In this thesis was analysed complexity of the Cosmic Ray time series, measured by the Low Background Laboratory at Belgrade Institute of physics and the

	existence of periodicity in the complexity of the examined time series. By comparing the complexity of the raw data and the complexity of the data in which the correction to the pressure is made, it is noted that the correction of the data to the pressure reduces the amplitudes of the variation of the intensity of cosmic radiation and increases complexity in the corrected data. Fourier's analysis of the complexity of estimated time series showed the existence of periodicity. The obtained results are in agreement with the studies of the periodicity of time changes in the intensity of cosmic ray.
Accepted by the Scientific Board on: ASB	25.10.2017.
Defended on: <b>DE</b>	31.10.2017.
Thesis defend board: DB	
President:	Ph.D Miodrag Krmar, full professor at Faculty of Science in Novi Sad
Mentor:	Ph.D Ilija Arsenić, associate professor at Faculty of Agriculture in Novi Sad
Member:	Ph.D Petar Mali, assistant professor at the Department of Physics, Faculty of Science in Novi Sad