

## M-კლასის ჯუჯა ვარსკვლავების სასიცოცხლო ზონაში მდებარე ეგზოპლანეტების ატმოსფეროს აღმოჩენის რაოდენობრივი სიმულაცია

ანდრია ჯაფარიძე

ქ. თბილისის No165 საჯარო სკოლის X კლასის მოსწავლე

**რეზიუმე.** მიღებულია, რომ მზის მსგავსი G-ტიპის ვარსკვლავების გარშემო მოძრავი ეგზოპლანეტების ატმოსფეროსთან შედარებით უფრო მარტივია მცირე ზომის, ცივი M-კლასის ჯუჯა ვარსკვლავების გარშემო მოძრავი ეგზოპლანეტების ატმოსფეროს შესწავლა, ვინაიდან სპეციალური ინტერაქტიული ტრანზიტის სიმულატორის გამოყენების შედეგად ჩატარებულმა კვლევამ აჩვენა, რომ M-კლასის სისტემის ატმოსფერული სიგნალი გაძლიერებულია დაახლოებით 77-ჯერ.

### 1. შესავალი

მეოცე საუკუნის ბოლომდე ცნობილი იყო მხოლოდ ერთადერთი პლანეტური სისტემა – მზის სისტემა. გაჩნდა თუ არა იდეა, რომ ვარსკვლავები - შორეული მზეებია, წარმოიქმნა მოსაზრება მათ ირგვლივ ეგზოპლანეტების და მათზე სიცოცხლის შესაძლო არსებობის შესახებ. ვარსკვლავთა სიშორისა და შესაბამისი ტექნიკური საშუალებების არ არსებობის გამო, მხოლოდ მეოცე საუკუნის 90-იანი წლებიდან მოხერხდა სხვადასხვა (პირდაპირი თუ ირიბი) საშუალებების გამოყენებით ეგზოპლანეტების დაკვრევა.

რამოდენიმე ათასი ეგზოპლანეტის აღმოჩენის შედეგად დაიწყო მათი მახასიათებლების შესწავლა. თანამედროვე კვლევების მიზანია იმ ეგზოპლანეტების მოძიება, რომელთაც გააჩნიათ ატმოსფერო და სადაც შესაძლებელია სიცოცხლის არსებობა (ე.წ. "ბიოსიგნატურები"). სწორედ ამ მიზნით შეიქმნა ჯეიმს უების კოსმოსური ტელესკოპი (JWST), რომელიც იყენებს ტრანსმისიული სპექტროსკოპიის მეთოდს. ვარსკვლავის დისკოზე ეგზოპლანეტის ტრანზიტის დროს მისი ატმოსფერო ახდენს ვარსკვლავის სპექტრის ფილტრაციას და მიღებული სპექტრის ანალიზი საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ ეგზოპლანეტის ატმოსფეროს შემადგენლობა (Seager & Sasselov, 2000).

დედამიწის ზომის ეგზოპლანეტის ატმოსფეროდან მომდინარე სიგნალი უკიდურესად სუსტია, ვინაიდან თხელი ატმოსფერო ეგზოპლანეტის ტრანზიტის სიღრმეს მხოლოდ უმცირეს ნაწილს მატებს. მზის მსგავსი ვარსკვლავის ირგვლივ მოძრავი დედამიწის მსგავსი ეგზოპლანეტისთვის, ატმოსფერული სიგნალი მილიონის რამდენიმე ნაწილს შეადგენს (ppm), რაც ყველაზე თანამედროვე ტელესკოპების შესაძლებლობების ზღვარზეა. ეს კი წარმოშობს შეკითხვას: რომელი ტიპის ვარსკვლავური სისტემები იძლევა ეგზოპლანეტების ატმოსფეროს შესწავლის საუკეთესო შანსს? სავარაუდოდ, ძირითად სამიზნეს უნდა წარმოადგენდეს M-კლასის

ჯუჯა ვარსკვლავები, რომლებიც მზესთან სედარებით ბევრად უფრო მცირე ზომის და შედარებით ცივია.

ჩვენ შევეცადეთ გამოგვეკვლია "M-კლასის ჯუჯა ვარსკვლავთა უპირატესობა". კვლევის ძირითად მიზანს წარმოადგენდა, თუ რამდენჯერ იზრდება დედამიწის მსგავსი ეგზოპლანეტის ატმოსფერული სიგნალი მზის მსგავს ვარსკვლავთან შედარებით, როდესაც იგი ტიპიური M-კლასის ჯუჯა ვარსკვლავის სასიცოცხლო ზონაში მოძრაობს? ამ კითხვაზე პასუხისათვის შეიქმნა ახალი ინტერაქტიული სიმულატორი მოდელირებისა და შესადარებელი მონაცემების მისაღებად.

## 2. მეთოდოლოგია

კვლევის ჩასატარებლად შეიქმნა ტრანზიტის სიკაშკაშის მრუდის სიმულატორი (ნაშრომის ფარგლებში შექმნილი პროგრამა ხელმისაწვდომია Imperatori228-ს Github გვერდზე შემდეგი ლინკით: <https://github.com/Imperatori228/Interactive-Exoplanet-Transit-Simulator>) Python-ში, numpy, matplotlib და batman ბიბლიოთეკების გამოყენებით. batman პაკეტი არის პროფესიონალური ინსტრუმენტი, რომელსაც ასტრონომები იყენებენ სწრაფი და ზუსტი ტრანზიტის მოდელირებისთვის (Kreidberg, 2015). სიმულატორი შეიქმნა ორი განსხვავებული სისტემის მოდელირებისთვის:

1. **G-ტიპის სისტემა:** დედამიწის ანალოგიური ეგზოპლანეტა, რომელიც მზის მსგავსი ვარსკვლავის ( $1.0 R_{\odot}$ ,  $1.0 M_{\odot}$ ) გარშემო ბრუნავს მისი სასიცოცხლო ზონის ცენტრში ( $\sim 1.0 \text{ AU}$ ).
2. **M-ტიპის სისტემა:** დედამიწის ანალოგიური ეგზოპლანეტა, რომელიც ტიპიური M-კლასის ჯუჯა ვარსკვლავის ( $0.12 R_{\odot}$ ,  $0.08 M_{\odot}$ ) გარშემო ბრუნავს მის ბევრად უფრო მცირე ზომის სასიცოცხლო ზონის ცენტრში ( $\sim 0.04 \text{ AU}$ ).

მეთოდის ძირითადი არსი მდგომარეობს ატმოსფერული სიგნალის გამოთვლაში, რაც განისაზღვრება როგორც ტრანზიტის სიღრმის სხვაობა ეგზოპლანეტის მყარ სხეულად და ატმოსფერული ფენით მოდელირებას შორის.

$$\text{ატმოსფერული სიგნალი (ppm)} = \frac{\text{სიღრმე\_ატმოსფეროთი (ppm)}}{\text{სიღრმე\_მყარი\_სხეულით (ppm)}}$$

სიმულატორს აქვს ინტერაქტიული სლაიდერები, რაც იძლევა პარამეტრების შესწავლის საშუალებას სხვადასხვა პირობებში მიღებული შედეგების მდგრადობის შესამოწმებლად. მომხმარებელს შეუძლია შეცვალოს:

**პლანეტის რადიუსი ( $0.5 - 2.5 R_{\oplus}$ ):** მარსის ზომიდან სუპერ-დედამიწამდე ეგზოპლანეტების მოდელირებისთვის.

**ატმოსფეროს სიმაღლე ( $10 - 200 \text{ კმ}$ ):** თხელი ან დაბალი სიმკვრივის ფართო ატმოსფეროების მქონე (ე. წ. გაბერილი) ეგზოპლანეტების სიმულაციისთვის.

**სასიცოცხლო ზონის პოზიცია:** პლანეტის გადასატანად სასიცოცხლო ზონის შიდა (ცხელი) არიდან გარე (ცივ) კიდემდე, რაც არეგულირებს ორბიტის პერიოდსა და ტრანზიტის გეომეტრიას.

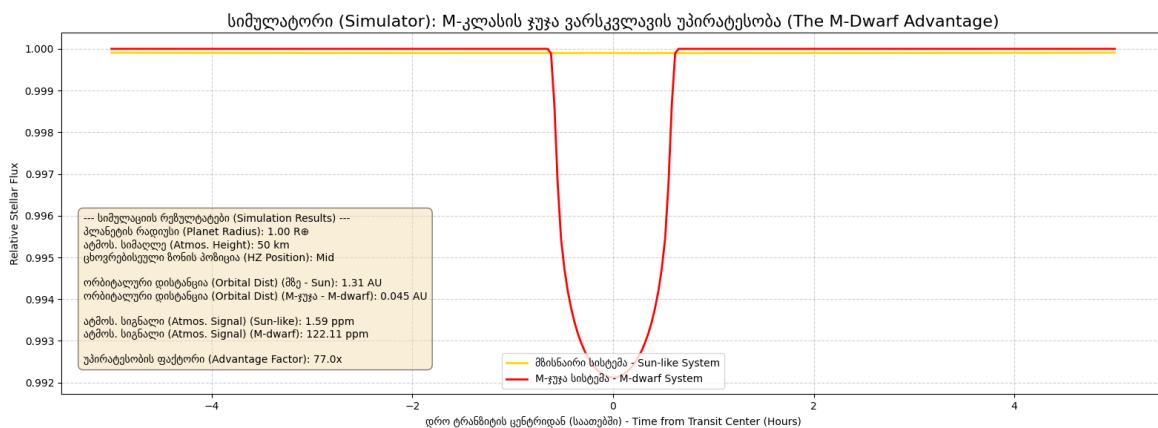
ორივე ტიპის სისტემაში ატმოსფერული სიგნალის შედარებით სხვადასხვა პარამეტრების დიაპაზონში, "უპირატესობის ფაქტორი" შეიძლება პირდაპირ იქნას გამოთვლილი (დიდის მცირესთან შეფარდებით).

### 3. კვლევის შედეგები

ნაშრომში გამოკვლეული იქნა "M-კლასის ჯუჯა ვარსკვლავების უპირატესობის" - ჰიპოთეზა იმის შესახებ, რომ ატმოსფეროს აღმოჩენა უფრო მოსახერხებელია მცირე ზომის, ცივი M-კლასის ჯუჯა ვარსკვლავების გარშემო მოძრავი ეგზოპლანეტებისთვის, ვიდრე შედარებით დიდი, მზის მსგავსი G-ტიპის ვარსკვლავების გარშემო მოძრავი ეგზოპლანეტებისთვის. შედეგნილმა სპეციალურმა ინტერაქტიულმა ტრანზიტის სიმულატორმა Python-ში BATMAN პაკეტის გამოყენებით ამ სცენარის მოდელირებისთვის მოგვცა საშუალება ორივე ტიპის ვარსკვლავის შემთხვევათაათვის მოგვეხდინა დედამიწის მსგავსი ეგზოპლანეტის ტრანზიტის სიმულაცია.

#### 3.1. საბაზისო სცენარი: დედამიწის ანალოგი

საბაზისო სიმულაცია ჩატარდა ეგზოპლანეტისთვის  $1.0 R_{\oplus}$  რადიუსით და 50 კმ ეფექტური ატმოსფეროს სიმაღლით, თითოეული ვარსკვლავის სასიცოცხლო ზონის შუაში. მიღებული სიკაშკაშის მრუდები წმოდგენილია ნახ. 1-ზე.



ნახ. 1. მზის მსგავსი ვარსკვლავისა (ყვითელი) და M-ტიპის ჯუჯა ვარსკვლავს (წითელი) გარშემო მოძრავის დედამიწის მსგავსი ეგზოპლანეტების ტრანზიტის სიკაშკაშის მრუდები.

ნახ. 1-ზე კარგად მოჩანს, რომ ტრანზიტის სიღრმე დრამატულად უფრო დიდია M-ჯუჯა სისტემაში, რადგან ეგზოპლანეტა ბლოკავს მცირე ზომის ვარსკვლავის სინათლის უფრო დიდ ნაწილს.

ამ საბაზისო გაშვების რაოდენობრივი მონაცემები იყო ძლიერ განსხვავებული. მზის მსგავსი სისტემისთვის ატმოსფერული სიგნალი იყო მხოლოდ 1.59 ppm. M-ჯუჯა სისტემისთვის სიგნალი იყო 122.11 ppm. ეს წარმოადგენს 77-ის ტოლ უპირატესობის ფაქტორს.

### 3.2. პარამეტრების შესწავლა

სხვადასხვა პლანეტარული თვისებების ეფექტის შესამოწმებლად, მოდელირდა ორი დამატებითი სცენარი: "სუპერ-დედამიწა" ( $1.6 R_{\oplus}$ ) და დაბალი სიმკვრივის ფართო ( $150 \text{ კმ}$  სიმაღლის, ე. წ. გაბერილი) ატმოსფეროს მქონე ეგზოპლანეტა. შედეგები შეჯამებულია ცხრილში 1.

ცხრილი 1: ატმოსფერული სიგნალების შედარება სხვადასხვა პლანეტარული სცენარების მიხედვით.

პარამეტრები	ეგზოპლ. რადიუსი ( $R_{\oplus}$ )	ატმოს. სიმაღლე (კმ)	მზისმგ. სიგნალი (ppm)	M-ჯუჯას სიგნალი (ppm)	უპირატესობის კოეფიციენტი
საბაზისო	1.0	50	1.59	122.11	77.0x
სუპერ-დედამიწა	1.6	50	2.53	194.55	76.8x
გაბერილი ატმ.	1.0	150	4.79	369.19	77.0x

ყველა სცენარში, ატმოსფერული სიგნალი M-კლასის ჯუჯა ვარსკვლავის სისტემაში იყო თანმიმდევრულად 77-ჯერ უფრო ძლიერი, ვიდრე მზის მსგავსი ვარსკვლავის სისტემაში. მიუხედავად იმისა, რომ ეგზოპლანეტის ზომის ან ატმოსფეროს სიმაღლის გაზრდამ გაზარდა სიგნალი ორივე ტიპის სისტემისთვის, ფარდობითი უპირატესობა რჩებოდა მუდმივი, რაც აჩვენებს ამ გეომეტრიული ეფექტის ფუნდამენტურ ბუნებას.

დედამიწის გარეთ სიცოცხლის ძიება დამოკიდებულია შორეული ეგზოპლანეტების ატმოსფეროების მახასიათებლების შესწავლაზე. ტრანზიტის მეთოდი, ტრანსმისიულ სპექტროსკოპიასთან ერთად წარმოადგენს ძლიერ ინსტრუმენტს ამ მიზნის მისაღწევად. დედამიწის მსგავსი ატმოსფეროთი წარმოქმნილი ძალიან სუსტი სიგნალი მნიშვნელოვნად ართულებს ეგზოპლანეტების ატმოსფეროების შესწავლას. ამ კვლევამ რაოდენობრივად აჩვენა, რომ ატმოსფერული სიგნალი გაძლიერებულია დაახლოებით 77-ჯერ M-კლასის ჯუჯა სისტემაში. ეს შედეგი იძლევა მკაფიო, რაოდენობრივ საფუძველს ჯეიმს უების კოსმოსური ტელესკოპის (JWST) მსგავსი

ობსერვაციების სტრატეგიული ფოკუსირებისთვის M-კლასის ჯუჯა ვარსკვლავების პლანეტურ სისტემებზე. სამომავლოდ შესაძლებელია სიმულატორი გაფართოვდეს და დაემატოს სხვადასხვა ფუნქციები (როგორიცაა რელეის გაფანტვის (ნისლის) მოდელირება ან კონკრეტული მოლეკულების, როგორიცაა წყალი ( $\text{H}_2\text{O}$ ) და მეთანი ( $\text{CH}_4$ ) სიმულირებული ტრანსმისიული სპექტრების შექმნა. ასევე შეიძლება დაემატოს ვარსკვლავური ლაქების და ინსტრუმენტური ხმაურის სიმულაცია).

#### გამოყენებული ლიტერატურა:

- a) Kreidberg, L. (2015). batman: BAsic Transit Model cAlculation in Python. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 127(957), 1161.
- b) Seager, S., & Sasselov, D. D. (2000). Theoretical Transmission Spectra during Extrasolar Giant Planet Transits. The Astrophysical Journal, 537(2), 916–921.