

ქეთევან ტატიშვილი

ფიზიკა

11

მოსწავლის წიგნი

II ნაწილი

გრიფინიჭებულია საქართველოს განათლებისა და მეცნიერების
სამინისტროს მიერ 2023 წელს



ქეთევან ტატიშვილი

ფიზიკა 11

მოსწავლის წიგნი

II ნაწილი

რედაქტორები

ლალი ბაქრაძე

სოლომონ ნოზაძე

კონსულტანტ – რედაქტორი

ფიზიკის აკადემიური დოქტორი

ქეთევან სადრაძე

დიზაინი და დაკაბადონება

ალექსანდრე ჯიქურიძე

გარეკანის დიზაინი

ნინო ხვინგია, ალექსანდრე ჯიქურიძე

© გამომცემლობა „დიოგენე“, 2023, I გამოცემა

ყველა უფლება დაცულია

ISBN 978-9941-11-805-0

გამომცემლობა „დიოგენე“ – თბილისი, აფაქიძის ქ. 9

ტელეფონი 221 33 21

[www. diogene.ge](http://www.diogene.ge)

შინაარსი

II ნაწილი

თემა III. გეოგრაფიული მდებარეობა

„წითელი წანაცვლება“	7
3.1. შესავალი: სინათლე - ელექტრომაგნიტური ტალღა	12
პროექტი №6: კამერა - ობსკურა	20
3.2. სინათლის წრფივი გავრცელება	23
3.3. სინათლის არეკვლა	30
პროექტი №7: ატმოსფერული მირაჟი	41
3.4. სინათლის გარდატეხა	43
3.5. ლინზები	55
პროექტი №8: ლინზები – ხიდი შეუცნობლისკენ	63
3.6. გამოსახულების აგება ლინზაში	67
შეამოწმე შენი ცოდნა. ტესტი №3.....	76
III თემის დამატებითი კითხვები, ამოცანები	79
IIII თემის მოკლე შინაარსი	86
თემის შემაჯამებელი ტესტების პასუხები	94
დამატებითი კითხვების, ამოცანების პასუხები	94
ფიზიკურ სიდიდეთა ცხრილები.....	96

I ნაწილი

თემა I. ელექტრომაგნიტური მოვლენები

პროექტი №1: „სამხრეთის მაჩვენებელი“

1.1. შესავალი: „მაგნიტზე, მაგნიტურ სხეულებსა და დიდ მაგნიტზე – დედამიწაზე“

1.2. როგორ იწყებოდა ელექტროდინამიკა

პროექტი №2: ელექტრომაგნიტი, „მოლაპარაკე ელვა“ და სხვა

1.3. დენიანი გამტარის მაგნიტური ველი

პროექტი №3: მუდმივი დენის ელექტროძრავა

1.4. ამპერის კანონი

1.5. ფიზიკა ამოცანებში: ამპერის ძალა

1.6. ნივთიერების მაგნიტური თვისებები

1.7. ლორენცის ძალა

1.8. ფიზიკა ამოცანებში: ლორენცის ძალა

1.9. ფარადეის ცდები

1.10. ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონი

1.11. ფიზიკა ამოცანებში: ინდუქციის ელექტრომამოძრავებელი ძალა

1.12. თვითინდუქცია

შეამოწმე შენი ცოდნა. ტესტი №1

I თემის დამატებითი კითხვები, ამოცანები

I თემის მოკლე შინაარსი

თემა II. რხევები და ტალღები

პროექტი № 4: „ფიზიკა გულისცემის ხმით“

2.1. მექანიკური რხევა

2.2. ჰარმონიული რხევა

2.3. რეზონანსი

2.4. ფიზიკა ამოცანებში: ქანქარიანი საათი

2.5. მექანიკური ტალღა

პროექტი №5: „თიხა მღერის“

2.6. ბგერითი ტალღები

2.7. ტალღური მოვლენები

2.8. ფიზიკა ამოცანებში: დოპლერის ეფექტი

2.9. თავისუფალი ელექტრული რხევები

2.10. ცვლადი დენის გენერატორი

2.11. ცვლადი დენის წრედი

2.12. ტრანსფორმატორი

2.13. ელექტრომაგნიტური ტალღები

2.14. ელექტრომაგნიტური ტალღების სკალა

შეამოწმე შენი ცოდნა. ტესტი №2

II თემის დამატებითი კითხვები, ამოცანები

II თემის მოკლე შინაარსი

სახელმძღვანელოში მოცემული მასალა თქვენგან აქტიურ მონაწილეობას მოითხოვს. ამ მიზნით მასში ჩართულია მრავალფეროვანი სავარჯიშოები, რომელთაგან ნაწილს მასწავლებლის ხელმძღვანელობით მთელი კლასი ერთად შეასრულებს, ნაწილი კი ინდივიდუალური, წყვილებში და ჯგუფური მუშაობისათვის არის განკუთვნილი. მათი ამოცნობა არ გაგიჭირდებათ, რადგან თითოეული მათგანი წიგნში შესაბამისი სიმბოლოთი (ლოგოთი) არის აღნიშნული:

1.2.1

დავლების ნომერი (მაგ., I თემის მე-2 პარაგრაფის დავალება 1).



ინდივიდუალური სამუშაო
წყვილებში სამუშაო



ჯგუფური სამუშაო



ცდის ჩატარება სიფრთხილეს მოითხოვს!



საინტერესო,
დამატებითი ინფორმაცია

ცდის ჩატარებისას საჭირო აღჭურვილობა:



წინსაფარი



ნიღაბი



ხელთათმანები



მექანიკური დაზიანებისგან დამცავი სათვალე



გამოსხივებისგან დამცავი სათვალე

გამაფრთხილებელი ნიშნები



ცხელი ზედაპირი



მომწამვლელი ნივთიერება



ცეცხლსაშიშა



ვარდნილი სხეულების საფრთხე



მსხვერვადი ჭურჭელი



მჩხვლეტავი საგნები



სტატიკური ელექტრობა



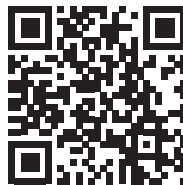
ლაზერის გამოსხივება

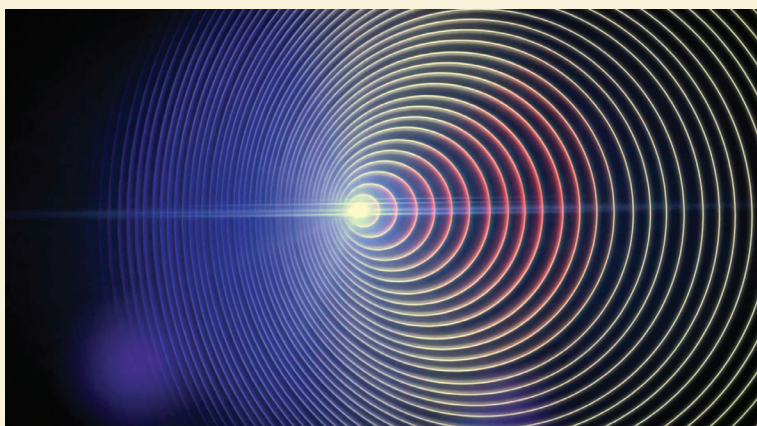
ელექტრული დენის საფრთხე:



წიგნის ინტერაქტიული ვებ-გვერდი შეგიძლია ნახო შემდეგ მისამართზე:
<https://physica.ge/books/phys-XI/>

გვერდზე განთავსებულია წიგნში გამოყენებული ყველა ონლაინ რესურსი (ვირტუალური ლაბორატორია, ვიდეო, დამატებითი ტექსტური ინფორმაცია), ის ინტერაქტიული ანიმაციები, რომლებიც სპეციალურად წიგნისთვის შეიქმნა.





სურ. 1

ამბოზენ, ამერიკელი ფიზიკოსი და გამომგონებელი **რობერტ უილიამს ვუდი (1868 – 1955)**, რომელმაც მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანა სინათლის ბუნების კვლევასა და ოპტიკის განვითარებაში, ერთხელ მოძრაობის წესების დარღვევისთვის, საგზაო პოლიციამ გააჩერა. ავტომობილით სწრაფად მიმავალი ვუდი შუქნიშნის წითელ სიგნალს არ დაემორჩილა და გზა განაგრძო. პოლიციელმა ურჩი მძღოლი მაინც გააჩერა და ჯარიმის გამოწერა დააპირა.

ვუდმა უხერხული მდგომარეობიდან გამოსვლა სცადა:

„... მომიტევეთ სერ, მაგრამ ჩემი ბრალი არ არის, – მიმართა მან პოლიციელს – მოძრაობისას შუქნიშნის წითელი სიგნალი მწვანედ აღვიქვი და ამაში მე დამნაშავე არ ვარ. ეს დოპლერის ეფექტია...“

იმასაც ამბობენ, რომ ვუდმა სცადა, კიდევ უფრო დაწვრილებით აეხსნა დოპლერის ეფექტის „დანაშაული“, მაგრამ აღმოჩნდა, რომ პოლიციელიც საკმაოდ კარგად ერკვეოდა ფიზიკაში და რობერტ ვუდს ჯარიმა **სიჩქარის გადაჭარბებისთვის გამოუწერა**.

რამდენად შეესაბამება ეს ამბავი სიმართლეს, არავინ იცის, მაგრამ **დოპლერის ეფექტის გავლენა სინათლის ფერზე, სინამდვილეა**, ოღონდ ერთი შესწორებით – ავტომობილი, რომლის მძღოლს შეიძლება წითელი ფერი მწვანედ მოეჩვენოს, სულ მცირე, **37 500 კმ/წმ** სიჩქარით უნდა მოძრაობდეს.

სხვათა შორის, ეს ფაქტი არც დოპლერმა გაითვალისწინა, როცა **1842 წელს** ბგერითი ტალღის სიხშირის ცვლილება შეამჩნია და აღმოჩენით აღფრთოვანებულმა დაუფიქრებლად განაცხადა:

– რადგან ბგერის სიხშირე იცვლება, როცა ბგერის წყარო და მიმღები ერთმანეთის მიმართ მოძრაობს, ცხადია, ელექტრომაგნიტური ტალღების სიხშირეც შეიცვლება, თუ ტალღების წყარო და დამკვირვებელი ერთმანეთის მიმართ მოძრაობს. სწორედ ამაში იმალება საიდუმლო, თუ რატომ ანათებენ ვარსკვლავები სხვადასხვაფერად. ყველა მათგანის გამოსხივებული სინათლე თეთრი ფერისაა და მხოლოდ იმიტომ, რომ ისინი ჩვენ მიმართ სწრაფად მოძრაობენ, მათ სინათლეს სხვადასხვაფერად აღვიქ-

ვამთ: იმ ვარსკვლავების სინათლის ტალღის სიგრძე, რომლებიც გვიახლოვდება, მოკლდება (სიხშირე იზრდება) და მათ სინათლეს მწვანე, ლურჯად და იისფრად აღვიქვამთ, იმ ვარსკვლავების სინათლე კი, რომლებიც გვშორდება, წითლად გვეჩვენება.

დოპლერის ეს მოსაზრება სიმართლეს არ შეესაბამება. იმისათვის, რომ ადამიანის თვალმა ვარსკვლავის შეფერილობის ცვლილება (რომელიც ვარსკვლავის მოძრაობის შედეგადაა გამოწვეული) აღიქვას, ვარსკვლავი ჩვენ მიმართ უზარმაზარი სიჩქარით (დაახლოებით, ათეულ ათასობით კმ/წმ-ში) უნდა მოძრაობდეს, თუმცა საკმარისი არც ეს არ არის.

საქმე იმაშია, რომ ვარსკვლავის მოახლოებისას, თუ, მაგ., მწვანე სინათლე ცისფრად, ცისფერი იისფრად გარდაიქმნება, ეს იმას ნიშნავს, რომ ხილული სინათლის მთელი სპექტრი იისფერი ბოლოსკენ წანაცვლებს: იისფერი ულტრაიისფერის ადგილს დაიკავებს, ინფრანითელი – წითლისას და ა.შ. ყველა ეს „ფერი“ სპექტრში ისევ დარჩება და მიუხედავად, „საყოველთაო“ გადანაცვლებისა, თვალი ვარსკვლავის სინათლეში ცვლილებას ვერ დაინახავს, მას მაინც თეთრი ფერის სინათლედ აღიქვამს.

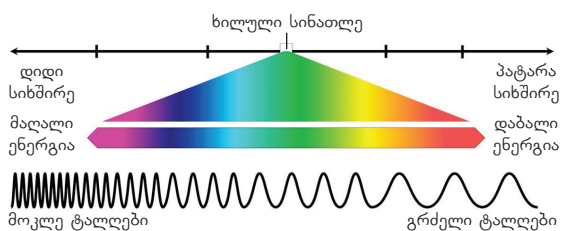
ადამიანის თვალით დანახული ვარსკვლავის ფერი (სურ. 2) ვარსკვლავის ტემპერატურითაა განპირობებული და დოპლერის ეფექტს არ უკავშირდება.

სულ სხვა საქმეა, თუ მოძრავი ვარსკვლავის მიერ გამოსხივებული სინათლის **სპექტრალურ ანალიზს** ჩაატარებ. **სპექტროსკოპს** შეუძლია სინათლის „ფერის“ სულ ოდნავი ცვლილებაც კი აღრიცხოს მოძრავი ვარსკვლავის გამოსხივების სპექტრში. დაადგინოს, უფრო „განითლდა“ (სპექტრის წითელი ბოლოსკენ წანაცვლდა) თუ უფრო იისფერი გახდა (სპექტრის იისფერი ბოლოსკენ წანაცვლდა) ვარსკვლავის გამოსხივება.



სურ. 2

„ფერის“ ცვლილება გამოსხივების სიხშირის (ტალღის სიგრძის) ცვლილებას უკავშირდება. სიხშირის (ტალღის სიგრძის) მიხედვით, შესაძლებელია იმ სიჩქარის გაზომვა, რა სიჩქარითაც ვარსკვლავი გვშორდება (ან გვიახლოვდება). სიჩქარის ცოდნა კი მეცნიერებს საშუალებას აძლევს, ვარსკვლავებამდე მანძილები გამოთვალონ.



სურ. 3

წითელი წანაცვლება – ასე ჰქვია მოვლენას, როცა ელექტრომაგნიტური ტალღის (სინათლის) სიგრძე იზრდება და, შესაბამისად, მისი სიხშირე მცირდება.

გაიხსენე: ხილული სინათლის სპექტრში წითელი ბოლოსკენ ელექტრომაგნიტური ტალღის სიხშირე მცირდება და, შესაბამისად, ტალღის სიგრძე იზრდება (სურ.3).

წითელი წანაცვლების საპირისპირო მოვლენა **იისფერი წანაცვლება**ა: ელექტრომაგნიტური ტალღის (სინათლის) სიგრძე მცირდება და, შესაბამისად, მისი სიხშირე იზრდება.

რა არის **წითელი** და **იისფერი** წანაცვლების გამომწვევი მიზეზი? მეცნიერებაში **წითელი** და **იისფერი** წანაცვლების გამომწვევი სამი მიზეზია ცნობილი და ამ მიზეზებს სახელები შინარსის შესაბამისად ჰქვია:

1. დოპლერის წითელი წანაცვლება;
2. კოსმოლოგიური წითელი წანაცვლება;
3. გრავიტაციული წითელი წანაცვლება.

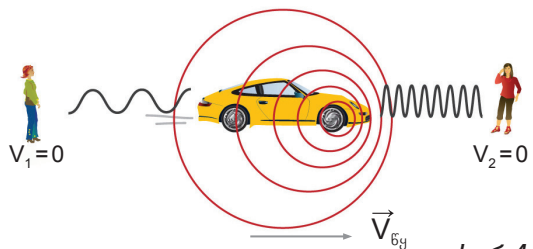
დოპლერის წითელი წანაცვლება

არცთუ ისე იშვიათად ხდება, რომ აღმოჩენა ერთსა და იმავე მეცნიერების (მაგ., ფიზიკის) სხვადასხვა დარგში (მექანიკაში, ელექტრომაგნიტიზმში, ოპტიკაში და ა.შ.), მეტიც, სხვადასხვა სამეცნიერო სფეროში (ფიზიკაში, მათემატიკაში, ასტრონომიაში, ბიოლოგიაში, ქიმიაში და ა.შ.), სრულიად მოულოდნელად, განსხვავებული დარგისა თუ სფეროს წარმომადგენლებს ახალი, მათთვის გაუგებარი მოვლენის ახსნაში ეხმარება. ასე მოხდა ამჯერადაც...

სანამ უშუალოდ მოვლენას განვიხილავთ, კიდევ ერთხელ დავაზუსტოთ: როცა საუბარია ვარსკვლავის ფერზე, ეს სპექტრალური ანალიზის შედეგად დგინდება და არა ადამიანის თვალით. ზოგჯერ შეიძლება მეტაფორულად გამოვიყენოთ კიდევ **ადამიანი – დამკვირვებელი**, მაგრამ ვგულისხმობთ მხოლოდ **სპექტროსკოპის მიერ აღქმულ სინათლეს**.

ვარსკვლავები (მათ შორის ჩვენი მზეც) სინათლეს უწყვეტ სპექტრში, იისფერიდან წითელი სინათლის ჩათვლით, გამოსახივებს, თუმცა აღმოჩნდა, რომ **რაც უფრო შორსაა ვარსკვლავი, მით უფრო „წითელია“ მისი სინათლე**, მით უფრო წანაცვლებულია სპექტრის წითელი ბოლოსკენ; **რაც უფრო ახლოსაა, მისი სინათლე – უფრო „იისფერია“**.

გაიხსენე (სურ. 4): გზის პირას მდგომს გეჩვენება, რომ იმ მანქანის სიგნალი, რომელიც თანდათან გიახლოვდება, სხვადასხვა ტონალობისაა: რაც უფრო შორსაა მანქანა, მის სიგნალს უფრო დაბალი სიხშირის ბგერად აღიქვამ და მანქანის მოახლოებასთან ერთად შენ მიერ აღქმული ბგერის სიხშირე იზრდება.



სურ. 4

სწორედ დოპლერის ეფექტი დაეხმარა ასტროფიზიკოსებს **წითელი წანაცვლების** მოვლენის ახსნაში – ეფექტი, რომელიც თავად დოპლერმა ერთ ჩვეულებრივ დღეს თევზაობისას აღმოაჩინა, როცა წყლის ზედაპირზე ტალღების გავრცელებას აკვირდებოდა.

წარმოიდგინე (სურ. 5): შენ უძრავი დამკვირვებელი ხარ და A წერტილში იმყოფები. ვარსკვლავი გშორდება. დოპლერის ეფექტის თანახმად, შენ მიერ (სპექტრალური ანალიზით!) აღქმული ელექტრომაგნიტური ტალღის სიხშირე იკლებს (სიგრძე იზრდება). ვარსკვლავის სინათლეს ასეთ შემთხვევაში, თანდათან უფრო „წითლად“ აღიქვამ.



სურ. 5

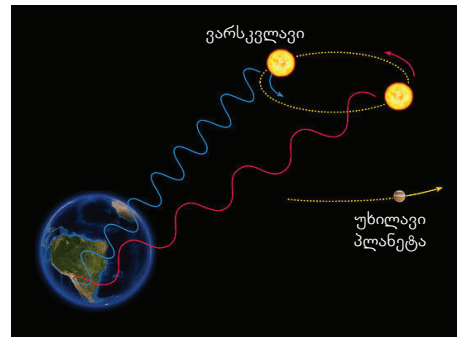
B წერტილში მყოფი დამკვირვებელი კი იმავე ვარსკვლავის სინათლეს უფრო „იისფრად“ აღიქვამს: მას უახლოვდება ვარსკვლავი და მის მიერ აღქმული ელექტრომაგნიტური ტალღის სიხშირე იმატებს (სიგრძე იკლებს). **ნახე ანიმაცია:**



ელექტრომაგნიტური ტალღის სიგრძის გაზრდას (შემცირებას), როცა ვარსკვლავი გშორდება (გვიახლოვდება), **დოპლერის წითელი (იისფერი) წანაცვლება** ჰქვია. **დოპლერის წანაცვლების მიზეზი დამკვირვებლის მიმართ კოსმოსური ობიექტების მოძრაობაა.**

მაგ., ანდრომედას გალაქტიკა დედამიწას 310 კმ/წმ სიჩქარით უახლოვდება. მისგან გამოსხივებული სინათლე სპექტრის იისფერი ბოლოსკენაა წანაცვლებული (მოკლე ტალღოვანია და მაღალი სიხშირის, ანუ მეტი ენერგია გადააქვს). ეს **დოპლერის იისფერი წანაცვლებაა**.

ასტრონომების ყურადღების ქვეშ მოექცა ჩვენი გალაქტიკის (ირმის ნახტომის) ერთ-ერთი ვარსკვლავი. სპექტრალური ანალიზით დადგინდა, რომ ვარსკვლავის სინათლე ზოგჯერ წითლისკენაა წანაცვლებული, ზოგჯერ კი – იისფრისკენ. ანუ, ვარსკვლავი პერიოდულად გვშორდება და გვიახლოვდება (ასეთ შემთხვევაში ამბობენ, რომ „ვარსკვლავი ირხევა“) (სურ. 6). ეს კი იმას ნიშნავს, რომ ვარსკვლავის ახლოს უხილავი კოსმოსური ობიექტია (პლანეტაა), რომელიც ვარსკვლავთან ურთიერთქმედებს, მაგრამ ასტრონომების დაკვირვების არეში არ ჩანს. სწორედ დოპლერის წანაცვლების მიხედვით განსაზღვრეს ასტრონომებმა უხილავი პლანეტის მასა და მისი დაშორება ვარსკვლავიდან.



სურ. 6

კოსმოლოგიური წითელი წანაცვლება

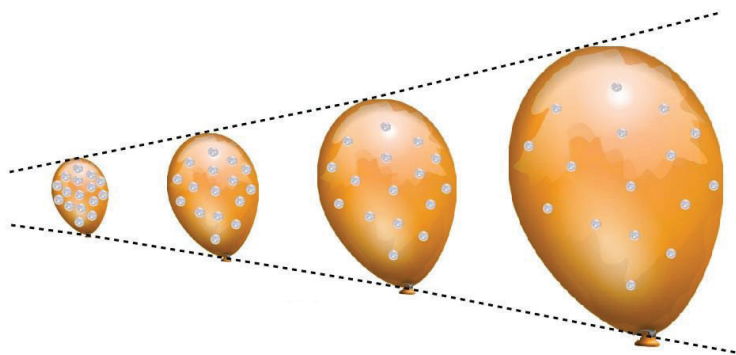
1912 წელს, ლოუელის ობსერვატორიის ასტრონომებმა აღმოაჩინეს, რომ თითქმის ყველა ხილული გალაქტიკის სინათლე სპექტრის წითელი ბოლოსკენაა წანაცვლებული, რაც იმას ნიშნავს, რომ გალაქტიკების უმრავლესობა ჩვენგან „გარბის“... (გამონაკლისი იყო მაგ., ანდრომედას გალაქტიკა, რომელიც გვიახლოვდება). ასტრონომებმა გამოგნებული განცხადება გააკეთეს: **სამყარო ფართოვდება!**

1929 წელს ამერიკელმა ასტრონომმა **ედვინ ჰაბლმა** გალაქტიკების წითელი წანაცვლება შეაფასა და აღმოაჩინა, რომ **რაც უფრო შორსაა გალაქტიკა, მით სწრაფად გვშორდება.** ამ დამოკიდებულებას **ჰაბლის კანონი** ჰქვია.

ჰაბლის კანონის თანახმად, თუ გვეცოდინება წითელი წანაცვლების სიდიდე, შევძლებთ გამოვთვალოთ მანძილი ყველაზე შორეულ და, შესაბამისად, ყველაზე ხანდაზმულ გალაქტიკებამდე. შედეგად კი, სამყაროს თეორიული ასაკი გვეცოდინება. სწორედ ამიტომ, **წითელ წანაცვლებას, რომელიც სამყაროს გაფართოების შედეგია, კოსმოლოგიურ წითელ წანაცვლებას უწოდებენ** (კოსმოლოგია მეცნიერებაა სამყაროს წარმოშობისა და განვითარების შესახებ).

გაითვალისწინე: დოპლერის წანაცვლების დროს ციური ობიექტები ერთმანეთის მიმართ მოძრაობს. კოსმოლოგიური წითელი წანაცვლების დროს კი ისინი არ მოძრაობენ, **ერთმანეთს შორდებიან, რადგან სამყარო ფართოვდება.**

წარმოიდგინე: საჰაერო ბუშტი, რომელზედაც მონეტებია (გალაქტიკებია) მიმაგრებული. ბუშტი თუ მოცულობაში გაიზრდება, თითოეულ მონეტაზე მყოფი დამკვირვებელი დაინახავს, რომ დანარჩენი მონეტები (გალაქტიკები) მას დაშორდება (სურ. 7), მაგრამ არა იმიტომ, რომ მონეტები მოძრაობს, არამედ იმიტომ რომ „ქსოვილი“, რომელზედაც მონეტებია დამაგრებული, გაიწელა, გაფართოვდა. ასეა სამყაროშიც.



სურ. 7

გრავიტაციული წითელი წანაცვლება

წარმოიადგინე: ღრმა ორმოში ხარ. იმისათვის, რომ ორმოდან ამოხვიდე, შენ ენერგია უნდა დახარჯო. ორმოში ჩავარდნისას კი ენერგიას არ ხარჯავ, პირიქით – შეიძენ ვარდნისას.

თუ სინათლე მასიური კოსმოსული ობიექტის ძლიერ გრავიტაციულ ველს ტოვებს („ორმოდან“ ამოდის) და უფრო სუსტი ველისკენ ვრცელდება, მაშინ მისი ენერგია შემცირდება (სიხშირე შემცირდება, ტალღის სიგრძე გაიზარდება) (სურ.8).

შედარებით სუსტ გრავიტაციულ ველში მყოფი „დამკვირვებელი“ ასეთ დროს სინათლეს უფრო „წითლად“ აღიქვამს. ეს **გრავიტაციული წითელი წანაცვლებაა**.

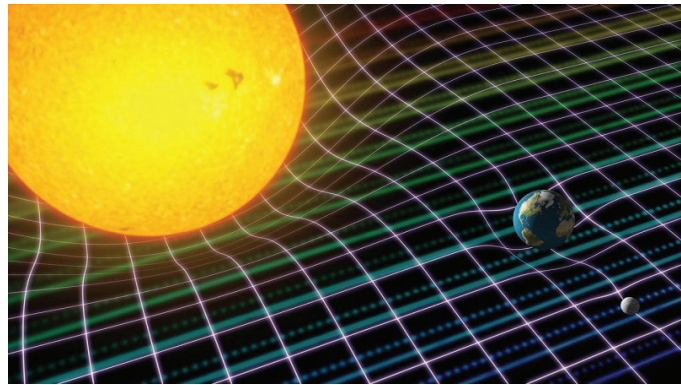
თუ სინათლე სუსტი გრავიტაციული ველიდან ძლიერისკენ ვრცელდება („ორმოში“ ვარდება), მაშინ მისი ენერგია იმატებს (იმატებს სიხშირე, იკლებს ტალღის სიგრძე). უფრო ძლიერ გრავიტაციულ ველში მყოფი „დამკვირვებელი“ კი ასეთ დროს სინათლეს უფრო „იისფრად“ აღიქვამს (სინათლის ფერი სპექტრის იისფერი ბოლოსკენ იქნება წანაცვლებული). ეს **გრავიტაციული იისფერი წანაცვლებაა**.

გრავიტაციული ველის სინათლეზე გავლენა 1911 წელს ალბერტ აინშტაინმა აღწერა თავის სტატიაში, თუმცა ამ მოვლენის შესაძლებლობას მანამდეც არაერთი მეცნიერი განიხილავდა (გრავიტაციული ველი არა მარტო ხილულ სინათლეზე, არამედ გამოსხივების სხვა ფორმებზეც მოქმედებს).

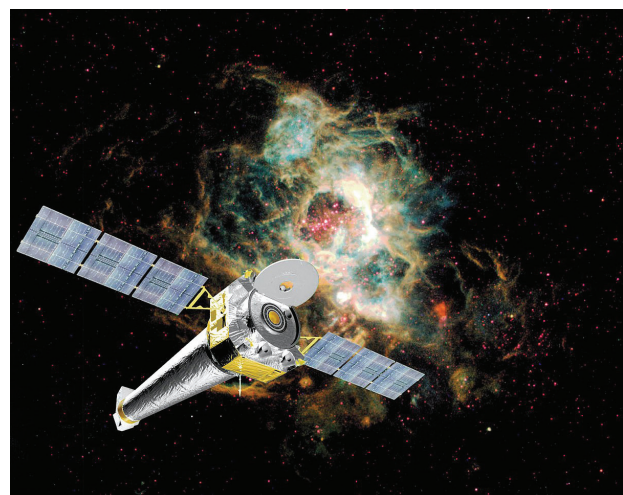
აინშტაინის მიერ ნავარაუდები გრავიტაციული ველის ზემოქმედება სინათლეზე 2020 წელს აღმოაჩინა კანარის კუნძულების ასტროფიზიკის ინსტიტუტის მეცნიერთა საერთაშორისო ჯგუფმა: მთვარის ზედაპირიდან არეკლილი მზის სინათლის სპექტრალურმა ანალიზმა გრავიტაციული წითელი წანაცვლება დაადასტურა...

გრავიტაციული წითელი წანაცვლების მიხედვით ასტრონომები იკვლევენ **თეთრი ჯუჯების** სტრუქტურას (თეთრი ჯუჯები ისეთი ვარსკვლავებია, რომლებმაც თავიანთი ენერგიის მარაგი ამოწურეს, ანათებენ სითბური ენერგიის ხარჯზე. მასით ჩვენს მზეს უტოლდებიან, მაგრამ მათი რადიუსი, დაახლოებით, 100-ჯერ ნაკლებია მზის რადიუსზე), შავი ხვრელების გრავიტაციას და ა.შ.

„ჩანდრა“ ნასას რენტგენის ობსერვატორიაა, რომელიც დედამიწის გარშემო ორბიტაზე მოძრაობს და შორეული კოსმოსური ობიექტების გამოსხივებას იკვლევს (სურ. 9). მისი დახმარებით ასტრონომებმა ჩვენგან 29 000 სინათლის წელიწადის მანძილზე (სინათლის წელიწადი მანძილია, რომელსაც სინათლე წელიწადის განმავლობაში გადის) ორი, ერთმანეთის ირგვლივ მბრუნავი, ვარსკვლავი შეამჩნიეს და მათ სინათლეში გრავიტაციული წითელი წანაცვლება აღმოაჩინეს. რატომაც დედამიწელებისთვის საინტერესო ეს შორეული ვარსკვლავები? აღმოჩნდა, რომ მათი გრავიტაციული წითელი წანაცვლება GPS-ის მუშაობაზე საგრძნობ გავლენას ახდენს.



სურ. 8



სურ. 9

3.1.1. წარმოდგენები სინათლის ბუნების შესახებ

შენ იცი, რომ გარემომცველი სამყაროს შესახებ ინფორმაციას ადამიანი გრძნობათა ორგანოებით აღიქვამს და, თუ გაითვალისწინებ, რომ ამ ინფორმაციის 90%-ს ის მხედველობითი აღქმის შედეგად იღებს, მაშინ, ალბათ, გასაგებია, რატომ უჭირავს ფიზიკის ისტორიაში ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ადგილი სინათლის ბუნების კვლევას – **სხეულებს ხომ მათგან არეკლილი სინათლის მეშვეობით ვხედავთ.**

სინათლის ბუნების კვლევას ჯერ კიდევ ძველი ბერძენი ფილოსოფოსები (არისტოტელე, პითაგორა, ევკლიდე, ემპედოკლე) ცდილობდნენ და თითქმის ყველა იზიარებდა აზრს, რომ სინათლე თვალში წარმოიქმნება და თვალიდან საცეცების მსგავსად გამოსული, გარემოში წარფივად ვრცელდება. როცა სხივი რაიმე სხეულს ხვდება, თვალი შეიგრძნობს – დაინახავს მას ისევე, როგორც შეხებით შევიგრძნობთ სხეულებს.



სინათლის ბუნების მეცნიერული, ექსპერიმენტის შედეგებზე დაფუძნებული კვლევები კი მხოლოდ XVII საუკუნეში იწყება, როცა თითქმის ერთდროულად წარმოიქმნა და პარალელურად ვითარდებოდა ორი მეცნიერული თეორია. ერთი მათგანი ნიუტონის სახელთანაა დაკავშირებული, მეორე კი – ჰიუგენსთან.

ნიუტონის თეორიის მიხედვით, სინათლე უმცირესი ნაწილაკების – კორპუსკულების ნაკადია, რომელიც წყაროდან ყველა მიმართულებით წრფივად ვრცელდება (სურ.3.1.1).

ინერციის კანონის (ნიუტონის I კანონის) დადგენის შემდეგ ნიუტონი სინათლის წრფივ გავრცელებას განიხილავდა, როგორც კორპუსკულების ინერციით მოძრაობას.

ნიუტონის კორპუსკულური თეორია იმ დროისათვის ცნობილ ბევრ ექსპერიმენტულ ფაქტს ხსნიდა.

სურ. 3.1.1.

მაგ., სინათლის არეკვლა, ნიუტონის თეორიის მიხედვით, განიხილებოდა, როგორც დრეკადი ბურთულის არეკვლა დაბრკოლებიდან.

თუმცა იყო მოვლენები, რომლებსაც ნიუტონი სინათლის კორპუსკულური ბუნებით ვერ ხსნიდა, მაგ., სინათლის ორი კონა გადაკვეთისას ერთმანეთზე არ მოქმედებდა, არადა თუ სინათლე კორპუსკულების ნაკადია, მაშინ სინათლის ნაწილაკები ერთმანეთს უნდა ეჯახებოდეს და განიბნეოდეს.

ნიუტონის თანამედროვემ, ჰოლანდიელმა ასტრონომმა და ფიზიკოსმა **კრისტიან ჰიუგენსმა** კორპუსკულური თეორიის პარალელურად წარმოადგინა **სინათლის ტალღური თეორია**. მისი თეორიის თანახმად, სინათლე სფერული ტალღაა, რომელსაც სინათლის წყარო ასხივებს (სურ. 3.1.2) და ყველა მიმართულებით წრფივად ვრცელდება.

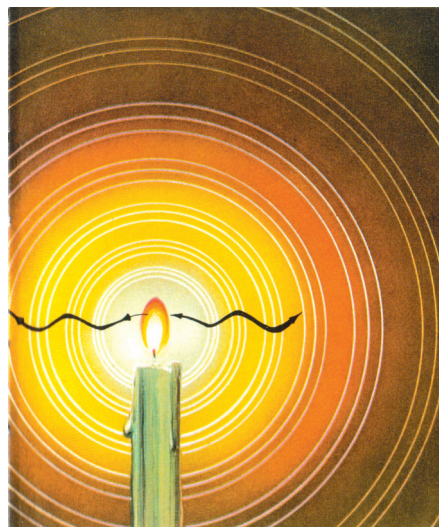
იმ დროს წარმოუდგენლად ეჩვენებოდათ ისეთი ტალღის არსებობა, რომელიც რაიმე გარემოში (იქ სადაც ნივთიერებაა) არ ვრცელდება, ამიტომ ჰიუგენსმა დაუშვა, რომ არსებობს ნივთიერება – **მსოფლიო ეთერი**, რომელიც სამყაროს მთლიანად ავსებს, ყველა სხეულში აღწევს და სინათლის ტალღაც ამ ეთერში ვრცელდება.

უკვე XIX საუკუნის დასაწყისში, სინათლის ტალღური თეორია **იუნგისა და ფრენელის** ძალზე საინტერესო ექსპერიმენტული კვლევებით შეივსო და ტალღური თეო-

რიის სასარგებლოდ უამრავი ახალი არგუმენტი გაჩნდა. ასე რომ, ამ დროისათვის ფიზიკაში უპირატესობა სინათლის ტალღურ თეორიას ენიჭებოდა, მაგრამ მომხრეები ჰყავდა კორპუსკულურ თეორიასაც და საკითხი სინათლის ბუნების შესახებ კვლავ გადაუჭრელი რჩებოდა.

3.1.2. კორპუსკულურ-ტალღური დუალიზმი

XIX საუკუნის მეორე ნახევარში მაქსველმა სინათლის ელექტრომაგნიტურ თეორიას ჩაუყარა საფუძველი, რომლის თანახმადაც, **სინათლე ელექტრომაგნიტური ტალღაა**, ხოლო ჰერცის მიერ ელექტრომაგნიტური ტალღების ექსპერიმენტული აღმოჩენის შემდეგ ეჭვიც არ დარჩა იმის შესახებ, რომ სინათლეს ტალღური ბუნება აქვს. ის ფაქტი, რომ ელექტრომაგნიტური ტალღა ვაკუუმში სინათლის სიჩქარით, 300 000 კმ/წმ-ში, ვრცელდება, სინათლის ტალღური ბუნების შესახებ მაქსველის წინასწარმეტყველებას ამტკიცებდა.



სურ. 3.1.2.

XX საუკუნის დასაწყისში კი სინათლის ბუნების შესახებ წარმოდგენები ძირფესვიანად შეიცვალა. მოულოდნელად აღმოჩნდა, რომ უარყოფილი კორპუსკულური თეორია ისევე შეესაბამება სინამდვილეს, როგორც – ტალღური.

სინათლის ბუნებაზე წარმოდგენების განვითარებაში მნიშვნელოვანი ნაბიჯი 1887 წელს გადაიდგა, როცა ჰერცმა აღმოაჩინა მოვლენა, რომლის დროსაც სინათლის მოქმედებით ნივთიერებიდან ელექტრონების „ამოგლეჯა“ ხდება. ამ მოვლენას **ფოტოელექტრული ეფექტი** (ან უბრალოდ **ფოტოეფექტი**) ეწოდა.

თეორიულად ფოტოეფექტის მოვლენა 1905 წელს XX საუკუნის ერთ-ერთმა უდიდესმა მეცნიერმა ალბერტ აინშტაინმა ახსნა. აინშტაინი იყო პირველი, ვისთვისაც ცხადი გახდა, რომ ფოტოეფექტის ახსნა მხოლოდ **კვანტური თეორიის** პოზიციიდან იყო შესაძლებელი.

აინშტაინის თეორია ეყრდნობოდა მაქს პლანკის მიერ 1900 წელს გამოთქმულ ჰიპოთეზას, რომლის თანახმადაც, გახურებული სხეულის ატომები **ელექტრომაგნიტურ ენერგიას ასხივებენ არა უწყვეტად** (როგორც ამას მაქსველის თეორია ამტკიცებდა), **არამედ – ცალკეული ულუფებით**. ენერგიის ამ ულუფებს პლანკმა **კვანტები** (ლათ. „რაოდენობა“) უწოდა. მისი ჰიპოთეზის თანახმად, თითოეული ასეთი ულუფის, **კვანტის, ენერგია გამოსხივების სიხშირის პირდაპირპროპორციულია:**

$$e = h\nu \quad (3.1.1)$$

პროპორციულობის h კოეფიციენტს შემდგომში **პლანკის მუდმივა** უწოდეს:

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ ჯ} \cdot \text{წმ}.$$

აინშტაინი თანდათან რწმუნდებოდა, რომ სინათლის კვანტები ძალიან მსგავსია იმისა, რასაც სინათლის **კორპუსკულას** (ნაწილაკს) უწოდებდნენ. მან სინათლის კვანტებს **ფოტონი** უწოდა. ფოტოეფექტის ექსპერიმენტულად დადგენილ კანონებში მეცნიერმა იმის დამაჯერებელი დადასტურება დაინახა, რომ **სინათლე გამოსხივებისას და შთანთქმისას სწორედ ისე იქცევა, როგორც კორპუსკულების ნაკადი**. ეს მოულოდნელი შემობრუნება იყო ნიუტონის კორპუსკულური თეორიის სასარგებლოდ, რადგან სინათლის ტალღური ბუნება ექსპერიმენტულად დადასტურებული იყო და მეცნიერებში ეჭვს აღარ იწვევდა. აინშტაინის კვანტური თეორიის თანახმად, **სინათლეს წყვეტილი სტრუქტურა აქვს**. ის

არა მარტო გამოსხივდება ცალკეული ულუფების (ფოტონების) სახით, არამედ ვრცელდება და შთანთქმდება კიდევ ცალკეულ ულუფებად. ამასთან, შთანთქმა შესაძლებელია მხოლოდ მთელი ფოტონის, რომლის ენერგია 3.1.1 ფორმულით განისაზღვრება.

რა არის სინათლე? ტალღაა თუ ნაწილაკების ნაკადი? თანამედროვე ფიზიკა ამ კითხვაზე ასე პასუხობს: **სინათლე ფოტონების ნაკადია, ხოლო ფოტონი – ელექტრომაგნიტური გამოსხივების კვანტია, რომელსაც ერთდროულად აქვს როგორც ტალღური, ისე კორპუსკულური თვისებები.**

ფოტონების კიდევ უფრო თვალსაჩინოდ წარმოდგენა შეუძლებელია, რადგან ჩვენი ყოველდღიური გამოცდილება და თუნდაც ძალიან მდიდარი წარმოსახვა მაკროსკოპული სხეულების აღქმაზეა დაფუძნებული, რომელთა შორის ფოტონების ანალოგი არ მოიძებნება.

ფოტონი განსაკუთრებული ნაწილაკია. ფოტონს არ აქვს მუხტი, არ აქვს მასა და ვაკუუმში მისი მოძრაობის სიჩქარეა 300 000 კმ/წმ. აქვს ენერგია ($E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$) და იმპულსი ($p = \frac{h}{\lambda}$), რომლებიც ჩვეულებრივი მატერიალური ნაწილაკისგან განსხვავებით, ტალღური მახასიათებლებით, **სიხშირით ან ტალღის სიგრძით** განისაზღვრება.

ის ფაქტი, რომ ფოტონებს ერთდროულად ტალღისა და კორპუსკულურის თვისებები ახასიათებს, ნიშნავს, რომ სინათლეს ორმაგი ბუნება აქვს, ანუ, როგორც ამბობენ, მას **კორპუსკულურ-ტალღური დუალიზმი** ახსიათებს.

სინათლის გავრცელებისას მისი ტალღური ბუნება იჩენს თავს (სწორედ ამის დამადასტურებელია სინათლის არეკვლა, გარდატეხა, დიფრაქცია, წითელი წანაცვლება), ხოლო გამოსხივებისას და შთანთქმისას – კორპუსკულური (რასაც ადასტურებს ფოტოეფექტის მოვლენა, რომელსაც მომავალ ნელს გაცნობი).

3.1.3. სინათლის სიჩქარე

გალილეის ცდა

„ჩვენი თვალიდან გამოსული მხედველობის სხივები უსასრულო სიჩქარით მოძრაობს. ეს რომ ნამდვილად ასეა, ადვილად მიხვდები. თუ თვალებს ჯერ დახუჭავ, ხოლო შემდეგ გაახელ და ცას შეხედავ, სულ მცირე დროც კი არ გჭირდება იმისათვის, რომ მხედველობის სხივებმა ცას მიაღწიოს და ცა ისევ დაინახო. ვარსკვლავებსაც ხომ მაშინვე ვხედავთ, როგორც კი ზევით ავიხედავთ, არადა, მანძილი იქამდე უსასრულოა...“ – ამას ჰერონ ალექსანდრიელი I საუკუნეში წერდა.

ადამიანები თანდათან მიხვდნენ, რომ არავითარი მხედველობის სხივები არ არსებობს და იმიტომ კი არ ვხედავთ, რომ ჩვენი თვალებიდან მხედველობის სხივები გამოდის, არამედ, პირიქით, **სხეულთა ზედაპირიდან არეკლილი სინათლე თვალში ხვდება და მხედველობის წერვს აღიზიანებს. გალიზიანება ტვინს გადაეცემა და ადამიანი მხედველობით შეგრძნებას იღებს.**



სურ. 3.1.3

როგორია სინათლის გავრცელების სიჩქარე, სასრული თუ უსასრულო? ეს კითხვა საუკუნეების განმავლობაში არ ასვენებდა ადამიანებს. ისევე, როგორც უძველესი დროის ბევრი სწავლული, არისტოტელეც თვლიდა, რომ სინათლის სიჩქარე უსასრულოა. 900 წლის წინათ კი არაბმა მეცნიერმა – ავიცენამ გამოთქვა მოსაზრება, რომ სინათლის სიჩქარე ძალიან დიდია, თუმცა ის მაინც სასრული უნდა იყოს.

ასეთივე იყო მისი თანამედროვე ალ-ხაზენის მოსაზრებაც, თუმცა მათ არ ჰქონდათ საშუალება, რომ თავიანთი მოსაზრება ექსპერიმენტულად შეემოწმებინათ.

სინათლის გავრცელების ექსპერიმენტული შესწავლა პირველად გალილეო გალილემ სცადა:

„უნდა ჩავთვალოთ, რომ სინათლე მყისიერად ვრცელდება, თუ მისი გავრცელება ისევე ხდება დროში, როგორც ყველა სხვა მოძრაობა? ნუთუ არ შეიძლება ცდით დავრწმუნდეთ, სინამდვილეში როგორია მისი სიჩქარე?“ – დასვა შეკითხვა გალილემ და ასეთი ცდა ჩაატარა:

ლამეა. ორი ადამიანი, პირობითად, „მეცნიერი“ და „ასისტენტი“, ერთმანეთისაგან რამდენიმე კილომეტრით დაშორებულ შემადგენელ ადგილებზე (ბორცვებზე) დგანან და ხელში ფანრები უჭირავთ (სურ.3.1.3).

ფანარს ჯერ „მეცნიერი“ ანთებს, „ასისტენტი“ კი მხოლოდ მას შემდეგ ანთებს თავის ფანარს, როცა „მეცნიერის“ ფანარის შუქს დაინახავს. თუ „მეცნიერი“ გაზომავს იმ დროს, რომელიც თავისი ფანარის ანთებიდან „ასისტენტის“ ფანარის ანთებამდე გავიდა და ბორცვებს შორის მანძილს, მაშინ სინათლის სიჩქარის გამოთვლაც შეეძლება.

„მე შევძელი ამ ცდის ჩატარება მხოლოდ მცირე, ერთ მილზე ნაკლებ მანძილზე და ამიტომაც ვერ შევძელი იმაში დარწმუნება, სინათლე სანინალმდეგო მხრიდან მართლაც მყისიერად გამოჩნდა თუ არა“, – ამბობდა გალილეი.

„მაგრამ თუ სინათლე მყისიერად არ ვრცელდება, მაშინ მისი სიჩქარე მეტისმეტად დიდია“, – ეს იყო ერთადერთი, რაც მან ცდის შედეგად დაასკვნა.

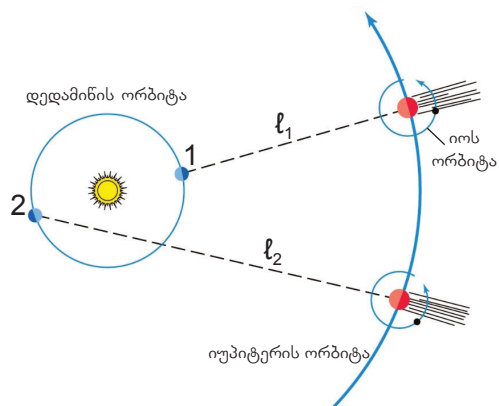
სინათლის სიჩქარის გაზომვის ასტრონომიული მეთოდი

სინათლის სიჩქარე პირველად 1676 წელს დანიელმა, ასტრონომმა **ოლე რიომერმა** გაზომა. რიომერი ტელესკოპით მზის სისტემის ყველაზე დიდი პლანეტის – იუპიტერისა და მისი 13 თანამგზავრის მოძრაობას აკვირდებოდა. ასტრონომის ყურადღება იუპიტერის უახლოესმა თანამგზავრმა, იომ მიიქცია. პერიოდულად, როცა იო იუპიტერის ჩრდილში ექცევა, მისი დაბნელება ხდება იუპიტერით და დედამიწიდან იგი არ ჩანს.

რიომერი ხედავდა, როგორ გადიოდა იო პლანეტის წინ, შემდეგ მის ჩრდილში შედიოდა და მეცნიერის თვალთახედვიდან იკარგებოდა. გარკვეული დროის შემდეგ იო ისევ ჩნდებოდა და ა. შ. იოს გამოჩენიდან გამოჩენამდე დროის შუალედი 42 საათი და 28 წუთი აღმოჩნდა (ანუ ეს არის იუპიტერის გარშემო იოს მიმოქცევის პერიოდი, დრო, რომელშიც იო იუპიტერის გარშემო ერთ სრულ ბრუნს აკეთებს).

თავდაპირველად გაზომვები ტარდებოდა მაშინ, როცა დედამიწა მზის გარშემო ორბიტაზე მოძრაობისას ყველაზე ახლოს იყო იუპიტერთან (სურ.3.1.4 (1)). ექვსი თვის შემდეგ, როცა დედამიწა თავის ორბიტაზე საპირისპირო მხარეს აღმოჩნდა და იუპიტერს დაშორდა (სურ.3.1.4 (2)), რიომერმა განმეორებითი გაზომვები ჩაატარა და მოულოდნელად აღმოაჩინა, რომ იომ იუპიტერის ჩრდილიდან გამოსვლა 22 წთ-ით (1320 წმ-ით) დააგვიანა. რიომერი მიხვდა დაგვიანების მიზეზს. ეს გამოწვეული იყო იმით, რომ სინათლეს, რომელსაც სასრული სიჩქარე აქვს, იუპიტერსა და დედამიწას შორის გაზრდილი მანძილის ($\ell_2 > \ell_1$) დასაფარად დამატებითი დრო დასჭირდა!

რიომერის დროს მზის გარშემო დედამიწის ორბიტის დიამეტრი 292 000 000 კმ-ის ტოლად



სურ. 3.1.4

ითვლებოდა (ეს სწორედ ის დამატებითი მანძილია, რომლის გავლაც სინათლეს „მოუწია“ მაშინ, როცა დედამიწა იუპიტერს დაშორდა).

სინათლის სიჩქარის ის მნიშვნელობა, რომელიც რიომერმა მიიღო, ასე გამოითვლება:

$$v = 292\,000\,000 \text{ კმ} / 1320 \text{ წმ} \approx 221\,000 \text{ კმ/წმ.}$$

ერთი შეხედვით შეიძლება მოგეჩვენოს, რომ ასეთი ცდომილება ($\approx 26\%$) არცთუ ისე კარგი შედეგია, მაგრამ ეს უმნიშვნელოვანესი მიღწევა იყო. კაცობრიობის ისტორიაში პირველად დამტკიცდა, რომ სინათლის სიჩქარე, მიუხედავად იმისა, რომ ძალიან დიდია, სასრულია და მისი გაზომვაც შესაძლებელია.

რიომერი საკუთარი დაკვირვებებისა და გაზომვების შედეგებით პარიზის მეცნიერებათა აკადემიაში მოხსენებით წარდგა. მისმა გამოსვლამ იქ მყოფი საზოგადოების პროტესტი გამოიწვია, რადგან დამსწრენი თვლიდნენ, რომ სინათლის სიჩქარე უსასრულოდ დიდია და მისი გაზომვა შეუძლებელია. რიომერის შედეგები ექსპერიმენტით უნდა შემოწმებულიყო, მაგრამ ასეთი ექსპერიმენტის ჩატარება მეცნიერებს შეუძლებლად მიაჩნდათ: არ არსებობდა ხელსაწყო, რომელიც თუნდაც რამდენიმე კილომეტრზე სინათლის გავრცელების დროს აღრიცხავდა. ეს დრო ხომ წამის მეათასედ ნაწილზე კიდევ უფრო მცირე იყო.

სინათლის სიჩქარის გაზომვის ლაბორატორიული მეთოდი

პირველი, ვინც სინათლის სიჩქარე ლაბორატორიულ პირობებში გაზომა, ფრანგი მეცნიერი **არმან იპოლიტ ფიზო** იყო. 1849 წელს ფიზომ საკმაოდ გონებამახვილური ხერხი გამოიყენა სინათლის სიჩქარის გასაზომად.

დააკვირდი 3.1.5 სურათს. მასზე ფიზოს ცდის გამარტივებული სქემაა გამოსახული. ფიზო სინათლის გავრცელებას პარიზის გარეუბან **სიურენსა** და მისგან რამდენიმე კილომეტრით დაშორებულ **მონმარტრს** შორის აკვირდებოდა.

სიურენსში მოთავსებული სინათლის წყაროდან გამოსხივებული სინათლის სხივი **ნახევრად გამჭვირვალე ფირფიტას** (1) ეცემოდა და მისგან არეკლილი იმ **კბილანა ბორბალს** ხვდებოდა, რომელსაც ფიზო სხივის გავრცელების გზაზე ათავსებდა. სხივი „კბილებს“ შორის ჭრილში გადიოდა და **მონმარტრზე** დადგმულ **სარკეს** ეცემოდა. სარკიდან არეკლილი სხივი უკან ბრუნდებოდა, ისევ „კბილებს“ შორის გაივლიდა და **დამკვირვებლის (ფიზოს) თვალში** ხვდებოდა. **ნახე ვიდეო:**



თუ ბორბალი უძრავი იყო, ფიზო სარკიდან არეკლილ სხივს მუდმივად ხედავდა. როცა კბილანა ბორბალი დაბალი სიჩქარით ბრუნვას იწყებდა, ფიზო ხან ხედავდა სინათლეს (როცა სარკიდან არეკლილი სხივი ბორბლის „კბილებს“ შორის ჭრილში ხვდებოდა), ხანაც – სინათლეს ბორბლის „კბილი“ ეფარებოდა და ფიზო სინათლეს ვეღარ ხედავდა.

კბილანა ბორბლის სიჩქარის თანდათან გაზრდისას, როცა ბრუნვის სიხშირე გარკვეულ მნიშვნელობას აღწევდა, ფიზო არეკლილ სინათლეს საერთოდ ვერ ხედავდა. სიჩქარის მომატებისას კი სინათლე ისევ პერიოდულად ჩნდებოდა.

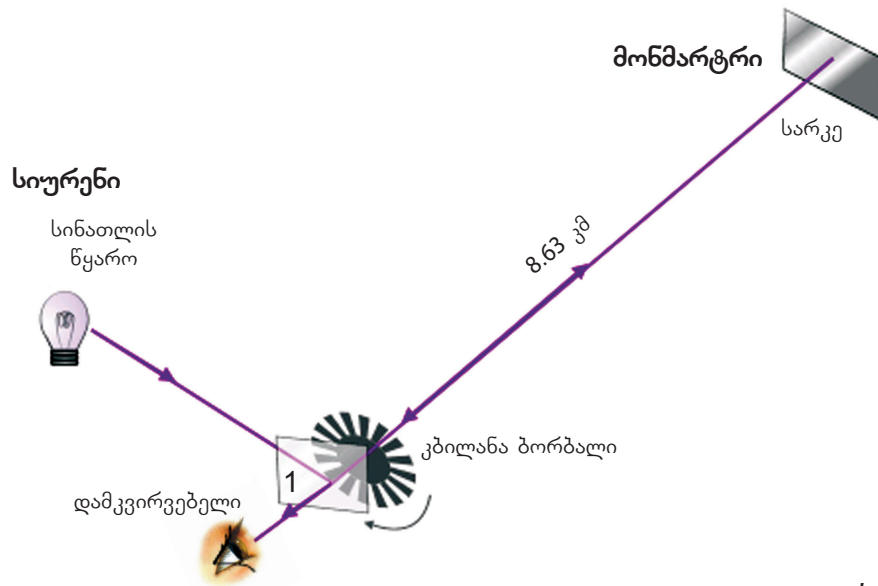
უამრავი ექსპერიმენტის შედეგად, ფიზომ ზუსტად დაადგინა ბორბლის ბრუნვის ის სიხშირე, რომლის დროსაც სინათლეს ვერ ხედავდა: $n = 12,6$ ბრ/წმ.

სინათლის სიჩქარის გამოთვლას მარტივი გამოთვლებილა სჭირდებოდა.

1. ფიზოს ცდაში, მანძილი (L) სარკიდან დამკვირვებლამდე $\approx 8,63$ კმ-ის ტოლი იყო: $L = 8,63 \cdot 10^3$ მ.

2. სინათლის სხივი, რომელიც კბილანა ბორბლის ჭრილში გადის და უკან ბრუნდება, 2L მანძილს გადის t დროში, რომელიც ასე გამოითვლება:

$$t = \frac{2L}{c}, \text{ სადა } c \text{ სინათლის სიჩქარეა.}$$



სურ. 3.1.5

3. კბილანა ბორბალს 720 „კბილი“ ჰქონდა (ანუ, 720 ჭრილი) დავეუშვათ, რომ ჭრილისა და „კბილის“ სიგანე ერთნაირია. მაშინ დრო, რომელიც დასჭირდება ბორბლის ისე შემობრუნებას, რომ:

ა) „ჭრილის“ ადგილი მომდევნო ჭრილმა დაიკავოს, ტოლია: $t_0 = \frac{T}{N} = \frac{1}{nN}$ (ასეთ შემთხვევაში დამკვირვებელი სინათლეს დაინახავს);

ბ) „ჭრილის“ ადგილი მომდევნო „კბილმა“ დაიკავოს, ტოლია: $t_1 = \frac{T}{2N} = \frac{1}{2nN}$ (ასეთ შემთხვევაში დამკვირვებელი სინათლეს ვეღარ ხედავს);

n კბილანა ბორბლის ბრუნვის სიხშირეა ($n = 12,6$ ბრ/წმ), ხოლო N ბორბალში „კბილების“ რაოდენობა ($N = 720$);

4. იმისათვის, რომ დამკვირვებელმა სინათლე ვერ დაინახოს, აუცილებელია, რომ იმ დროში რომელიც სინათლეს $2L$ მანძილის გასავლელად სჭირდება, ერთი „ჭრილის“ ადგილი მომდევნო „კბილმა“ დაიკავოს, ანუ

$$t_1 = \frac{1}{2nN} = \frac{2L}{c}$$

აქედან ჩანს, რომ სინათლის სიჩქარე ასე გამოითვლება:

$$c = 4LNn$$

5. თუ ფიზოს ცდის მონაცემებს გაითვალისწინებ, მიიღებ სინათლის სიჩქარის იმ მნიშვნელობას, რომელიც თავის დროზე ფიზომ მიიღო:

$$c = 4LNn = 4 \cdot 8,63 \cdot 10^3 \text{ მ} \cdot 720 \cdot 12,6 \text{ ბრ/წმ} \approx 313\,165\,000 \text{ მ/წმ} \approx 3,13 \cdot 10^8 \text{ კმ/წმ}.$$

ფიზოს მიერ მიღებული სინათლის სიჩქარის ცდომილება დღესდღეობით ექსპერიმენტულად დადგენილ მნიშვნელობასთან შედარებით 4,5%-ია.

1983 წელს ზომა-წონის გენერალურმა კონფერენციამ ვაკუუმში სინათლის სიჩქარის ზუსტი მნიშვნელობა დაადგინა:

$$c = 299\,792,458 \text{ კმ/წმ}.$$

სინათლის სიჩქარით კი სიგრძის საერთაშორისო ერთეული **მეტრი** განსაზღვრა:

1 მეტრი არის მანძილი, რომელსაც სინათლე $\frac{1}{299\,792\,458}$ წმ-ში გადის.

სინათლის სიჩქარე – ეს არის სიჩქარე, რომლითაც ელექტრომაგნიტური ტალღები ვაკუუმში ვრცელდება. სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში არ არის დამოკიდებული ათვლის სისტემის არჩევაზე.

სინათლის მოვლენების შესწავლისას მივიჩნევთ, რომ სინათლის სიჩქარის მნიშვნელობაა:

$$c \approx 300\,000 \text{ კმ/წმ} = 3 \cdot 10^8 \text{ მ/წმ}$$

3.1.4. სინათლის სიჩქარე გარემოში

ფიზოს ცდა და მისი გაზომვის შედეგები შემდგომში სხვა მეცნიერებმა, ლეონ ფუკომ და ალბერტ მაიკელსონმა გააუმჯობესეს. 1850 წელს ფუკომ სინათლის სიჩქარე წყალშიც გაზომა და აღმოჩნდა, რომ **წყალში სინათლის სიჩქარე ნაკლებია, ვიდრე – ჰაერში.**

გამჭვირვალე გარემოში სინათლის გავრცელებას უგანზომილებო ფიზიკური სიდიდით ახასიათებენ, რომელსაც **გარემოს გარდატეხის აბსოლუტური მაჩვენებელი** ჰქვია.

სინათლის გავრცელების სიჩქარე (v) გამჭვირვალე გარემოში (ნივთიერებაში) ყოველთვის ნაკლებია სინათლის გავრცელების სიჩქარეზე ვაკუუმში (c):

$$v < c$$

სიდიდეს, რომელიც გვიჩვენებს, რამდენჯერ მეტია სინათლის გავრცელების სიჩქარე ვაკუუმში, მის სიჩქარეზე მოცემულ გამჭვირვალე ერთგვაროვან გარემოში, **გარემოს გარდატეხის აბსოლუტური მაჩვენებელი** ჰქვია და ის n -ით აღინიშნება:

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.1.2)$$

გარემოს გარდატეხის აბსოლუტური მაჩვენებელი მოცემული გარემოსთვის მუდმივი სიდიდეა და დამოკიდებულია გარემოს ფიზიკურ მახასიათებლებზე (ტემპერატურაზე, სიმკვრივესა და გარემოს დრეკადობაზე). 3.1.1 ცხრილში მოცემულია ზოგიერთი გარემოს გარდატეხის აბსოლუტური მაჩვენებელი.

ცხრილი 3.1.1. ზოგიერთი ნივთიერების გარდატეხის აბსოლუტური მაჩვენებელი.

გარემო	გარდატეხის მაჩვენებელი ვაკუუმის მიმართ
ჰაერი	1,00029
ყინული	1,31
წყალი (20°C-ზე)	1,33
გლიცერინი	1,47
სხვადასხვა სახის მინა	1,47-დან 2,04-მდე ($n_{\text{სშ}} = 1,5$)
პლექსიგლასი	1,5
კვარცი	1,54
ლალი	1,76
ალმასი	2,42

ორი გარემოდან **ოპტიკურად უფრო მკვრივი** ენოდება იმ გარემოს, რომლის **გარდატეხის აბსოლუტური მაჩვენებელი უფრო მეტია**: რაც უფრო ოპტიკურად მკვრივია გარემო, მით უფრო ნაკლებია სინათლის გავრცელების სიჩქარე ამ გარემოში ვაკუუმთან შედარებით.

ვაკუუმის გარდატეხის მაჩვენებელი 1-ის ტოლია. ჰაერის გარდატეხის აბსოლუტური მაჩვენებელი 1,00029-ია, რაც იმას ნიშნავს, რომ ვაკუუმიდან ჰაერში გადასვლისას სინათლის სიჩქარე 1,00029-ჯერ, ანუ უმნიშვნელოდ მცირდება. შესაბამისად, მივიჩნევთ, რომ **ჰაერის გარდატეხის აბსოლუტური მაჩვენებელი 1-ის ტოლია.**

გარდატეხის აბსოლუტური მაჩვენებელი დამოკიდებულია სინათლის მახასიათებლებზეც (სიხშირეზე). მაგ., **ნითელი სინათლისთვის გარდატეხის მაჩვენებელი ყველაზე ნაკლებია, ვიდრე ხილული სინათლის სპექტრში სხვა ფერის სინათლეებისა.** ეს იმას ნიშნავს, რომ მაგ., ვაკუუმიდან წყალში გადასვლისას ნითელი ფერის სინათლის სიჩქარე უფრო ნაკლებად შემცირდება, ვიდრე დანარჩენი ფერის სინათლეების.

ხილული სინათლის დიაპაზონიდან **ყველაზე მეტი გარდატეხის მაჩვენებელი იისფერ სინათლეს აქვს.**

(გავითვალისწინე: გარდატეხის მაჩვენებლების ცხრილებზე, ჩვეულებრივ, მითითებულია რომელი სინათლისთვისაა გარდატეხის მაჩვენებლის მნიშვნელობები მოცემული და რა ფიზიკურ მდგომარეობაშია გარემო. თუ ცხრილს მითითება არ ახლავს, ნიშნავს, რომ n -ის დამოკიდებულება აღნიშნულ ფაქტორებზე უგულებელყოფილია. როგორც წესი, ცხრილებში n -ის მნიშვნელობები ჰაერის მიმართაა მოცემული, რადგან $n_{\text{ჰაერი}} \approx n_{\text{ვაკუუმი}}$).

უმეტეს შემთხვევაში, გვხვდება მოვლენები, როცა **სინათლე ვაკუუმიდან კი არ გადადის გარემოში, არამედ ერთი გარემოდან მეორე გარემოში გადადის**, მაგ., ჰაერიდან წყალში (აირიდან თხევად გარემოში), ჰაერიდან მინაში (აირიდან გამჭვირვალე მყარ სხეულში).

ვთქვათ, ერთი გარემოს გარდატეხის აბსოლუტური მაჩვენებელია n_1 , ხოლო მეორე გარემოსი – n_2 .

$\frac{n_2}{n_1}$ შეფარდებას ენოდება **მეორე გარემოს გარდატეხის ფარდობითი მაჩვენებელი პირველი გარემოს მიმართ**. მას, ხშირად, ასე აღნიშნავენ: $n_{2,1}$

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.1.3)$$

თუ 3.1.2-ს გავითვალისწინებთ, 3.1.3-დან მივიღებთ, რომ

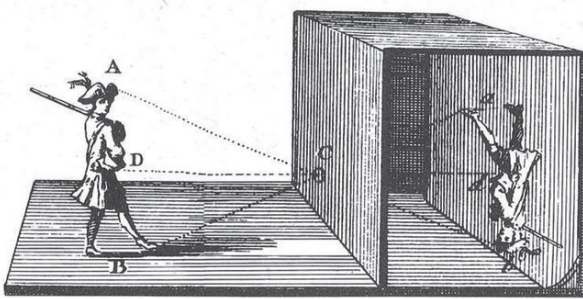
$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (3.1.4)$$

ეს კი იმას ნიშნავს, რომ **თუ სინათლე ერთი გამჭვირვალე გარემოდან მეორეში გადადის, მისი სიჩქარე:**

ა) შემცირდება ($v_2 < v_1$), თუ $n_2 > n_1$, ანუ თუ ოპტიკურად ნაკლებ მკვრივიდან მეტად მკვრივ გარემოში გადადის (მაგ., ყინულიდან წყალში გადასვლისას სინათლის სიჩქარე შემცირდება. იხ. 3.1.1 ცხრილი);

ბ) გაიზრდება ($v_2 > v_1$), თუ $n_2 < n_1$, ანუ თუ ოპტიკურად მეტად მკვრივიდან ნაკლებად მკვრივ გარემოში გადადის (მაგ., ალმასიდან კვარცში გადასვლისას სინათლის სიჩქარე გაიზრდება. იხ. 3.1.1 ცხრილი).

გარემოს გარდატეხის მაჩვენებელს, ანუ სინათლის სიჩქარის ცვლილებას ძალიან საინტერესო მოვლენები უკავშირდება, რომლებსაც მომდევნო გაკვეთილებზე განვიხილავთ.



სურ. 1



სურ. 2

...შუა საუკუნეების ევროპული ქალაქის ხალხით სავსე პატარა მოედანზე თეთრწვერიან კაცს დიდი შავი ყუთი შემოაქვს. შეკრებილები ყუთს ყურადღებით ათვალიერებენ: ჩვეულებრივი ყუთია, რომლის ერთ-ერთ კედელზე პატარა ნახვრეცაა გაკეთებული. ნახვრეტის მოპირდაპირე მხარეს კედლის მაგივრად ყუთს ნახევრად გამჭვირვალე პერგამენტი აქვს გადაკრული.

... ნახვრეტის წინ ფერად ტანსაცმელში გამოწყობილი ჯამბაზი დგება (სურ. 1). მაყურებლებს რიგ-რიგობით ეპატიჟებიან, რათა ახლოდან დაათვალიერონ პერგამენტი. მათ თავზე შავ გადასაფარებელსაც აფარებენ, რომ მზის სხივები პერგამენტს არ მოხვდეს. შავი ყუთი **კამერა-ობსკურა** („camera obscura“), რაც ლათინურად „ბნელ ოთახს“ ნიშნავს.

ადამიანებს, რომლებიც კამერა-ობსკურას პერგამენტის მხრიდან აკვირდებიან, სხვადასხვანაირი გრძნობა უჩნდებათ: ზოგი აღფრთოვანებულია, ზოგი – გაოცებული, ზოგი შეშინებულია და არც ყუთს და არც ჯამბაზს სიახლოვეს არ ეკარება...

რას ხედავდნენ ადამიანები პერგამენტზე? თუ შენს ოთახს ფანჯარა მზის მხარეს აქვს, შეგიძლია ის

კამერა-ობსკურად გადააკეთო და ძალიან საინტერესო სანახაობის მომსწრე გახდები: დააბნელე ფანჯარა მუქი ფერის შირმით და შირმაში პატარა ნახვრეტი გააკეთე.

ფანჯრის მოპირდაპირე კედელზე თეთრი ფერის ზეწარი ან ქაღალდი გააკარი და იმ პეიზაჟის გამოსახულებით დატკბები, რომელსაც ფანჯარა გადაჰყურებს... ოღონდ გამოსახულება ამოყირავებული იქნება: ქუჩის სავალი ნაწილი კედლის ზედა ნაწილში გამოისახება, ხოლო გამვლელები თავდაყირა ივლიან ზეწრით დაფარულ „ეკრანზე“ (სურ. 2). **ნახე ვიდეო:**



მეათე საუკუნის არაბმა სწავლულმა **იბნ ალ ხაიტანმა** (რომელსაც ევროპაში **ალხაზენის** სახელით იცნობდნენ) კამერა-ობსკურაზე დაკვირვების შედეგად დაასკვნა, რომ **ერთგვაროვან გარემოში სინათლე წრფივად ვრცელდება** (თუმცა ეს ფაქტი ჯერ კიდევ ევკლიდესთვის იყო ცნობილი).

ევროპაში კამერა-ობსკურა პირველად **ლეონარდო და ვინჩი** გამოიყენა ნატურიდან

ხატვისთვის (სურ. 3) და იგი თავის „ფერწერის ტრაქტატში“ დანვრილებით აღწერა. კამერა-ობსკურათი აკვირდებოდა გერმანელი ასტრონომი **იოჰან კეპლერი** მზის დაბნელებას.

კამერა-ობსკურა უმარტივესი ხელსაწყოა, რომლითაც სხეულის გამოსახულების მიღება შესაძლებელია. შუქგაუმტარი ყუთის ერთ კედელზე პატარა ნახვრეცაა გაკეთებული. ნახვრეტის მოპირდაპირე მხარეს კი კამერა-ობსკურას ეკრანია – ნახევრადგამჭვირვალე მინა ან თხელი პერ-



სურ. 3