

იმეფაღინე, იხრავლე და მიაბარე!

ლევან გლუჩიძე, აკადი გიგინეიშვილი

# ფიზიკა

სტუ-ს ოთხ სპეცირიანი კურსის ლექციების კონსპექტი

ნაწილი I



თბილისი 2015



- ფიზიკის ფართო (ოთხ სემესტრიანი) კურსი გათვლილია ტექნიკური უნივერსიტეტის ფიზიკური სპეციალობების სტუდენტებისთვის.
- ის მიზნად ისახავს: სტუდენტი არა მარტო გავარკვიოთ, შევასწავლოთ და შევაცვაროთ მრავალი საკაცობრიო აღმოჩენებით “განებივრებული”, პერმანენტულად “გაახალგაზრდავების” გზაზე მდგომი, ასაკით უკვე 25 საუკუნის ბრძენი “მოხუცი” - ფიზიკა, არამედ, ასევე შევქმნათ სტუდენტის ფიზიკური აზროვნების **განვითარების** მტკიცე საფუძვლები. თუ მოხერხდა, ალბათ, ეს იქნება კურსის მთავარი დამსახურება!
- ვიმედოვნებთ, რომ სათანადო ძალისხმევის შემთხვევაში სტუდენტი წარმატებულად დაძლევეს ტესტირების და გამოცდის პერიოდულ, ლოკალურ ჯებირებსაც.
- კონსპექტი, სტრუქტურულად, ცალკეული ლექციების ერთობლიობაა (თითოეულ ნაწილში 15 ლექციაა, ლექციაში 2-5 პარაგრაფი). ის ერთნაირად გამოსადეგია - სამეცადინოდ სტუდენტისთვის და სალექციო პრეზენტაციად პროფესორისთვის. ცხადია, ლექციები შესაბამისობაშია მოქმედ სილაბუსებთან.
- მასალის წარდგენა ეყრდნობა კრეატიული აზროვნების ცნობილ მეთოდებს: თემის, საკითხის მკაფიო სტრუქტურირება; მაქსიმალური ვიზუალიზაცია; ფერების ფართო გამოყენება.
- მიზანშეწონილად ჩავთვალეთ რთული მათემატიკური გარდაქმნების მაქსიმალურად შესაძლო მინიმალიზაცია და ყურადღების, ძირითადად, ფიზიკურ შინაარსზე გადატანა.
- თუ სტუდენტთა ცნობისმოყვარეობა საკუთარ აზროვნებაზეც ვრცელდება, თუ მათ აქვთ სურვილი **“ისწავლონ, თუ როგორ უნდა ისწავლონ”** - შეუძლიათ გაეცნონ Appendix I-ს.

რედაქტორი:

**იური პაპავა**

სტუ-ს სრული პროფესორი, დოქტორი

რეცენზენტი:

**ზაურ ჯაბუა**

სტუ-ს სრული პროფესორი, ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი

# ს ა რ ჩ ე ვ ი

## ლექცია 1

- 1.ზოგადი მოსაზრებები. ერთეულები
- 2.ვექტორული ალგებრის ელემენტები
- 3.საწყისი ცნებები

006

007

009

011

## ლექცია 2

- 1.წრფივი თანაბარი მოძრაობა
- 2.სიჩქარეთა შეკრების წესი. მოძრაობის ფარდობითობა
- 3.წრფივი არათანაბარი მოძრაობა
- 4.წრფივი თანაბარცვლადი მოძრაობა

013

014

016

017

018

## ლექცია 3

- 1.მრუდწირული მოძრაობა
- 2.მყარი სხეულის გადატანითი და ბრუნვითი მოძრაობა
- 3.კუთხური სიჩქარე და კუთხური აჩქარება

020

021

023

024

### კინემატიკის Mind Map

026

## ლექცია 4

- 1.ნიუტონის კანონები (I, II, III)
- 2.მსოფლიო მიზიდულობის ძალა. სიმძიმის ძალა. წონა. უწონობა

027

028

031

## ლექცია 5

- 1.თავისუფლად ვარდნილი სხეულის მოძრაობა
- 2.დედამიწის ხელოვნური თანამგზავრის მოძრაობა
- 3.ხახუნის ძალა

034

035

037

039

## ლექცია 6

1. დრეკადობის ძალა
- 2.იმპულსი და ძალის იმპულსი. იმპულსის მუდმივობის კანონი

041

042

044

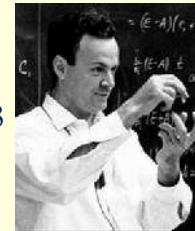
3.გალილეის ფარდობითობის პრინციპი	046
<b>ლექცია 7</b>	<b>048</b>
1.ათვლის არაინერციული სისტემები (წრფივი მოძრაობა)	049
2.ათვლის არაინერციული სისტემები (ბრუნვითი მოძრაობა)	051
3.ცენტრისკენული და ცენტრიდანული ძალები	053
4.დედამიწა, როგორც არაინერციული სისტემა	055
<b>ლექცია 8</b>	<b>057</b>
1.მექანიკური მუშაობა და სიმძლავრე	058
2.სიმძიმის ძალის და დრეკადობის ძალის მუშაობა	060
3.კონსერვატიული და არაკონსერვატიული ძალები	062
<b>ლექცია 9</b>	<b>064</b>
1.მექანიკური (კინეტიკური და პოტენციური) ენერგია	065
2.ენერგიის მუდმივობის კანონი	067
3.ნაწილაკების დაჯახება	068
<b>ლექცია 10</b>	<b>069</b>
1.მაბრუნებელი ძალის მომენტი	070
2.ინერციის მომენტი	071
3.იმპულსის მომენტი	073
<b>ლექცია 11</b>	<b>075</b>
1.რხევითი მოძრაობა {საყრდენი ცნებები}	076
2.ჰარმონიული რხევა {განტოლება, სიჩქარე, აჩქარება, ენერგია}	077
3.მილევადი და იძულებითი რხევები. რეზონანსი	079
<b>ლექცია 12</b>	<b>081</b>
1.ტალღური მოძრაობა. ტალღის ზედაპირი და ფრონტი	082
2.განივი და გრძივი ტალღები. ტალღის სიგრძე, სიხშირე, სიჩქარე	083



3. ტალღის განტოლება და ენერჯია	085
4. ტალღების ინტერფერენცია. მდგარი ტალღები	087
<b>დინამიკის Mind Map</b>	<b>090</b>
<b>ლექცია 13</b>	<b>092</b>
1. წნევა. პასკალის კანონი. სითხის წნევა. ატმოსფერული წნევა	093
2. არქიმედეს კანონი. სხეულთა ცურვის პირობები	096
3. იდეალური სითხის სტაციონალური დინება. ბერნულის განტოლება	098
<b>ლექცია 14</b>	<b>101</b>
1. რეალური სითხის დინება. სიბლანტე	102
2. სითხის ლამინარული და ტურბულენტური დინება. რეინოლდსის რიცხვი	104
3. სხეულების მოძრაობა რეალურ სითხეში	105
<b>ლექცია 15</b>	<b>108</b>
1. მოლეკულურ-კინეტიკურ თეორია - “მკთ” {წინასიტყვაობა}	109
2. თერმოდინამიკა {წინასიტყვაობა}	111
3. ტემპერატურა. ტემპერატურის სკალები. აბსოლუტური ნული	112
<b>Appendix I</b>	<b>113</b>
1. ვისწავლოთ, თუ როგორ უნდა ვისწავლოთ	113
<b>Appendix II</b>	<b>118</b>
1. ინფორმაცია (ცხრილები), რომელიც გამოგადგებათ	118
<b>Appendix III</b>	<b>122</b>
1. გამოყენებული ლიტერატურა	122



“რაც მეტს ვიგებთ, მით უფრო ფართოვდება საზღვრები იმისა, რაც უნდა გავიგოთ.”  
Richard P. Feynman



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1918 - 1988

## სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 1

თემა:

სემესტრი I

### მექანიკა

88·

007

1.ზოგადი მოსაზრებები. ერთეულები

009

2.ვექტორული ალგებრის ელემენტები

011

3.საწყისი ცნებები

# 1. ზოგადი მოსაზრებები. ერთეულები

✓ აღმოჩენილი ფიზიკური მოვლენები, ფიზიკის დადგენილი კანონები საზოგადოების დაინტერესების სფეროს განეკუთვნებოდნენ ყოველთვის, ვინაიდან უახლესი ტექნიკური მიღწევებით ტოვებდნენ ხანგრძლივ კვალს და **აისახებოდნენ ყოველდღიურ ცხოვრებაში**;

✓ ფიზიკა მუდმივი ძიების და განვითარების შემზღუდავი საზღვრებისგან თავისუფალი მეცნიერებაა, ხოლო ადამიანის ტვინის უდიდესი შესაძლებლობები უზრუნველყოფდნენ ფიზიკის ყველა, მათ შორის ახლად ჩამოყალიბებული ნაწილების, **წარმატებულ ათვისებას**;

✓ შესაძლოა, ვერ ვამჩნევთ (ან არ ვიმჩნევთ), მაგრამ **სამყარო განჭოლილია მეცნიერებით**, რომელიც **ქვეყნის განვითარების** რეალურ და მძლავრ ძალას წარმოადგენს. მეცნიერება-თა მწკრივში ფიზიკას, თავისი **მსოფლმხედველური არსით**, ყოველთვის განსაკუთრებული ადგილი ეკავა და დღესაც უკავია;

▪ ამავე დროს, სწავლა ყოველთვის **განსწავლულობის დონის შეფასებასთან** თანაარსებობდა. ასეა ამჯერადაც – ცოდნის შემოწმება დღეს სხვადასხვა საფეხურზე ხორციელდება, თანაც შედარებით ახალი, პროგრესული მეთოდების გამოყენებით;

▪ ამ მხრივ მნიშვნელოვანია **ამოცანების და ტესტების გადაწყვეტაზე მუშაობა**;

▪ **ფორმულის ნომერი** ორ ციფრიანია (3.8) – *საკითხის* რიგობრივი ნომერი (3) და ამ საკითხში თვით *ფორმულის* ნომერი (8). სხვა *ლექციის* ფორმულის მითითება პირველ ციფრად *ლექციის* ნომერსაც მოიცავს (5.3.8). მას შეიძლება წინ უძღვოდეს **სემესტრის N** (I.5.3.8);

▪ ნომერი კვადრატულ ფრჩხილებში [2] უთითებს ნახაზის, გრაფიკის კონკრეტულ შემადგენელ ნაწილს;

▪  $\vec{E}_x$ ,  $\vec{E}_x$  - შესაბამისად, ვექტორის მდგენელი და გეგმილია ღერძზე.  $\vec{E} \equiv |\vec{E}|$  - ვექტორის მოდული;

▪ [ ] ფრჩხილებში ფიზიკური სიდიდის მოთავსებით ვუთითებთ მის განზომილებას:  $[m] = M$  გვიჩვენებს, რომ მასის განზომილებაა **M**;

▪ კურსის ფარგლებში {ძირითადად} გამოიყენება SI სისტემის ერთეულები;

- ფიზიკის განვითარება ყოველთვის კავშირში იყო ცდასთან, ფიზიკურ სიდიდეთა გაზომვასთან, რამაც განაპირობა საზომი ერთეულების შემოღება;
- რამდენიმე ფიზიკური სიდიდის ერთეული შემოღებული იყო დამოუკიდებლად (**ძირითადი ერთეულები**), ხოლო დანარჩენები (**წარმოებული ერთეულები**) – გამოსახეს ფიზიკური კანონზომიერებების საფუძველზე, ამ ძირითადი ერთეულების გამოყენებით;
- კონკრეტული ერთეულის *კავშირს* {ერთეულთა ამ სისტემაში} ძირითადად მიჩნეულ ერთეულებთან ასახავს სიდიდის **განზომილება**;

✓ 1961 წელს შემოღებულ ერთეულთა საერთაშორისო სისტემას – **SI** (System International) - საფუძველად უდევს **შვიდი ძირითადი ფიზიკური სიდიდის შვიდი ძირითადი ერთეული**: : **L** სიგრძე – **მეტრი**, **T** დრო – **წამი**, **M** მასა – **კილოგრამი**, **θ** ტემპერატურა – **კელვინი**, **N** ნივთიერების რაოდენობა – **მოლი**, **I** დენის ძალა – **ამპერი**, **J** სინათლის ძალა – **კანდელა**;

▪ გაზომვათა სიზუსტის და ერთეულთა შენახვა-დაცვის უზრუნველსაყოფად, თითოეულ ძირითად ერთეულს შეესაბამება გარკვეული ეტალონი:

- **მეტრი** – გზის სიგრძე, რომელსაც გადის *ვაკუუმში* სინათლე **1/299 792 458 წამში** (1983 წ.);
- **წამი** – *ცეზიუმ-133* ატომის ძირითადი მდგომარეობის ორ ზენაზ დონეთა შორის გადასვლის შესაბამისი გამოსხივების **9 192 631 770 პერიოდის** ტოლი დრო (1967 წ.);
- **კილოგრამი** – 39 მმ დიამეტრის და სიმაღლის **პლატინა-ირიდიუმის** შენადნობისგან დამზადებული ცილინდრის მასა (1901 წ.);
- **კელვინი** – *წყლის* სამმაგი წერტილის (*მყარი, სითხე, ორთქლი*) შესაბამისი ტემპერატურის **1/273.16** ნაწილი (1967 წ.);
- **მოლი** – ნივთიერების რაოდენობა, რომელიც შეიცავს იმდენივე **სტრუქტურულ ელემენტს** (ატომი, მოლეკულა, იონი . . .) რამდენიც არის **0.012 კგ C-12 ნახშირბადში** (1971 წ.);
- **ამპერი** – დენის ძალა, რომელიც ერთმანეთისგან **1 მ-ით** დაშორებული ორ პარალელურ, უსასრულოდ გრძელ და წვრილ გამტარებში გავლისას, ამ გამტარების თითოეულ მეტრზე აღძრავს  **$2 \cdot 10^{-7}$  ნ** ძალას (1948 წ.);
- **კანდელა** – მოცემული მიმართულებით იმ სინათლის წყაროს სინათლის ძალაა, რომელიც ასხივებს  **$540 \cdot 10^{12}$  ჰც** სიხშირის მონოქრომატულ გამოსხივებას და მისი ენერგეტიკული ძალა ამ მიმართულებით **1 სტერადიან** სივრცით კუთხეში **1/683 ვატს** შეადგენს (1979 წ.).



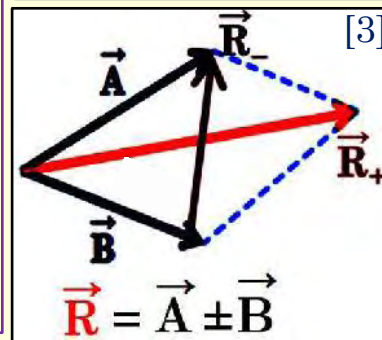
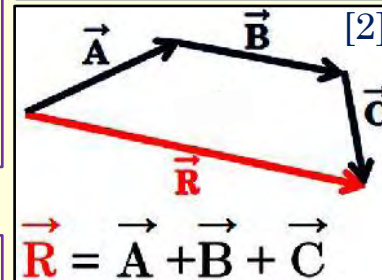
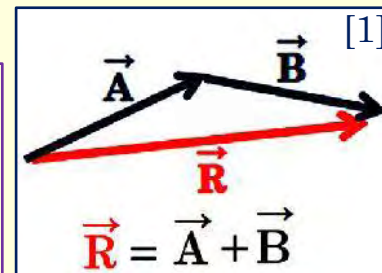
## 2. ვექტორული ალგებრის ელემენტები

- ✓ ფიზიკის **ეს** კურსი ფაქტიურად ორი ტიპის სიდიდით ოპერირებს - სკალარულით და **ვექტორულით**;
- ფიზიკური სიდიდე სკალარია, თუ ის სრულად აიწერება მხოლოდ რიცხვითი მნიშვნელობით (მანძილი, დრო, მასა, ენერგია, ტემპერატურა...). სკალარული სიდიდეები მარტივ **ალგებრულ** მოქმედებებს ექვემდებარებიან;
  - ფიზიკური სიდიდე **ვექტორია**, თუ ის რიცხვით მნიშვნელობასთან *ერთად* მოითხოვს მიმართულების მითითებასაც. ე.ი. ვექტორს ორი მახასიათებელი **კომპონენტი** გააჩნია: **მიმართულება** და **მოდული** (აბსოლუტური მნიშვნელობა). ვექტორული სიდიდეებია: გადაადგილება, სიჩქარე, აჩქარება, ძალა, იმპულსი.... ვექტორებზე მოქმედება **გეომეტრიულ** მიდგომას მოითხოვს;

• **ვექტორის ნამრავლი სკალარზე**  $\vec{B} = n\vec{A}$  ნიშნავს, რომ **B** ვექტორი **რიცხობრივად n-ჯერ** განსხვავდება **A**-ვექტორისგან, მათი **მიმართულებები** კი, ან თანხვედრილია ( $n > 0$ ), ან ურთიერთსაპირისპიროა ( $n < 0$ );

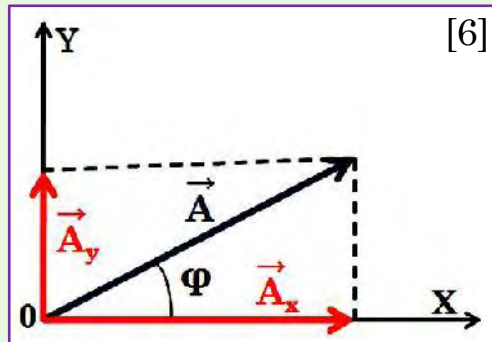
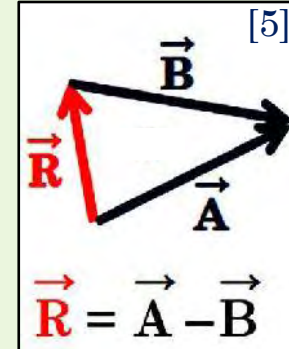
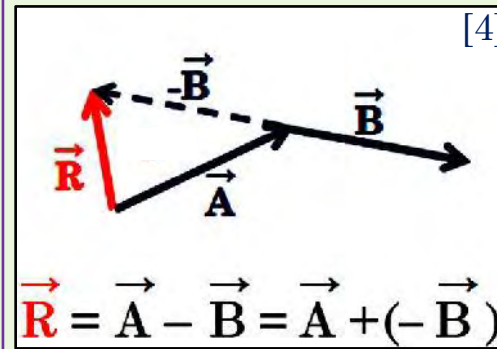
• [1], [2] ვექტორთა **შეკრების** ზოგადი წესი: ყოველი შემდგომი შესაკრები ვექტორის საწყის წერტილს ვუთავსებთ {გასრიალებით} წინა ვექტორის ბოლოს, მაშინ ვექტორი  $\vec{R}$ , რომელიც აერთებს პირველი ვექტორის სათავეს უკანასკნელი ვექტორის ბოლოსთან, არის **ჯამური** ვექტორი;

• [3] ასახავს ორი ვექტორის შეკრების განსხვავებულ წესს, როდესაც საწყისი წერტილებით შეთავსებულ ორ შესაკრებ ვექტორზე აგებული **პარალელოგრამის დიაგონალი**, რომელიც გადის ამ ვექტორების საწყის წერტილზე არის **ჯამური** ვექტორი  $\vec{R}_+ = \vec{A} + \vec{B}$  {შესაკრებ ვექტორებს შორის მართი კუთხისას,  $\vec{R}_+$  ვექტორის სიდიდე პითაგორას თეორემით დგინდება  $R = (A^2 + B^2)^{1/2}$ }. პარალელოგრამის **მეორე დიაგონალი** განსაზღვრავს იმავე ვექტორების **სხვაობას**  $\vec{R}_- = \vec{A} - \vec{B}$ ;



შესაძლებელია [4] გამოკლების ფაქტიურად შეკრებაზე დაყვანა, ერთი ვექტორის ( $\vec{B}$ ) **ნიშნის საპირისპიროზე** ( $-\vec{B}$ ) შეცვლით;

• უმუშალოდ გამოკლების შესასრულებლად საკლებ და მაკლებ ვექტორებს **ბოლო წერტილებით** ვუთავსებთ ერთმანეთს [5]. სხვაობის  $\vec{R}$  ვექტორი აერთებს  $\vec{A}$  და  $\vec{B}$  ვექტორების საწყის წერტილებს და მიმართულია საკლებიდან მაკლებისკენ;



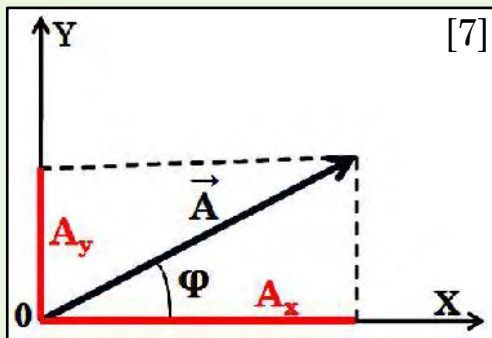
• ორი ვექტორის შეკრების შეზღუდვები მოქმედებაა ვექტორის **ორ მდგენელ ვექტორად** დაშლა. პრაქტიკული თვალსაზრისით მნიშვნელოვანია ვექტორი დაიშალოს მართკუთხა საკოორდინატო სისტემის **ღერძებზე ვექტორის მდგენელებად** [6]

$$\vec{A} = \vec{A}_x + \vec{A}_y$$

• საკოორდინატო ღერძზე ვექტორის **გეგმილი** (პროექცია) სკალარული ალგებრული სიდიდეა. **გეგმილი** ვექტორის **მოდულითა** და ვექტორსა და ღერძს შორის **φ კუთხის** სიდიდით განისაზღვრება:

$$A_x = A \cos \varphi \quad A_y = A \sin \varphi$$

• **გეგმილი დადებითია**, თუ შესაბამისი მდგენელი მიმართულია ღერძის **გასწვრივ** და **უარყოფითია**, როცა მდგენელი მიმართულია ღერძის **საწინააღმდეგოდ**.



### 3.საწყისი ცნებები

✓ მექანიკა - იკვლევს **მექანიკურ მოძრაობას**, მის გამომწვევ **მიზეზებს**. მექანიკა იყოფა 3 ნაწილად:

- კინემატიკა - სწავლობს **სხეულთა მექანიკურ მოძრაობას**, თუმცა მიზეზებს არ იხილავს;
- დინამიკა - სწავლობს **სხეულთა მოძრაობას**, მის ცვლილებას **გამომწვევ მიზეზებთან კავშირში**;
- სტატიკა - სწავლობს **სხეულთა წონასწორობის პირობებს**;

▪ **მექანიკური მოძრაობა** არის **სხეულის მდებარეობის ცვლილება ათვლის სისტემის მიმართ**;

▪ **მექანიკის ძირითადი ამოცანაა** - **სხეულთა მდებარეობის (კოორდინატების) განსაზღვრა სივრცეში, დროის ნებისმიერ მომენტში**;

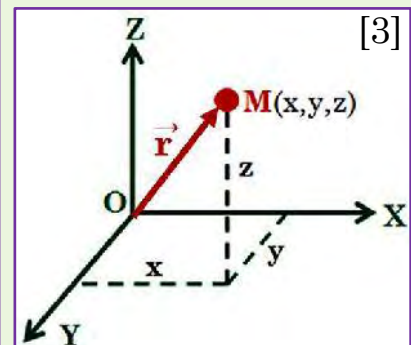
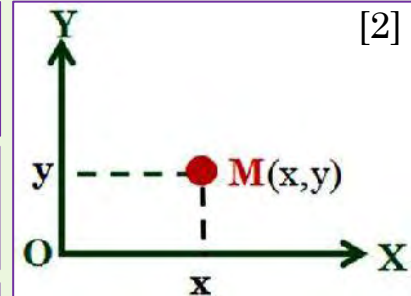
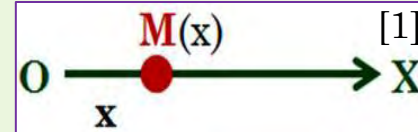
▪ **სხვადასხვა** ათვლის სისტემის მიმართ **სხეულის მდებარეობა და მოძრაობა განსხვავებულად** აღიქმება, ე.ი. ეს **ცნებები ფარდობითია**;

✓ მოძრაობის ხასიათის მიხედვით იცვლება ათვლის სისტემაში შემავალი კოორდინატა ღერძების (შესაბამისად, კოორდინატების) **რიცხვი**:

- [1] **წრფეზე** {მოძრაობისას} - 1 ღერძი ( $X$ ) და 1 კოორდინატი ( $x$ );
- [2] **სიბრტეზე** {მოძრაობისას} - 2 ღერძი ( $X, Y$ ) და 2 კოორდინატი ( $x, y$ );
- [3] **სივრცეში** {მოძრაობისას} - 3 ღერძი ( $X, Y, Z$ ) და 3 კოორდინატი ( $x, y, z$ );
- სხეულის მდებარეობას ათვლის სისტემაში სრულად განსაზღვრავს  $\vec{r}$  **რადიუს-ვექტორიც** [3];

✓ სივრცეში სხეულის **მდებარეობის დადგენა მხოლოდ სხვა სხეულთა** მიმართ მისი განლაგებითაა შესაძლებელი;

- **ნებისმიერ სხეულს**, რომლის მიმართ განიხილება არჩეული სხეულის მდებარეობა, **ათვლის სხეული** ეწოდება;
- ათვლის სხეული, მასთან დაკავშირებული კოორდინატთა სისტემა და დროის გასაზომი ხელსაწყო ერთად ქმნიან **ათვლის სისტემას**, რომლის მიმართაც განიხილება სხეულის მოძრაობა;

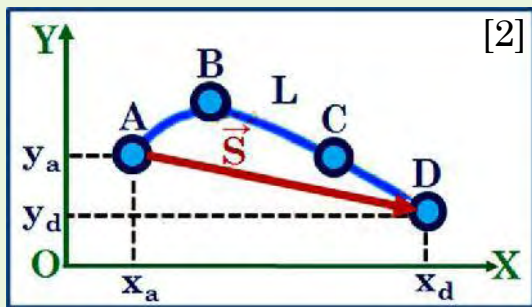




✓სხეულს, რომლის ზომა მოძრაობის (ან უძრაობის) მოცემულ პირობებში შეიძლება უგულებელვყოთ, ნივთიერი წერტილი ეწოდება;

▪სხეული ნივთიერ წერტილად შეგვიძლია მივიჩნიოთ თუ მისი დაშორება ან მდებარეობის ცვლილება სხვა სხეულების მიმართ მნიშვნელოვნად **აღემატება** მის **საკუთარ ზომებს**;

•მოძრავი სხეულის ზომები არ განიხილება მაშინაც, როდესაც მისი შემადგენელი ყველა წერტილი მოძრაობს **ერთნაირად** (გადატანითი მოძრაობა);



✓მოძრაობის **ტრაექტორია** ეს არის **წირი**, რომელსაც ნივთიერი წერტილი {სხეული} მოძრაობისას შემოწერს;

▪ტრაექტორიის {პრაქტიკულად} 2 სახის განხილვაა საკმარისი:  
 •[1] **წრფივი** - საწყის, A წერტილში სხეულის კოორდინატია ( $x_a$ ), საბოლოო D-ში - ( $x_d$ );  
 •[2] **მრუდწირული** - სხეული, XOY ათვლის სისტემაში მოძრაობისას, თანმიმდევრულად გადის A,B,C,D წერტილებს. საწყის, A წერტილში მისი კოორდინატებია ( $x_a, y_a$ ), საბოლოო D წერტილში - ( $x_d, y_d$ );

▪ტრაექტორიის **სიგრძეს L**, რომელსაც სხეული მოძრაობისას გაივლის, **გავლილი მანძილი (გზა)** ეწოდება;

▪**წრფის მიმართულ მონაკვეთს** ( $\vec{S}$  ვექტორს), რომელიც აერთებს სხეულის საწყის მდებარეობას მის მომდევნო მდებარეობასთან, ნივთიერი წერტილის **გადაადგილება** ეწოდება;

•გადაადგილების ვექტორის სიგრძე (მოდული) და სხეულის მიერ გავლილი მანძილი რიცხობრივად განსხვავებული სიდიდეებია:  $|\vec{S}| \leq L$  ყოველთვის;

•მრუდ წირზე მოძრაობისას გადაადგილების მოდული გზაზე ნაკლებია;

•წრფეზე ერთი მიმართულებით მოძრაობისას გზა და გადაადგილება **რიცხობრივად ტოლია**;







“ჩვენ უნდა გვიკვირდეს მხოლოდ ის, რომ ჯერ კიდევ გაგვაჩნია რაღაცით  
გაკვირვების უნარი.” Francois de La Rochefoucauld



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1613 - 1680

## სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 2

თემა:

სემესტრი I

### მექანიკა. კინემატიკა

88·

014

1.წრფივი თანაბარი მოძრაობა

016

2.სიჩქარეთა შეკრების წესი. მოძრაობის ფარდობითობა

017

3.წრფივი არათანაბარი მოძრაობა

019

4.წრფივი თანაბრცვლადი მოძრაობა

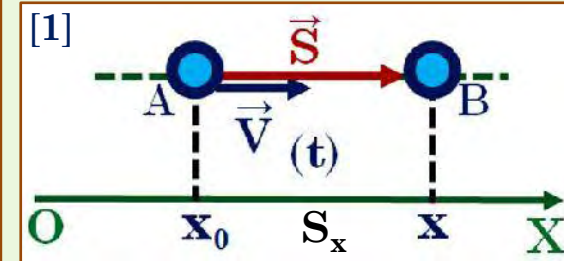
# 1.წრფივი თანაბარი მოძრაობა

✓ **წრფივი თანაბარი მოძრაობა** {ტრაექტორია - წრფე; სხეულის მდებარეობა იცვლება ერთნაირი სისწრაფით} - **მოძრაობა**, რომლის **დროსაც** სხეული დროის ნებისმიერ ტოლ შუალედში ერთნაირ გადაადგილებას ასრულებს;

▪ **სიჩქარე  $\vec{V}$**  {ძირითადი კინემატიკური პარამეტრი} - რაოდენობრივად განსაზღვრავს სხეულის **მდებარეობის** (კოორდინატის) ცვლილების **სისწრაფეს**;

▪ წრფივი თანაბარი მოძრაობისას  $\vec{V} = \text{const}$ ;

▪  $t$  დროში  $\vec{S}$  გადაადგილებისას სიჩქარე ტოლია  $\vec{V} = \vec{S} / t$  (1.1)



• A-დან  $V$  სიჩქარით მოძრავი სხეული  $t$  დროში აღწევს  $B$  წერტილს [1], ანუ ასრულებს  $S$  გადაადგილებას. კოორდინატი კი იცვლება  $x_0$ -დან  $x$ -მდე;

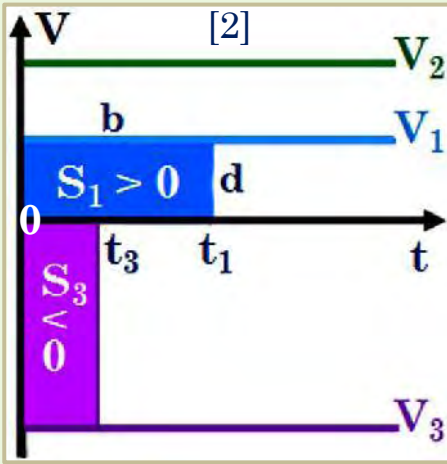
• [1] სიჩქარის და გადაადგილების ვექტორები თანამიმართულია  $\Rightarrow V = S/t$  (1.2)

• (1.2)  $\Rightarrow [V] = [S]/[t] = 1\text{მ}/1\text{წმ}$  {ეს ისეთი მოძრაობის სიჩქარეა, როდესაც 1წმ-ში 1მ გადაადგილება სრულდება};

• {(1.2), [1]}  $\Rightarrow S = Vt$  (1.3)  $\Rightarrow S_x = x - x_0$   $\Rightarrow x = x_0 + S_x$  (1.4)  $\Rightarrow x = x_0 \pm Vt$  (1.5)

• {(1.5)  $x = x_0 \pm Vt$ } წრფივი თანაბარი მოძრაობის **მოძრაობის განტოლებაა**;

• (1.5)-ში ნიშანი “+” შეესაბამება ღერძის **მიმართულებით** მოძრაობას, ნიშანი “-” მოძრაობას ღერძის საპირისპიროდ;



- [2]  $V(t)$  დამოკიდებულების გრაფიკი.  $V = \text{const}$ , ე.ი. დროის ნებისმიერ მომენტში სიჩქარის გეგმილის ამსახველი წირი უცვლელად უნდა იყოს დაცილებული  $t$  ღერძიდან {მისი **პარალელურია**};
- $d$  სიჩქარის სიდიდეა,  $b$  - დროის. (1.3)  $\rightarrow$  მათი ნამრავლი, ანუ სიჩქარის გრაფიკის ქვეშ მოთავსებული **მართკუთხედის ფართობი** რიცხობრივად  $S$  გადაადგილების ტოლია;
- [2]  $\rightarrow \{V_2 > V_1 > 0; V_3 < 0; |V_3| > |V_2| > |V_1|\}$  (1.6)

▪ [3],[4] გადაადგილების  $S$  და კოორდინატის  $X$  გრაფიკებია. ორივე გრაფიკი იქნება **წრფე**, რადგან სხეულის მდებარეობის ცვლილება **წრფივად**აა დამოკიდებული დროზე;

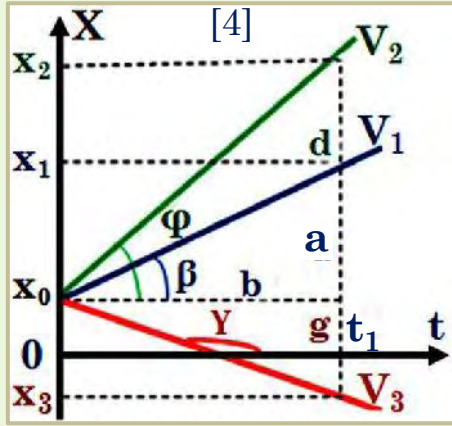
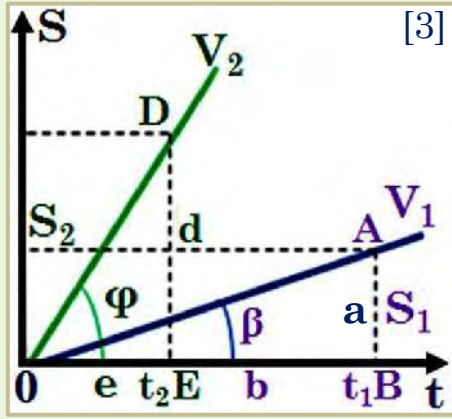
- რაც უფრო დიდია სიჩქარე, მით უფრო სწრაფად იცვლება სხეულის მდებარეობა ( $S, X$ ), მით უფრო ციცაბოა გრაფიკები;
- დროის ნებისმიერ მომენტში  $S_2 > S_1$ , რადგან  $V_2 > V_1$  ( $\varphi > \beta$ ) და გრაფიკების დახრის კუთხის  $tg$  განსაზღვრავს  $V$ -ს რიცხვით მნიშვნელობას:

$\Delta AOB$ -დან  $tg\beta = a/b = S_1/t_1 = V_1$ ;  $\Delta DOE$ -დან  $tg\varphi = d/e = S_2/t_2 = V_2$ ;

- მახვილი კუთხისას ( $\beta, \varphi < 90^\circ$ ) სიჩქარე  $V > 0$ ;
- ბლაგვი კუთხისას ( $\gamma > 90^\circ$ ) სიჩქარე  $V < 0$ ;
- $x_0$  **საწყისი კოორდინატი** განსაზღვრავს სხეულთა მდებარეობას  $t=0$  მომენტში;
- კოორდინატის გრაფიკიდან მიიღება მოძრაობის განტოლებაც:

$$x_1 = x_0 + a = x_0 + btg\beta = x_0 + V_1 t_1 \quad (1.7)$$

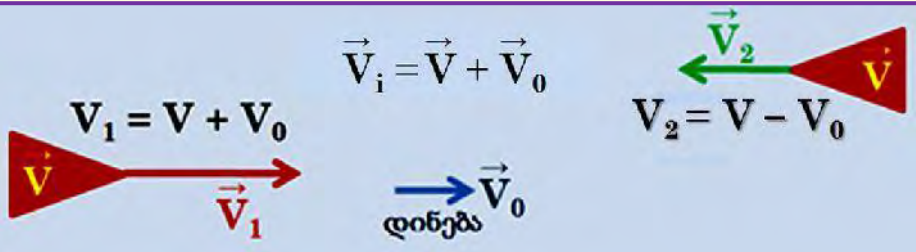
ანალოგიურად:  $x_2 = x_0 + V_2 t_1$  და  $x_3 = x_0 - V_3 t_1$



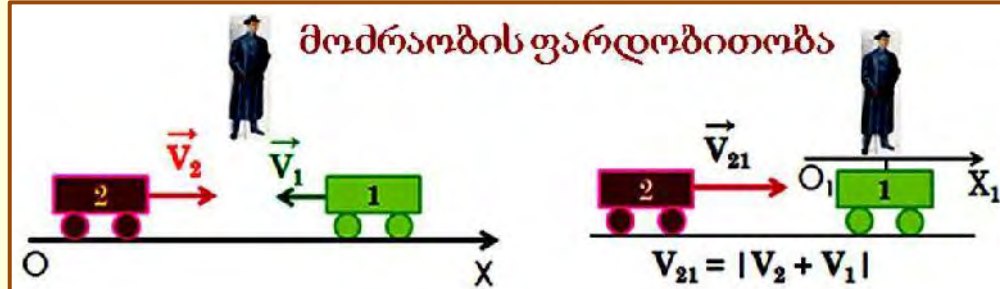


## 2.სიჩქარეთა შეკრების წესი. მოძრაობის ფარდობითობა

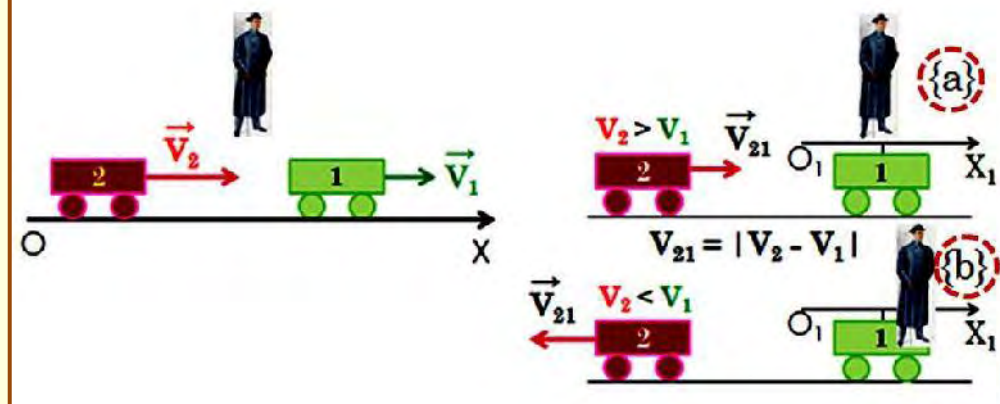
✓სხეული ხშირად ერთდროულად რამდენიმე მოძრაობაში მონაწილეობს:  $V_0$  დინების სიჩქარის მდინარეში {**მოძრავი** ათვლის სისტემა} მოძრაობს წყლის მიმართ  $V$  საკუთარი სიჩქარის მქონე ნავი {**სხეული**}. როგორია ნაპირის {**უძრავი** ათვლის სისტემის} მიმართ ნავის სიჩქარე, მოძრაობის 2 საპირისპირო მიმართულებისას [1] ?



■სხეულის სიჩქარე უძრავი სისტემის მიმართ ტოლია ორი სიჩქარის ვექტორული ჯამისა: ესაა სხეულის სიჩქარე მოძრავი სისტემის მიმართ და მოძრავი სისტემის სიჩქარე უძრავი სისტემის მიმართ. **სიჩქარეთა შეკრების წესი.**



შემხვედარი მოძრაობა:  
I-ის მიმართ II ვაგონის სიჩქარე მოდულთა ორი სიჩქარის **ჯამის** ტოლია, მიმართულებით კი **ემთხვევა**  $\vec{V}_2$ -ს.



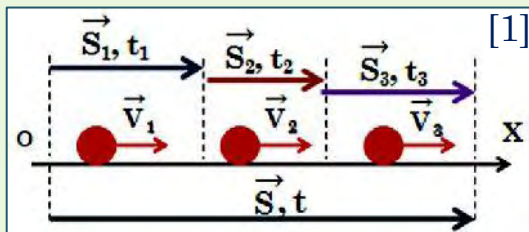
ერთი მიმართულებით მოძრაობა:  
I ვაგონის მიმართ II-ის სიჩქარის მოდულთა ტოლია მათი სიჩქარეთა **სხვაობის** მოდულისა და მიმართულია **ისევე** {a} როგორც  $\vec{V}_2$  ვექტორი, თუ  $V_2 > V_1$ , და **საპირისპიროდ** {b} თუ  $V_2 < V_1$ .



### 3.წრფივი არათანაბარი მოძრაობა

✓ მოძრაობის შედარებით გავრცელებული ფორმა არათანაბარი მოძრაობაა  $\vec{V} \neq \text{const}$ ;

- მოძრაობის ტრაექტორია შეიძლება **წრფე** იყოს, მაგრამ სხეულის მდებარეობა იცვლება **განსხვავებული** სისწრაფით. ანუ, დროის ერთნაირ შუალედში სხეული **განსხვავებულ** გადაადგილებებს ასრულებს;



$$\vec{V}_a = \frac{\vec{S}_1 + \vec{S}_2 + \vec{S}_3}{t_1 + t_2 + t_3} \quad (3.2)$$

- რამდენიმე უბნის შემცველი გადაადგილებისას [1], საშუალო სიჩქარე ტოლია ტრაექტორიის **ყველა უბანზე** გადაადგილებების ჯამის ფარდობისა შესაბამის დროთა ჯამთან;

- საშუალო სიჩქარე ახასიათებს მოძრაობას გზის უბანზე **მთლიანობაში**. დროის გარკვეულ მომენტში (ტრაექტორიის მოცემულ წერტილში) მოძრაობას აღწერს **მყისი**  $\vec{V}_i$  სიჩქარე. ის უტოლდება დროის ამ მომენტის შემცველ **უსასრულოდ** მცირე დროის შუალედში საშუალო სიჩქარეს [2];

- არათანაბარ მოძრაობას ახასიათებენ **საშუალო**  $\vec{V}_a$  სიჩქარით - სიჩქარით, რომელიც უნდა ჰქონოდა სხეულს, რომ იმავე  $t$  დროში, **თანაბარწრფივი** მოძრაობით შეესრულებინა იგივე {გარკვეული}  $\vec{S}$  გადაადგილება

$$\vec{V}_a = \vec{S} / t \quad (3.1)$$

- გამოიყენება **საშუალო სიჩქარის** სკალარული ფორმაც -  $L$  გზის საფუძველზე,  $V_a = L/t$ ;
- ამ 2 მიდგომის რიცხობრივი შედეგი ერთნაირია **მხოლოდ წრფეზე** და, თანაც, **ერთი მიმართულებით** მოძრაობისას;



$$\vec{V}_i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta \vec{S} / \Delta t = d\vec{S} / dt \quad (3.3)$$

$$V_{ix} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta x / \Delta t = dx / dt \quad (3.4)$$

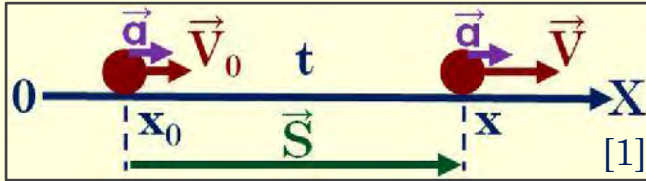
## 4.წრფივი თანაბრცვლადი მოძრაობა

✓ არათანაბარი მოძრაობისას სიჩქარის ცვლილების სისწრაფეს ასახავს  $\vec{a}$  აჩქარება. ზოგადად, აჩქარებაც შეიძლება იცვლებოდეს და საჭირო ხდება მისი საშუალო  $\vec{a}_a$  და მყისი  $\vec{a}_i$  მნიშვნელობების შემოტანა;

$$\vec{a}_a = \Delta \vec{V} / t \quad (4.1)$$

$$\vec{a}_i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta \vec{V} / \Delta t = d\vec{V} / dt \quad (4.2)$$

$$\vec{a}_i = d\vec{V} / dt = (d/dt)(d\vec{S} / dt) = d^2 \vec{S} / dt^2 \quad (4.3)$$



$\vec{a} = (\vec{V} - \vec{V}_0) / t \quad (4.4) \quad [a] = [V] / [t] = 1 \text{ მ/წმ}^2$   
 • 1 მ/წმ<sup>2</sup> აჩქარებისას სხეულის სიჩქარე 1 წამში იცვლება 1მ/წმ-ით;

✓ აქ ძირითადი ყურადღება ეთმობა **თანაბრცვლად** {თანაბრაჩქარებულ - თანაბრად მზარდი [1] სიჩქარით  $a = \text{const} > 0$  და თანაბარშენელებულ - თანაბრად კლებადი სიჩქარით  $a = \text{const} < 0$ } მოძრაობას;  
 ▪ **თანაბრცვლადი** მოძრაობისას დროის ნებისმიერ ტოლ შუალედში სიჩქარე ერთნაირად იცვლება;

▪ t დროში შეძენილი სიჩქარე  $V = V_0 + at \quad (4.5)$

• უძრაობიდან ( $V_0 = 0$ ) დაწყებული  $V = at \quad (4.6)$

• საშუალო სიჩქარე  $V_a = 0.5 \cdot (V_0 + V) \quad (4.7)$

▪ გადაადგილება t დროში  $S = V_0 t + at^2 / 2 \quad (4.8)$

{ $S = V_a t = 0.5 \cdot (V_0 + V)t = 0.5 \cdot (V_0 + V_0 + at)t = V_0 t + at^2 / 2$ };

• უძრაობიდან ( $V_0 = 0$ ) დაწყებული  $S = at^2 / 2 \quad (4.9)$

• V სიჩქარის მიღწევისას  $S = (V^2 - V_0^2) / 2a \quad (4.10)$

{ $S = V_a t = 0.5 \cdot (V_0 + V) \cdot (V - V_0) / a = (V^2 - V_0^2) / 2a$ };

$$\text{•}(4.10) \Rightarrow V = \sqrt{V_0^2 + 2aS} \quad (4.11)$$

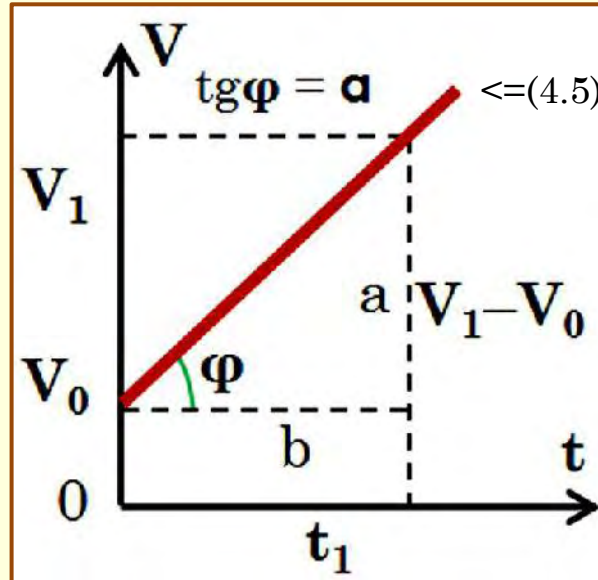
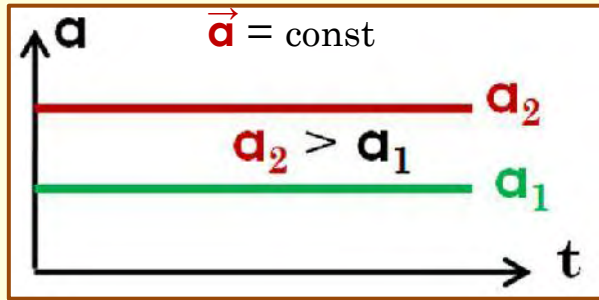
• უძრაობიდან ( $V_0 = 0$ ) დაწყებული  $V = \sqrt{2aS} \quad (4.12)$

▪ კოორდინატი t დროში  $x = x_0 + S = x_0 + V_0 t + at^2 / 2 \quad (4.13)$

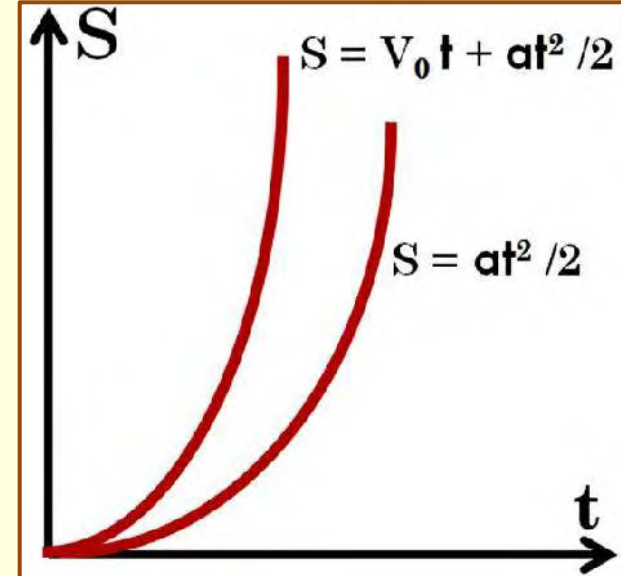
▪ {(4.13)  $x = x_0 + V_0 t + at^2 / 2$ } მოძრაობის განტოლებაა

წრფივი თანაბრცვლადი მოძრაობისას;

## გრაფიკები:



- სიჩქარე დროის წრფივი ფუნქციაა ( $V \sim t$ );
- გრაფიკის დახრილობას აჩქარება განსაზღვრავს:  $\text{tg}\varphi = a/b = (V_1 - V_0)/t = a$



- გადაადგილების გრაფიკი პარაბოლაა ( $S \sim t^2$ )



“მაღალ კომპზე ასვლა მხოლოდ ხრახნული კიბითაა შესაძლებელი.” Francis Bacon



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1561 - 1626

## სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 3

თემა:

სემესტრი I

### მექანიკა. კინემატიკა

ზვ.

021

1. მრუდწირული მოძრაობა

023

2. მყარი სხეულის გადატანითი და ბრუნვითი მოძრაობა

024

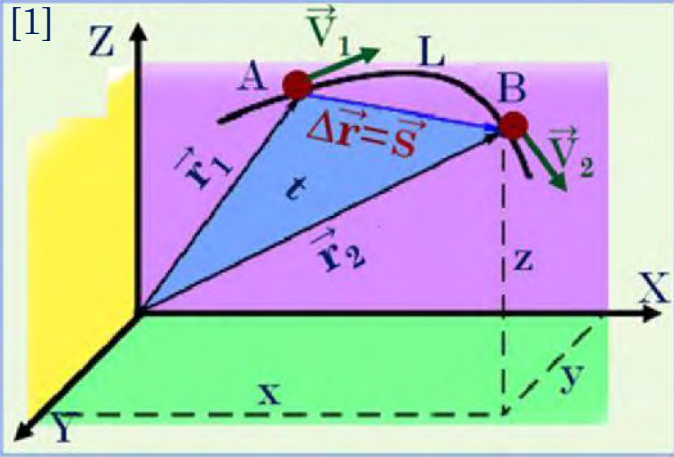
3. კუთხური სიჩქარე და კუთხური აჩქარება

026

კინემატიკის Mind Map



# 1. მრუდწირული მოძრაობა



✓ მრუდწირულია მოძრაობა, თუ მისი ტრაექტორია მრუდი წირია [1];  
 ▪  $t$  დროში A-დან B წერტილში გადანაცვლებისას სხეული გადის  $L$  სიგრძის რკალს და ასრულებს  $S$  გადაადგილებას, რომელიც რადიუს-ვექტორის  $\Delta \vec{r}$  ნაზრდის ტოლია;  
 ▪ **სიჩქარე**, ტრაექტორიის ნებისმიერ წერტილში, მიმართულია ამ წერტილში გავლებული მხევის გასწვრივ;  
 • მთლიანობაში მოძრაობა შეიძლება დახასიათდეს საშუალო სიჩქარით  $\vec{V}_a = \Delta \vec{r} / t$  (1.1)

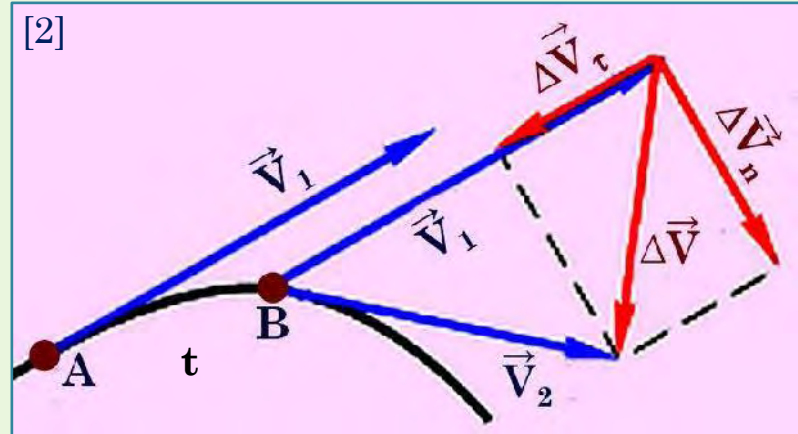
• სიჩქარე კონკრეტულ წერტილში - **მყისი სიჩქარე**  
 $\vec{V}_i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta \vec{r} / \Delta t = d\vec{r} / dt$  (1.2)  
 ტოლია რადიუს-ვექტორის პირველი რიგის წარმოებულისა დროით;  
 • ვინაიდან  $\Delta t \rightarrow 0$ ,  $\Delta r \approx L$  და სიჩქარის **სიდიდე** შეიძლება ჩაიწეროს  $L$  რკალის სიგრძით

$$V_i = dL / dt \quad (1.3);$$

• კოორდინატა ღერძებზე სიჩქარის გეგმილება :  
 $\{ V_x = dx / dt; V_y = dy / dt; V_z = dz / dt \}$  (1.4)

• ე.ი., სიჩქარის სიდიდე  $V = (V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)^{1/2}$  (1.5)

✓ სიჩქარის ვექტორის (თუნდაც მარტო მიმართულების) ცვლილების გამო, მრუდწირული მოძრაობა **ყოველთვის აჩქარებული** მოძრაობაა;



▪ **სიჩქარის ცვლილების**  $\Delta \vec{V}$  ვექტორის ორი  $\Delta \vec{V}_t$ ,  $\Delta \vec{V}_n$  მდგენელიდან:  $\Delta V_t$  ასახავს სიჩქარის სიდიდის, ხოლო  $\Delta V_n$  - მიმართულების **ცვლილებას** [2];

$$\Delta \vec{V} = \vec{V}_2 - \vec{V}_1 \quad (1.6) \quad \Delta \vec{V} = \Delta \vec{V}_t + \Delta \vec{V}_n \quad (1.7)$$

✓ სიჩქარის ვექტორის ცვლილება  $\Delta t$  დროში განსაზღვრავს მოძრაობის სამუჯლო და მეის აჩქარებებს

$$\vec{a}_a = \Delta \vec{V} / \Delta t \quad (1.8)$$

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta \vec{V} / \Delta t = d\vec{V}/dt \quad (1.9)$$

$$(1.1) \Rightarrow (1.9) \quad \vec{a} = d\vec{V}/dt = d^2 \vec{r}/dt^2 \quad (1.10)$$

ცხადია:

$$\{\mathbf{a}_x = d^2 x/dt^2; \mathbf{a}_y = d^2 y/dt^2; \mathbf{a}_z = d^2 z/dt^2\} \quad (1.11)$$

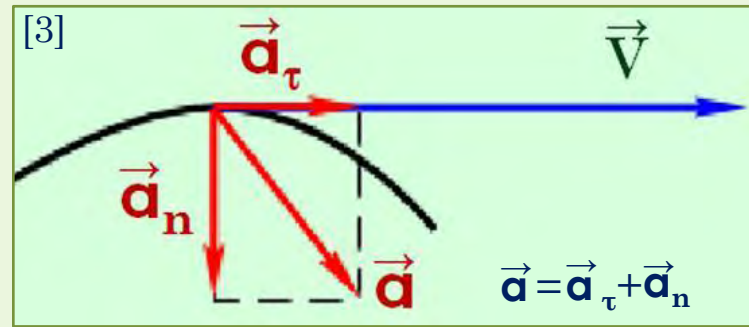
$$\mathbf{a} = (\mathbf{a}_x^2 + \mathbf{a}_y^2 + \mathbf{a}_z^2)^{1/2} \quad (1.12)$$

• აჩქარების მდგენელები ურთიერთ-მართობია, ე.ი.

$$\mathbf{a} = (\mathbf{a}_n^2 + \mathbf{a}_\tau^2)^{1/2} \quad (1.15)$$

და

$$\mathbf{a} = [(V^2/r)^2 + (dV/dt)^2]^{1/2} \quad (1.16)$$



• აჩქარების  $\vec{a}$  ვექტორის ორი  $\vec{a}_\tau$ ,  $\vec{a}_n$  მდგენელიდან  $\mathbf{a}_\tau$  ასახავს სიჩქარის სიდიდის, ხოლო  $\mathbf{a}_n$  - მიმართულების ცვლილებას [3];

• ტანგენციალურ  $\mathbf{a}_\tau$  აჩქარებას მხების მიმართულება აქვს

$$\mathbf{a}_\tau = dV/dt \quad (1.13)$$

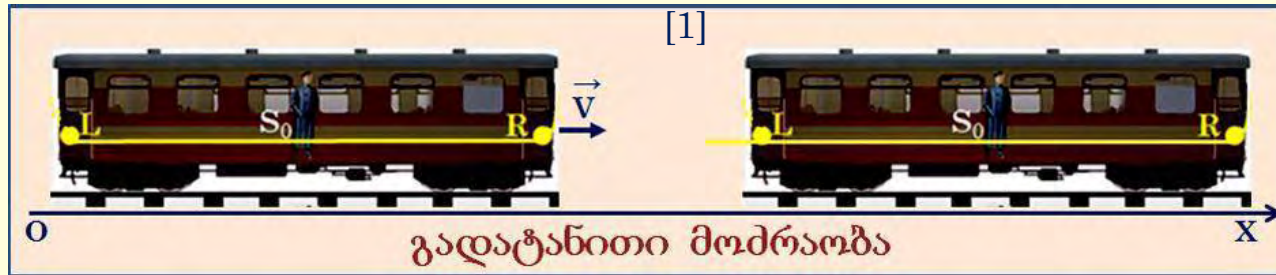
• ნორმალური  $\mathbf{a}_n$  აჩქარება მართ კუთხეს ადგენს სიჩქარის ვექტორთან და მიმართულია ტრაექტორიის სიმრუდის ცენტრისკენ

$$\mathbf{a}_n = V^2/r \quad (1.14)$$

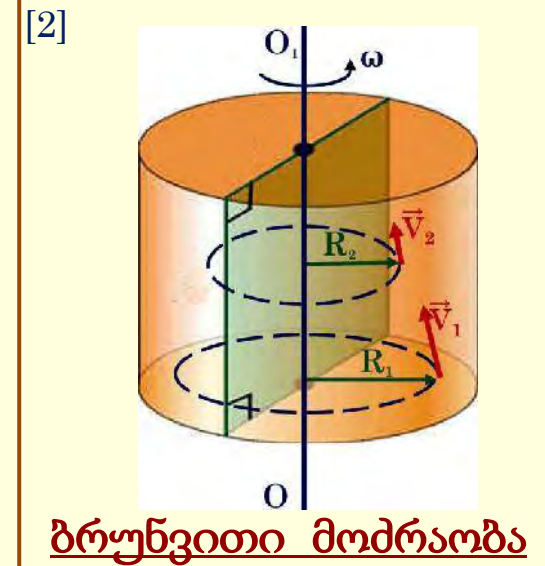
აქ -  $V$  სიჩქარის მნიშვნელობაა ტრაექტორიის იმ წერტილში, სადაც სიმრუდის რადიუსი არის  $r$ ;

## 2.მყარი სხეულის გადატანითი და ბრუნვითი მოძრაობა

✓ მყარი სხეულის ნებისმიერი მოძრაობა დაიყვანება {დეფორმაციის დაუშვებლობისას} 2 სახის მოძრაობაზე - **გადატანით** და **ბრუნვით** მოძრაობაზე;

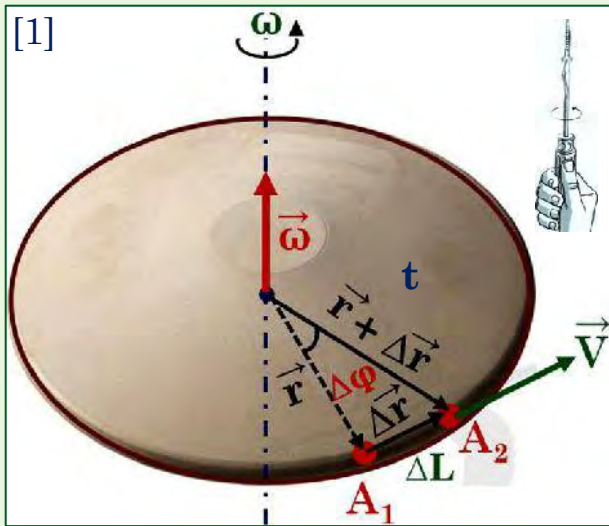


- ✓ მოძრაობა **გადატანითია** [1], რომლის დროსაც:
- სხეულში გავლებული **ნებისმიერი წრფე** {LR} რჩება თავისი თავის პარალელური;
  - ყველა წერტილი **ერთნაირად** მოძრაობს;
  - ყველა წერტილის მოძრაობის მახასიათებელი პარამეტრები {ტრაექტორია, სიჩქარე, აჩქარება} **ერთნაირია**;



- ✓ მოძრაობა **ბრუნვითია** [2], თუ
- ყველა წერტილი შემოწერს პარალელურ წრეწირებს, რომელთა ცენტრები **ერთ წრფეზე** - **ბრუნვის ღერძზე** მდებარეობს { $OO_1$ };
  - ბრუნვითი მოძრაობის ძირითადი მახასიათებლებია:
    - $\omega$  - კუთხური სიჩქარე და  $\beta$  - კუთხური აჩქარება;

### 3. კუთხური სიჩქარე და კუთხური აჩქარება



✓ მყარი სხეულის ბრუნვის სისწრაფე {სხეულის რომელიღაც წერტილის  $A_1$ -დან  $A_2$  მდებარეობაში გადანაცვლება [1]} აიწერება  $\omega$  კუთხური სიჩქარით, რომელიც დროის ერთეულში რადიუსის შემობრუნების კუთხის ტოლია:

▪ თანაბარი ბრუნვისას - ( $\omega = \text{const}$ )  $\omega = \Delta\varphi/\Delta t$  (3.1);

▪ არათანაბარი ბრუნვისას - მყისი კუთხური სიჩქარე  $\omega = d\varphi/dt$  (3.2);

▪  $\omega$  ვექტორული სიდიდეა. მისი მიმართულება დგინდება მარჯვენა ხრახნის წესით {თუ ხრახნის ბრუნვის მიმართულება ემთხვევა სხეულისას, მაშინ ხრახნის მოძრაობის მიმართულება განსაზღვრავს კუთხური სიჩქარის ვექტორის მიმართულებას};

• ცენტრალური კუთხე  $\Delta\varphi = \Delta L/r$  (3.3)  $\Rightarrow$  (3.1):

$$\omega = \Delta L/r\Delta t = \mathbf{V}/r \quad (3.4) \quad \Rightarrow \quad \mathbf{V} = \omega \mathbf{r} \quad (3.5)$$

✓ თანაბარი ბრუნვის აღსაწერად მოსახერხებელია შემდეგი პარამეტრების გამოყენება:

▪  $T$  - ბრუნვის პერიოდი;

▪  $\nu$  - ბრუნვის სიხშირე;

▪  $T$  - ერთი სრული ბრუნვის დრო  $\Rightarrow$  (3.1):

$$\{\Delta t \equiv T, \Delta\varphi \equiv 2\pi\} \Rightarrow \omega = 2\pi/T \quad (3.6);$$

▪  $\nu$  - დროის ერთეულში ბრუნვათა რიცხვია, ანუ

$$\nu = 1/T \Rightarrow (3.6) \Rightarrow \omega = 2\pi\nu \quad (3.7);$$

ერთეულები:

$$[\varphi] = 1 \text{ რად};$$

$$[\omega] = [\varphi]/[t] = 1 \text{ რად/წმ};$$

$$[T] = 1 \text{ წმ};$$

$$[\nu] = 1/[T] = \text{წმ}^{-1} = 1 \text{ ჰც};$$

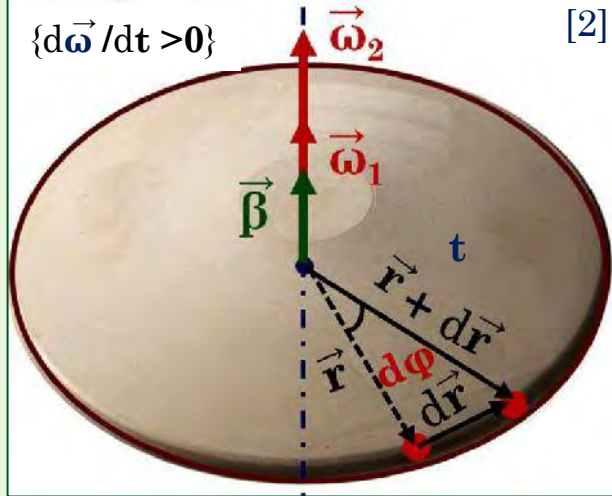
• 1 ჰერცი ისეთი ბრუნვის სიხშირეა, როდესაც 1 წამში 1 ბრუნვი სრულდება;



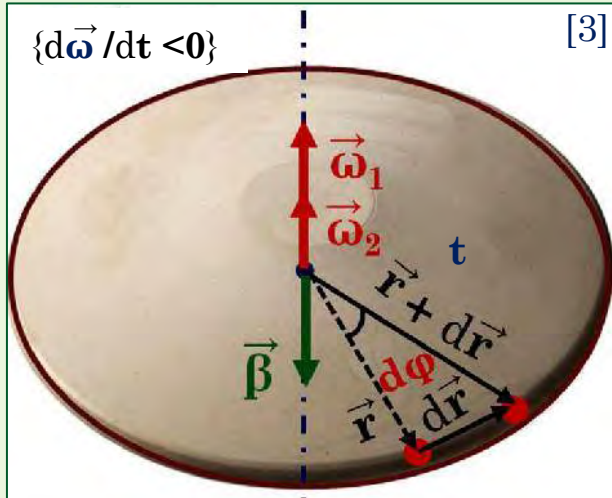
H. Hertz  
1857-1894



{ $d\vec{\omega}/dt > 0$ } [2]



{ $d\vec{\omega}/dt < 0$ } [3]



✓ არათანაბარი ბრუნვისას ( $\omega \neq \text{const}$ ) კუთხური სიჩქარის ცვლილებას ასახავს **კუთხური აჩქარება** {საშუალო}

$$\beta_a = \Delta\omega / \Delta t \quad (3.8)$$

▪ **კუთხური აჩქარება** ვექტორული სიდიდეა და მისი **მყისი** მნიშვნელობაა

$$\beta = d\vec{\omega} / dt \quad (3.9)$$

▪ მზარდი [2] და კლებადი [3] კუთხური სიჩქარეებისთვის  $\beta$ -ს მიმართულებები **ურთიერთსაპირისპიროა**;

▪ {(3.2)  $\omega = d\phi/dt$ }  $\Rightarrow$  (3.9):

$$\beta = d\omega / dt = d/dt(d\phi/dt) = d^2\phi/dt^2 \quad (3.10)$$

▪ კუთხური  $\beta$  და ტანგენციალური  $a_t$  აჩქარებების დასაკავშირებლად:

$$\{(3.5) \mathbf{V} = \omega \mathbf{r}\} \Rightarrow d\mathbf{V}/dt = \mathbf{r} d\omega/dt \quad (3.11)$$

$$(3.11) \Rightarrow \begin{matrix} \mathbf{a}_t \\ \mathbf{a}_t = r\beta \\ \beta \end{matrix} \quad (3.12)$$

ტანგენციალური  $a_t$  აჩქარება კუთხური  $\beta$  აჩქარებისა და  $r$  რადიუსის **ნამრავლის** ტოლია;

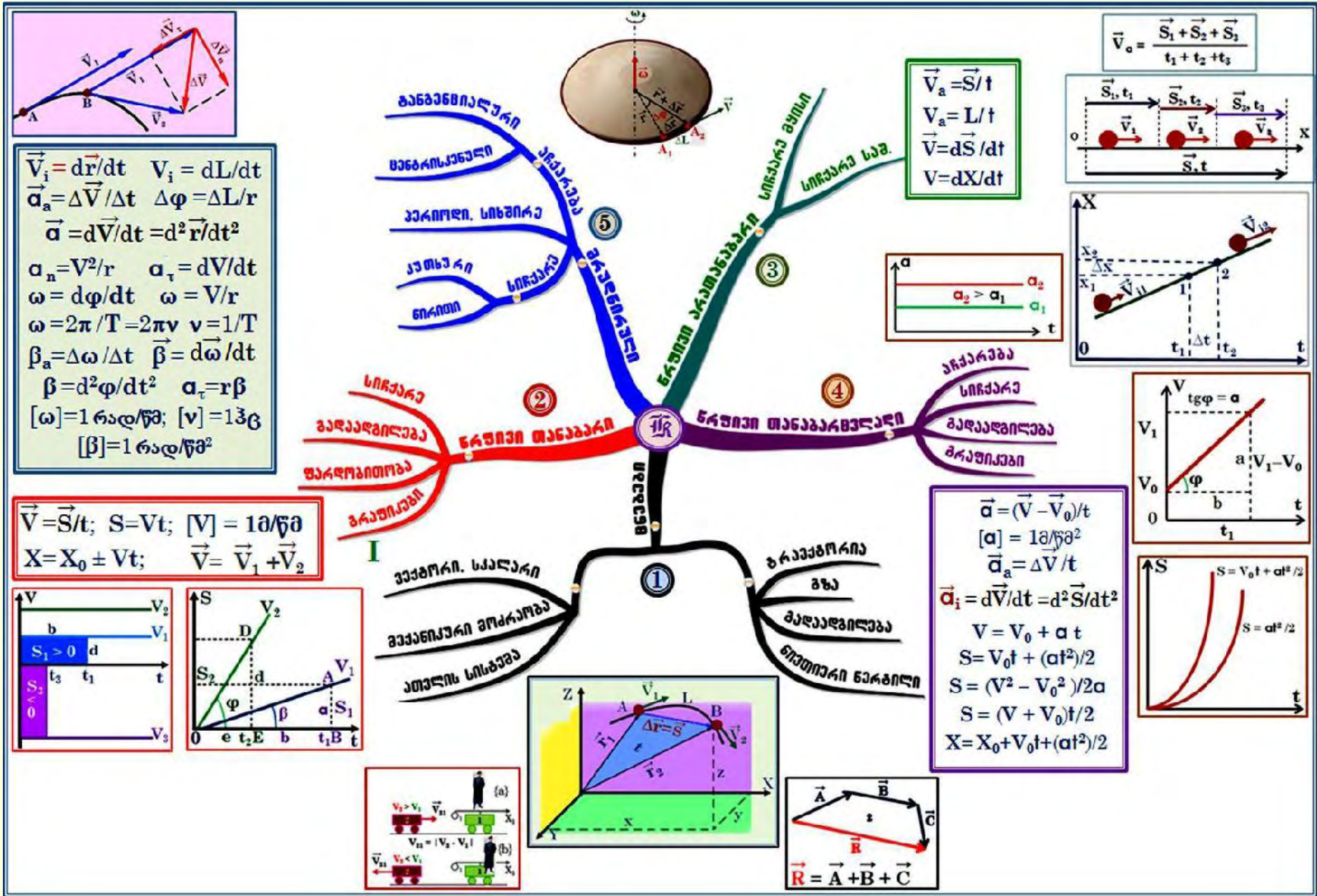
▪ ცენტრისკენული აჩქარება დაკავშირებული ბრუნვითი მოძრაობის მახასიათებელ შემდეგ სიდიდეებთან:

$$\mathbf{a}_n = V^2/r = \omega^2 r = 4\pi^2 v^2 r = 4\pi^2 r/T^2 \quad (3.13)$$

$$\bullet (3.8) \Rightarrow [\beta] = [\omega]/[t] = [\phi]/[t]^2 = 1 \text{ რად/წმ}^2$$



# კინემატიკის Mind Map





“დაფიქრდით, სანამ ჩაფიქრდებით.” Stanislaw Lem



რამდენი უნდა იცოდეთ, რომ იცოდეთ რამე ?!

1921 - 2006

## სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 4

თემა:

სემესტრი I

### მექანიკა . დინამიკა . ძალები მექანიკაში

გვ.

028

1.ნიუტონის კანონები (I, II, III)

031

2.მსოფლიო მიზიდულობის ძალა. სიმძიმის ძალა. წონა. უწონობა

# 1.ნიუტონის კანონები (I, II, III)

✓ კინემატიკისგან განსხვავებით, **დინამიკა** მოძრაობას სწავლობს ამ მოძრაობის გამომწვევ მიზეზებთან **ურთიერთკავშირში**;

▪ დინამიკის კანონები, რომლებიც აქ განიხილება, სამართლიანია მოძრაობისთვის, რომლის **სიჩქარე ბევრად მცირეა** სინათლის **სიჩქარესთან** ( $c=10^8$  მ/წმ) შედარებით - **კლასიკური {არარელატივისტური} მექანიკა**;

▪ ყველა სხეული ცდილობს შეინარჩუნოს თავისი მოძრაობის სიჩქარე. სხეულის ამ თვისებას **ინერტულობას** უწოდებენ. ე.ი, სხეული **თავად ინარჩუნებს** თავის მიმდინარე მოძრაობის სიჩქარეს (კერძო შემთხვევაში – **უძრაობას**), სანამ სხვა სხეულთა მოქმედება არ შეცვლის მას;

▪ სხეულის **ინერტულობას მასა** განსაზღვრავს, მასა **ინერტულობის ზომაა** {ასევე, მასა სხეულში ნივთიერების შემცველობას ასახავს};

▪ **ნივთიერების** მახასიათებელი სიდიდეა  $\rho$  **სიმკვრივე** - ერთეულოვან მოცულობაში ნივთიერების მასა:  $\rho = m/V$  (1.1)

▪ ერთეულები:  $[m]=1\text{კგ}$ ;  $[\rho]=1\text{კგ/მ}^3$ ;



I. Newton  
1643–1727



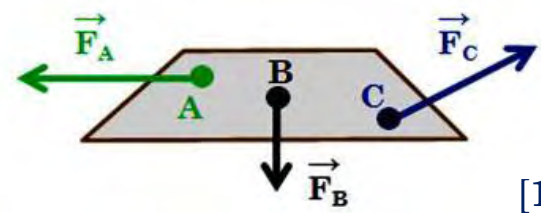
G. Galilei  
1564–1642

✓ დინამიკის საფუძველი ნიუტონის კანონებია: I, II, III, მსოფლიო მიზიდულობის (IV) კანონები;

✓ სხეულის სიჩქარის ცვლილებას მასზე სხვა სხეულის მოქმედება განაპირობებს. ქმედებას თან ახლავს უკუქმედება, ანუ სხეულები **ურთიერთქმედებენ**;

▪ სხეულზე სხვა სხეულის მოქმედებას **ძალა** ასახავს. **ძალის** ვექტორი ხასიათდება: **1.სიდიდით**; **2.მიმართულებით**; **3.მოდების წერტილით** [1] {A,B,C};

• ძალა {სხვა სხეულის მოქმედება} მოძრაობის **ცვლილების (აჩქარების)** მიზეზია და არა უშუალოდ მოძრაობის;



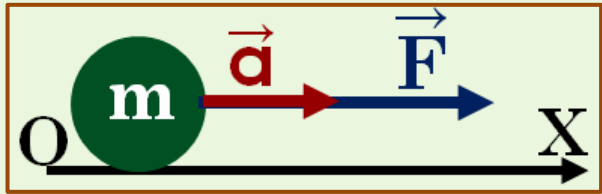
$$\vec{F}_A \neq \vec{F}_B \neq \vec{F}_C$$



✓ნიუტონის **I** კანონი: არსებობს **ათვლის სისტემები**, რომელთა მიმართაც სხეული **ინარჩუნებს** უძრაობის ან **თანაბარწრფივი** მოძრაობის მდგომარეობას, თუ მასზე ძალები **არ მოქმედებენ** ან ამ ძალების მოქმედება **კომპენსირებულია** (*ინერციის კანონი*);

▪სიჩქარის შენარჩუნების **მოვლენას**, როდესაც სხეული არანაირ ზეგავლენას არ განიცდის – **ინერცია** ეწოდება. ასეთ პირობებში მიმდინარე თანაბარწრფივ მოძრაობას კი – **ინერციული მოძრაობა**;

▪თუ ათვლის სისტემაში გარეშე ძალების ზემოქმედებისგან თავისუფალი სხეული, ან უძრავია, ან თანაბარწრფივად მოძრაობს (ე.ი. სრულდება **ნ.I** კანონი), მაშინ ასეთ სისტემას ათვლის **ინერციული** სისტემა ეწოდება. თუ **ნ.I** კანონი **არ** სრულდება – ათვლის სისტემა **არაინერციულია**;



$\vec{a} = \vec{F}/m$  (1.2)       $\vec{F} = m\vec{a}$  (1.3)

▪სხეული აჩქარებულად მოძრაობს **ძალის** {სხვა სხეულის} ზემოქმედებით. აჩქარების სიდიდე ასევე სხეულის **ინერტულობაზე** (**მასაზე**) არის დამოკიდებული;

✓ნიუტონის **II** კანონი: სხეულის **აჩქარება** პროპორციულია მასზე მოდებული **ძალისა** და მიმართულებით ემთხვევა იმ **წრფეს**, რომლის გასწვრივაც ეს **ძალა მოქმედებს** (1.2);

▪აჩქარება **პირდაპირპროპორციულია** სხეულზე მოდებული **ძალისა** და **უკუპროპორციულია** სხეულის **მასისა**;

▪II კანონში  $\vec{F}$  ძალა წარმოადგენს სხეულზე მოდებული ყველა ძალის **ტოლქმედს**;

▪(1.3)  $\Rightarrow \vec{F}$  ძალის გეგმილებს კოორდინატთა ღერძებზე

$F_x = m a_x = m d^2 x / dt^2$  (1.4)

$F_y = m a_y = m d^2 y / dt^2$  (1.5)

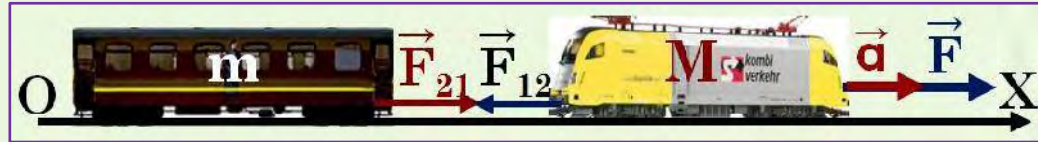
$F_z = m a_z = m d^2 z / dt^2$  (1.6)

ეწოდება **მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებები**;

(1.3)  $\Rightarrow [F] = [m][a] = ML/T^2 = 1 \text{ კგმ/წმ}^2 = 1 \text{ ნიუტონი}$  – ძალაა, რომელიც 1 კგ მასის სხეულს 1 მ/წმ<sup>2</sup> აჩქარებას ანიჭებს;



✓ ნიუტონის **III** (სხეულთა ურთიერთქმედების) კანონი იხილავს ძალების განაწილებას ქმედება-უკუქმედებისას;



• ნიუტონის II კანონით:

$$M\mathbf{a} = \mathbf{R}_1 = \mathbf{F} - \mathbf{F}_{12} \quad (1.7)$$

$$m\mathbf{a} = \mathbf{R}_2 = \mathbf{F}_{21} \quad (1.8)$$

ამ განტოლებათა შეკრებით

$$(M+m)\mathbf{a} = \mathbf{F} + (\mathbf{F}_{21} - \mathbf{F}_{12}) \quad (1.9)$$

ცხადია, {მთლიანად}  $M+m$  მასის სხეულებს აჩქარებას  $\mathbf{F}$  ძალა ანიჭებს, ე.ი.  $(\mathbf{F}_{21} - \mathbf{F}_{12}) = \mathbf{0}$  (1.10)

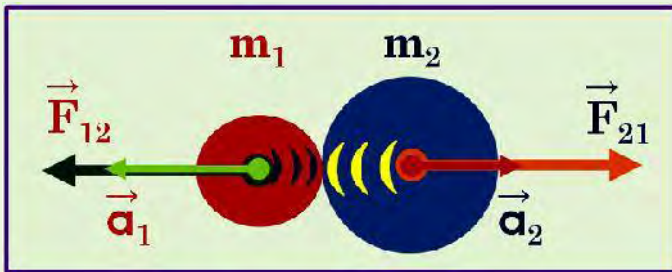
- $m$  და  $M$  მასის გადაბმული სხეულები  $\mathbf{F}$  ძალის გავლენით მოძრაობენ  $\mathbf{a}$  აჩქარებით. უწონო გადაბმა:
- $\mathbf{F}_{21}$  ძალით უზრუნველყოფს  $m$  მასის სხეულის მოძრაობას;
- $\mathbf{F}_{12}$  ძალით კი აფერხებს  $M$  მასის სხეულს;

ნიუტონის **III** კანონი

✓ **ორი სხეული ერთმანეთთან ურთიერთქმედებს ტოლი და საწინააღმდეგოდ მიმართული ძალებით**

$$\mathbf{F}_{21} = \mathbf{F}_{12} \quad (1.11) \quad \text{და} \quad \vec{\mathbf{F}}_{12} = -\vec{\mathbf{F}}_{21} \quad (1.12)$$

- ქმედება იწვევს ტოლსა და საწინააღმდეგო უკუქმედებას;
- ქმედება-უკუქმედების ძალები ერთმანეთს არასდროს არ აწანასწორებენ, ვინაიდან ისინი სხვადასხვა სხეულებზეა მოდებული;



$$\mathbf{F}_{12} = \mathbf{F}_{21} \Rightarrow m_1\mathbf{a}_1 = m_2\mathbf{a}_2 \quad (1.13)$$

$$\mathbf{a}_1/\mathbf{a}_2 = m_2/m_1 \quad (1.14)$$

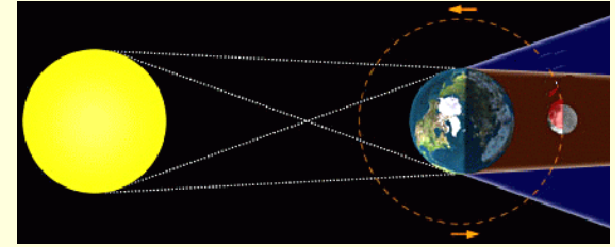
• სხეულთა ურთიერთქმედებისას შეძენილი აჩქარებები მათი მასების უკუპროპორციულია

## 2. მსოფლიო მიზიდულობის ძალა. სიმძიმის ძალა. წონა. უწონობა

✓ ნიუტონი სწავლობდა ციური სხეულების მოძრაობას (კერძოდ - მთვარის) და საფუძველი ჩაუყარა **გრავიტაციის** (მსოფლიო მიზიდულობის) თეორიას;

▪ ლეგენდის (სავარაუდოდ მისივე შეთხზულის) შესაბამისად, 1665 წლის ზაფხულში, ვაშლის ხის ძირას მჯდომმა ნიუტონმა მნიშვნელოვანი დებულებები ჩამოაყალიბა (რეალურად, 1685 წ-ს):

- რამ განაპირობა ვაშლის ვარდნა? – იზიდავდა დედამიწა;
- თუ დედამიწა იზიდავს ვაშლს, ვაშლიც იზიდავს დედამიწას და, საერთოდ, ასეთივე სახის მიზიდულობა ყველა სხეულს უნდა ახასიათებდეს;
- მიზიდულობის ძალის სიდიდე ურთიერთქმედ სხეულთა მასების სიდიდეზეა დამოკიდებული;
- მასებს შორის მანძილის ზრდა ამცირებს მიზიდულობის ძალას;



I. Newton  
1643–1727

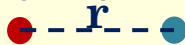
$$F \sim 1/r^2$$



R. Hooke  
1635–1703

▪ (2.1) მართებულია {მანძილის დადგენის პრობლემა არ ჩნდება} თუ.

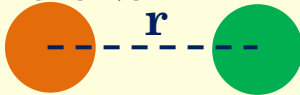
1. სხეულები ნივთიერი წერტილებია



2. ურთიერთქმედებენ ნივთიერი წერტილი და სფერული ფორმის სხეული



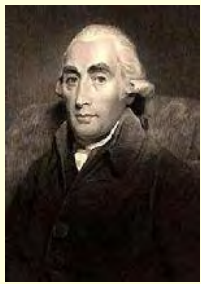
3. ურთიერთქმედებს ორი სფერო



✓ მსოფლიო მიზიდულობის კანონი

$$F = Gm_1m_2/r^2 \quad (2.1)$$

სამყაროს ნებისმიერი ნაწილაკი იზიდავს ნებისმიერ სხვა ნაწილაკს ძალით, რომელიც პირდაპირპროპორციულია მათი მასების ნამრავლისა, უკუპროპორციულია მათ შორის მანძილის კვადრატისა და მიმართულია მათი შემაერთებელი წრფის გასწვრივ;



H. Cavendish  
1731–1810

▪(2.1)  $\rightarrow G=Fr^2/m_1m_2$  (2.2) და  $[G]=15\text{მ}^2/\text{კგ}^2$ ;  
 • $G$  გრავიტაციული მუდმივა რიცხობრივად იმ ძალის მოდულის ტოლია, რომლითაც ერთმანეთს იზიდავს თითო კგ მასის ნივთიერი წერტილები, როდესაც მათ შორის მანძილი **1 მ**-ია;

• $G$ -ს სიდიდე ცდით დაადგინა კავენდიშმა

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ მ}^2/\text{კგ}^2;$$

•ამდენად, გრავიტაციული ურთიერთქმედება **სუსტია** ;

✓ მსოფლიო მიზიდულობის ძალის ერთერთი გამოვლინებაა  $F_g$  **სიმძიმის ძალა** - ძალა, რომლითაც  $\{M$  მასის და  $R$  რადიუსის $\}$  დედამიწა იზიდავს მის მახლობლად  $\{r \approx R\}$  მყოფ  $\{m$  მასის $\}$  სხეულებს (2.3);

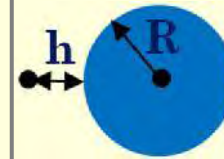
▪ნიუტონის II კანონით კი, **სიმძიმის ძალა** სხეულის მასისა და  $g$  სიმძიმის ძალის  $\{$ თავისუფალი ვარდნის (გალილეი) $\}$  აჩქარების ნამრავლის (2.4) ტოლია;

▪**მხოლოდ სიმძიმის ძალის** გავლენით  $\{(2.5),$  ვაკუუმში თავისუფალი ვარდნა $\}$  ყველა სხეული იძენს დედამიწის ცენტრისკენ მიმართულ, სიდიდით ერთნაირ  $g=9.81$  მ/წმ<sup>2</sup> აჩქარებას  $\{r \approx R\}$ ;

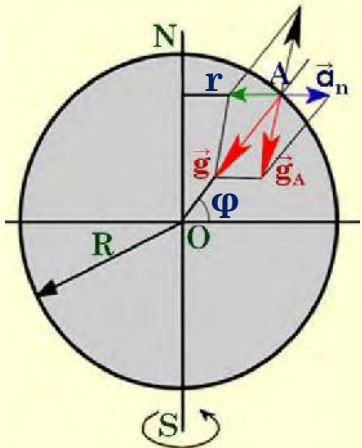
$$F_g = GMm/R^2 \quad (2.3)$$

$$F_g = mg \quad (2.4)$$

$$\{(2.3), (2.4)\} \rightarrow g = GM/R^2 \quad (2.5)$$



•დედამიწიდან  $h$  სიმაღლეზე  $F_g$  ძალა მცირდება:  
 $F_g = GMm/(R+h)^2$   
 და მცირდება  $g$ ;  
 $\{h = 100\text{კმ}$  სიმაღლეზე  $g = 9.5$  მ/წმ<sup>2</sup> $\}$



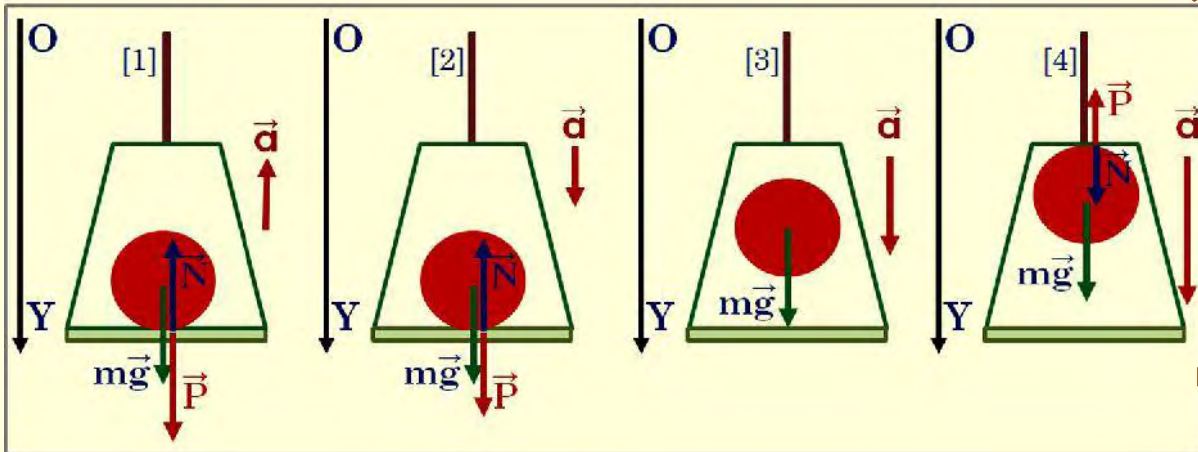
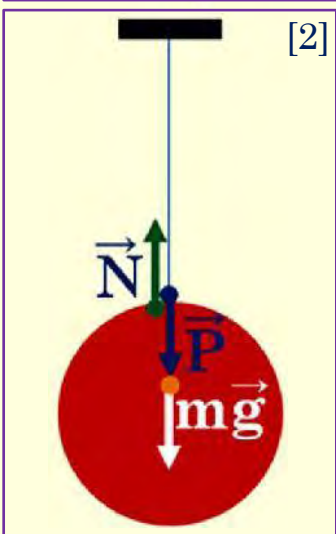
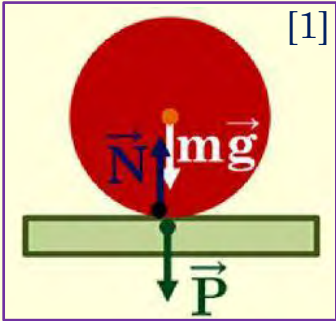
▪ $g$  სხეულის მასაზე (2.5) **დამოკიდებული არ არის**, მაგრამ მცირედ იცვლება მდებარეობის ( $\varphi$ -ს, განედის) მიხედვით. დედამიწის საკუთარი ღერძის ირგვლივ ბრუნვა, ანუ **ნორმალური**  $a_n$  აჩქარების **არსებობა** (სისტემა **არაინერციულია**) აჩენს  $g$ -ს **სუსტ** დამოკიდებულებას განედზე ( $\varphi$ ):  $\vec{g}_A = \vec{g} + \vec{a}_n$  (2.6), ხოლო  $a_n = \omega^2 R \cos \varphi$  (2.7);

•შედეგად,  $g$  მაქსიმალურია პოლუსზე  $9.832$  მ/წმ<sup>2</sup>, მინიმალური - ეკვატორზე  $9.780$ . მიღებული საშუალო მნიშვნელობაა  $9.81$  მ/წმ<sup>2</sup>;



✓სხეულის ხშირად გამოყენებადი მახასიათებელია წონა. წონა  $\vec{P}$  სიმძიმის ძალის მოქმედების შედეგია, მაგრამ ეს ძალები პრინციპულად განსხვავებულია:

- სხეულის სიმძიმის ძალა გრავიტაციულია და თვით ამ **სხეულზეა** მოდებული;
- სხეულის წონა – საყრდენში ან საკიდელში აღძრული რეაქციის (**დრეკადობის**) ძალაა. წონა კი- **საყრდენზე** [1], ან **საკიდელზეა** [2] მოდებული;
- წონა** - ძალაა რომლითაც სხეული აწვება საყრდენს ან ჭიმავს საკიდელს;
- თუ სხეული, თავის საყრდენთან ან საკიდელთან ერთად, აჩქარებულად მოძრაობს, მაშინ აჩქარების {ვერტიკალისადმი} **მიმართულების** მიხედვით, წონა შეიძლება სიმძიმის ძალაზე **მეტი**, **ნაკლები**, ან **ნულის** ტოლი აღმოჩნდეს, ან სულაც მიმართულება საპირისპიროზე შეიცვალოს;



▪ნიუტონის II კანონით:  

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} \quad (2.8) \rightarrow$$

$$\vec{N} = m(\vec{a} - \vec{g}) \quad (2.9)$$
 •რადგან  $\vec{N} = -\vec{P} \quad (2.10) \Rightarrow (2.9)$   

$$\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a}) \quad (2.11)$$
 და, ასევე,  $P = m(g - a_y) \quad (2.12)$

- [1]  $a_y = -a \rightarrow P = m(g+a)$  – წონა იზრდება;
- [2]  $a_y = a < g \rightarrow P = m(g-a)$  – წონა მცირდება;
- [3]  $a_y = a = g \rightarrow P = m(g-g) = 0$  უწონობა;
- [4]  $a_y = a > g \rightarrow P = m(g-a) < 0$  სხეული აწვება ჭერს;





“ჩვენ არ ვფლობთ იმას, რაც არ გვესმის.” Johann W. von Goethe



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1749 - 1832

## სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 5

თემა:

სემესტრი I

### მექანიკა . დინამიკა . ძალები მექანიკაში

88·

1.თავისუფლად ვარდნილი სხეულის მოძრაობა

035

2.დედამიწის ხელოვნური თანამგზავრის მოძრაობა

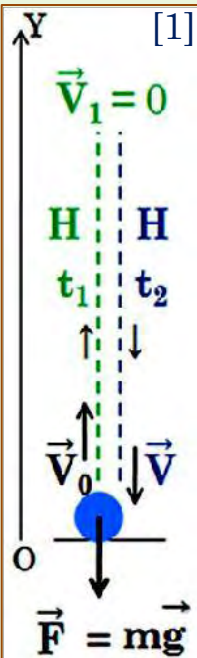
037

3.ხახუნის ძალა

039

# 1. თავისუფლად ვარდნილი სხეულის მოძრაობა

✓ განიხილება 3 მოძრაობა {1. ვერტიკალურად ასროლილი; 2. ჰორიზონტალურად გასროლილი და 3. კუთხით გასროლილი სხეულთა მოძრაობა}. სამივე შემთხვევაში სხეულზე მოქმედებს მხოლოდ სიმძიმის ძალა და გააჩნია მხოლოდ **g** თავისუფალი ვარდნის აჩქარება;



1. მოქმედი სიმძიმის ძალა საწყისი (ასროლის) სიჩქარის საპირისპიროა, სხეული იმოძრაებს შენელებულად მანამ, სანამ არ მიაღწევს  $\{V_0$  სიჩქარის შესაბამისს} ასვლის მაქსიმალურ  $H$  სიმაღლეს (ამ სიმაღლეზე მისი სიჩქარე  $V_1 = 0$ ):

• მაქსიმალური სიმაღლე  $H = (V_1^2 - V_0^2) / 2(-g) = V_0^2 / 2g$  (1.1)

• ასვლა-ჩამოსვლის {ტოლი} დრო  $t_1 = t_2 = (V_1 - V_0) / (-g) = V_0 / g$  (1.2)

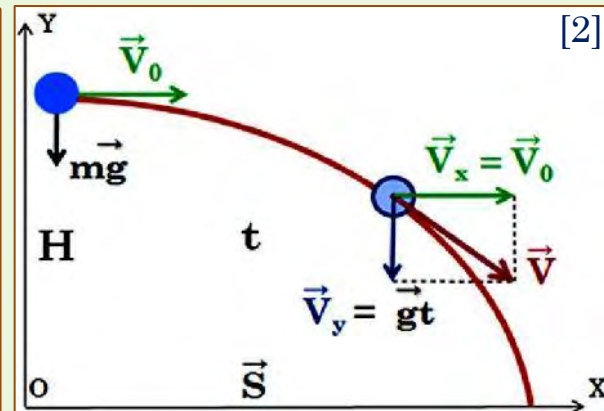
• მაქსიმალური სიმაღლიდან სხეული დაიწყებს თავისუფალ ვარდნას უსაწყისო ( $V_1 = 0$ ) სიჩქარით. ვინაიდან ზევით და ქვევით  $g$  აჩქარებით მოძრაობისას, სხეული გადის ერთსა და იმავე  $H$  სიმაღლეს, ორივე შემთხვევაში რიცხობრივად ერთნაირი იქნება სიჩქარეთა ცვლილებაც

$$|V_1 - V_0| = |V - V_1|, \text{ მაგრამ } V_1 = 0 \text{ და } |V| = |V_0| \quad (1.3)$$

2.  $H$  სიმაღლიდან, ჰორიზონტალურად  $\vec{V}_0$  სიჩქარით გასროლილი სხეული ერთდროულად მონაწილეობს ორ დამოუკიდებელ მოძრაობაში: 1) თავისუფალი ვარდნა უსაწყისო სიჩქარით  $\{g$  აჩქარებით}; 2) თანაბარი წრფივი მოძრაობა უცვლელი  $\vec{V}_0$  სიჩქარით OX ღერძის გასწვრივ:

$$H = gt^2/2 \quad (1.4) \quad t = (2H/g)^{1/2} \quad (1.5) \quad |V_y| = gt \quad (1.6) \quad |V_x| = V_0$$

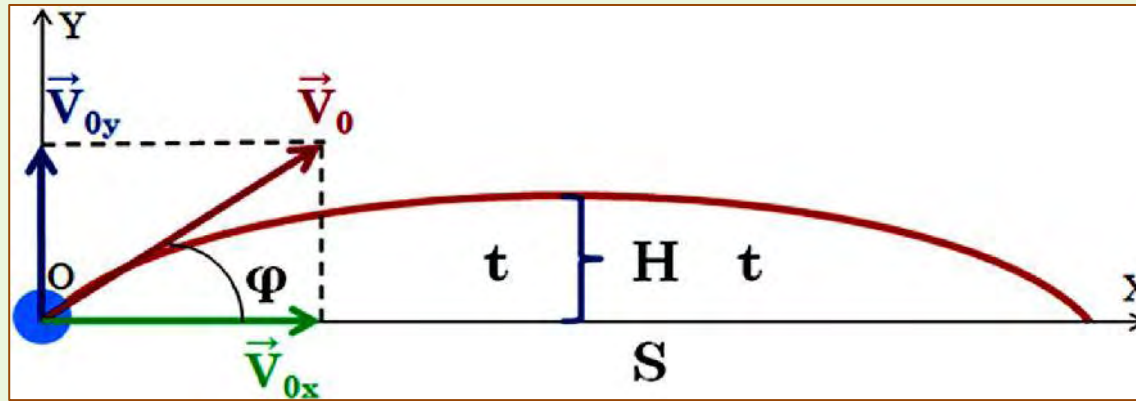
$$V = (V_x^2 + V_y^2)^{1/2} = (V_0^2 + g^2 t^2)^{1/2} \quad (1.7) \quad S = V_0 t \quad (1.8)$$



3. სხეული გაისროლეს  $\vec{V}_0$  სიჩქარით, რომელიც ჰორიზონტთან  $\varphi$  კუთხეს ადგენს. სხეული ერთდროულად ორ დამოუკიდებელ მოძრაობაში მონაწილეობს:

- 1) ვერტიკალურად –  $V_{0y}$  სიჩქარით ასროლილი სხეულის მოძრაობა;
- 2) ჰორიზონტალურად – თანაბარწრფივი მოძრაობა, უცვლელი  $V_{0x}$  სიჩქარით;

$$V_{0x} = V_0 \cos\varphi \quad (1.9) \quad V_{0y} = V_0 \sin\varphi \quad (1.10)$$



■ ასვლის მაქსიმალური სიმაღლე იმ წერტილით ისაზღვრება, რომელშიც სიჩქარის ვერტიკალური მდგენელი  $V_y = 0$

$$H = (V_y^2 - V_{0y}^2) / 2(-g) = V_{0y}^2 / 2g = (V_0^2 \sin^2\varphi) / 2g \quad (1.11)$$

■ მაქსიმალურ სიმაღლეზე ასვლის დრო  $t$  და მთელი მოძრაობის ( $T=2t$ ) დრო:

$$t = (V_y - V_{0y}) / (-g) = V_{0y} / g = (V_0 / g) \sin\varphi \quad (1.12) \quad T = 2t = 2(V_0 / g) \sin\varphi \quad (1.13)$$

■  $T$  დროის განმავლობაში მოძრაობისას სხეული ჰორიზონტის გასწვრივ გადაინაცვლებს  $S$  მანძილით, რომელიც სიჩქარის ჰორიზონტალური  $V_{0x}$  გეგმილით განისაზღვრება

$$S = V_{0x} T = V_0 T \cos\varphi = (2V_0^2 / g) \cos\varphi \sin\varphi = (V_0^2 / g) \sin 2\varphi \quad (1.14)$$

• ნებისმიერი ფიქსირებული სიჩქარისას მაქსიმალური სიშორე მიიღწევა  $\varphi = 45^\circ$  კუთხისას;

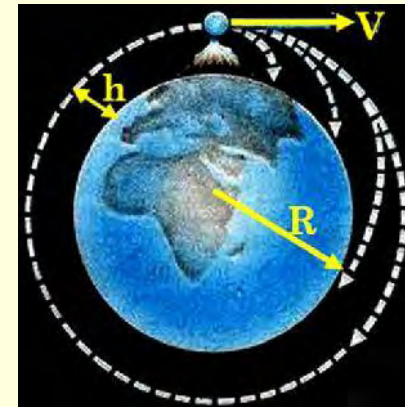
## 2. დედამიწის ხელოვნური თანამგზავრის მოძრაობა

✓ დედამიწის ხელოვნური თანამგზავრი შეიძლება ვუწოდოთ სხეულს, რომელიც გრავიტაციის, ძირითადად, დედამიწის მიზიდულობის ძალის გავლენით და ინერციით ბრუნავს ელიფსურ ტრაექტორიაზე (ორბიტაზე), დედამიწის ზედაპირიდან რამდენიმე ასეულ კილომეტრ სიმაღლეზე;

- სხეული გახდება დედამიწის ხელოვნური თანამგზავრი თუ მოხერხდა მისთვის:
  1. საკმარისი ვერტიკალური აჩქარების მინიჭება და დედამიწის ზედაპირიდან მნიშვნელოვან  $h > 100$  კმ სიმაღლეზე ატანა (ფაქტიურად ატმოსფეროს ფარგლებს გარეთ);
  2. მიღწეულ  $h$  სიმაღლეზე ისეთი ჰორიზონტალური  $V$  სიჩქარის მინიჭება, რომ ცენტრისკენული  $a_c$  აჩქარება ამ სიმაღლეზე  $g$ -ს სიდიდეს გაუტოლდეს;

▪ ამ პირობების შესრულებით სხეული გახდება დედამიწის ხელოვნური თანამგზავრი რადგან:

1. სიჩქარის სწორად შერჩეული სიდიდე არ აძლევს საშუალებას მსოფლიო მიზიდულობის ძალას დააბრუნოს სხეული დედამიწაზე;
2. მოცემულ სიმაღლეზე მოქმედი მიზიდულობის ძალა, ზღუდავს რა სხეულის მოძრაობას, უზრუნველყოფს უცვლელ, სტაციონარულ ორბიტაზე მის ბრუნვას;
3. მოძრაობის ორბიტის შეცვლა, დედამიწაზე დასაბრუნებლად აუცილებელი მანევრირების განხორციელება მხოლოდ ძრავის ამოქმედებით და, შესაბამისად, სიჩქარის შემცირებით ხდება შესაძლებელი;



$$a_c = g; h \ll R \Rightarrow$$

$$V^2/R = g;$$

$$V = (Rg)^{1/2} \quad (4.1)$$



▪(4.1)-ში  $R = 6400$  კმ და  $g = 9.81$  მ/წმ<sup>2</sup> გათვალისწინებით მივიღებთ  $V \approx 7.9 \cdot 10^3$  მ/წმ;

• $V \approx 8$ კმ/წმ **I კოსმოსური სიჩქარეა**. ასეთი ჰორიზონტალური სიჩქარე უნდა მიენიჭოს თანამგზავრს, რომ მან იბრუნოს წრიულ ორბიტაზე;

- გამოვყოთ ჰორიზონტალური სიჩქარის კიდევ რამდენიმე მნიშვნელობა:
- $V < 7.9$  კმ/წმ – თანამგზავრის ტრაექტორია გადაიკვეთება დედამიწის ზედაპირთან, ანუ თანამგზავრი ჩამოვარდება;
  - $7.9$  კმ/წმ  $< V < 11.2$  კმ/წმ – თანამგზავრი იმოდრავებს ელიფსურ ტრაექტორიაზე, და რაც მეტი იქნება სიჩქარე, მით უფრო გაჭიმული აღმოჩნდება ეს ელიფსი;
  - $V \geq 11.2$  კმ/წმ – **II კოსმოსური სიჩქარე**, სხეული სამუდამოდ დატოვებს დედამიწას და გახდება მზის ხელოვნური თანამგზავრი;
  - $V \geq 16.7$  კმ/წმ – **III კოსმოსური სიჩქარე**, სხეული დატოვებს მზის სისტემას;

▪კავშირგაბმულობის სისტემებში გამოიყენება ეკვატორის თავზე მოძრავი გეოსტაციონარული თანამგზავრები {დედამიწის ერთი წერტილის თავზე, დედამიწასთან ერთად მოძრავი თანამგზავრები}. მახასიათებლები:

- ორბიტის რადიუსი 42 164 კმ;
- სიმაღლე ზღვის დონიდან 35 786 კმ;
- ბრუნვის პერიოდი 24 სთ;



### 3. ხახუნის ძალა

✓ ხახუნის ძალა, დრეკადობის ძალის მსგავსად, ელექტრომაგნიტური ბუნებისაა, მაგრამ, მისგან განსხვავებით, სხეულთა არა მარტო ურთიერთგანლაგებაზე, არამედ ასევე ფარდობით სიჩქარეზეა დამოკიდებული;

▪ აქ განიხილება გარეგანი მშრალი ხახუნი - ხახუნის ძალა, რომელიც აღიძვრება შემებ მყარ სხეულებს შორის. არსებობს ასევე:

• სველი ხახუნის ძალა - სხეულის სითხეში მოძრაობისას;

• ჰაერის წინააღმდეგობის ძალა - სხეულის ჰაერში მოძრაობისას;

▪ სითხეებისა თუ აირების ფენების ერთმანეთის მიმართ სხვადასხვა სიჩქარით მოძრაობა აღძრავს შინაგან ხახუნს;

✓ მშრალი ხახუნის ძალა – 3 სახისაა:

1. უძრაობის ხახუნის ძალა –

ხელს უშლის სხეულის ადგილიდან დაძვრას;

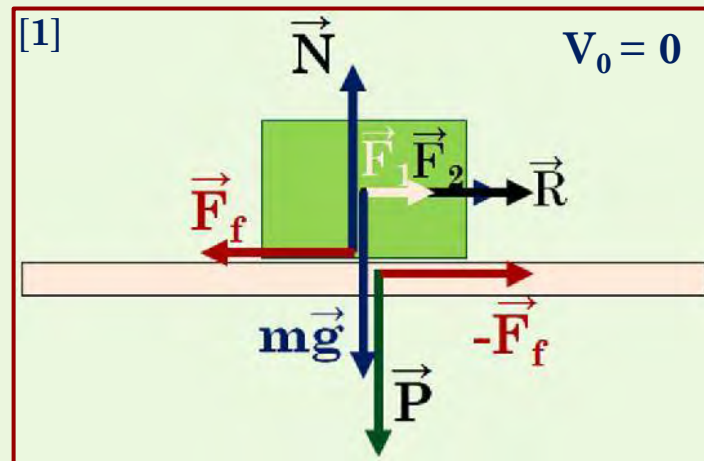
2. სრიალის ხახუნის ძალა –

ერთი სხეულის ზედაპირზე მეორის სრიალისას აღიძვრება;

3. გორვის ხახუნის ძალა –

ერთი სხეულის ზედაპირზე მეორის გორვისას აღიძვრება;

▪ უძრაობის ხახუნის ძალა სიდიდით ყოველთვის სხეულზე მოქმედი დანარჩენი ძალების ტოლქმედის ტოლია და მიმართულია მის საწინააღმდეგოდ, შემხები ზედაპირის პარალელურად (ხახუნის ძალის I თავისებურება);



$$\vec{F}_f = -\vec{R} \quad (3.1) \quad \vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \quad (3.2)$$

• გავზარდოთ  $\vec{R}$  ტოლქმედი ძალა. სხეული რჩება უძრავი, ე.ი. გაიზარდა უძრაობის ხახუნიც;

▪ **R** ტოლქმედი ძალის შემდგომი ზრდისას, **R**-ს გარკვეული მნიშვნელობისას სხეული ამოძრავდება. ე.ი.:

• **არსებობს** უძრაობის ხახუნის ძალის **მაქსიმალური  $F_{fm}$**  მნიშვნელობა. თუ მოდებული ძალების **R** ტოლქმედი  **$F_{fm}$** -ს გადააჭარბებს, სხეული ამოძრავდება - უძრაობის ხახუნი იცვლება სრიალის ხახუნით  **$F_{f0}$**  (ხახუნის ძალის **II** თავისებურება);

$$\bullet F_{fm} \approx F_{f0} = \mu N \quad (3.3)$$

• სრიალის ხახუნის ძალა პროპორციულია საყრდენზე მოქმედი **P** წნევის ძალის, ანუ სხეულზე მოქმედი **N** საყრდენის **რეაქციის** ძალის;

• ხახუნის კოეფიციენტი  **$\mu$**  დამოკიდებულია

- მოხახუნე სხეულების გვარობაზე;
- მათი ზედაპირის დამუშავების ხარისხზე;

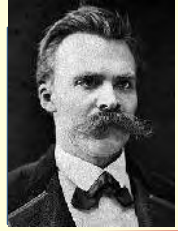
✓ სხეულის გადასაადგილებლად ბორბლის მრავალსაუკუნოვანი წარმატებული გამოყენება განსაზღვრა გორვის ხახუნის მნიშვნელოვანმა **სიმცირემ** სრიალის ხახუნთან შედარებით;

▪ გორვის ხახუნის  **$F_{ft}$**  ძალა **f** {გორვის} ხახუნის კოეფიციენტის და **N** საყრდენის რეაქციის ძალის გარდა დამოკიდებულია მგორავი სხეულის **R** რადიუსზე

$$F_{ft} = fN/R \quad (3.4)$$



“და თუ არა გაქვს მეტად არც ერთი კიბე, ისწავლე საკუთარ თავზე აძრომა, აბა სხვანაირად ზევით როგორ ახვალ?” Friedrich Nietzsche



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1844 - 1900

## სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 6

თემა:

სემესტრი I

### მექანიკა . დინამიკა

88·

042

1.დრეკადობის ძალა

044

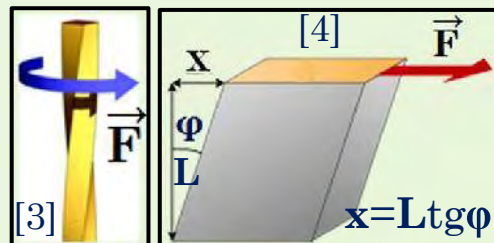
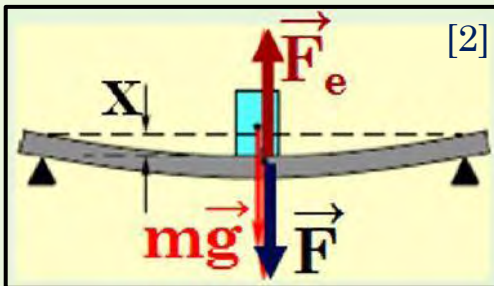
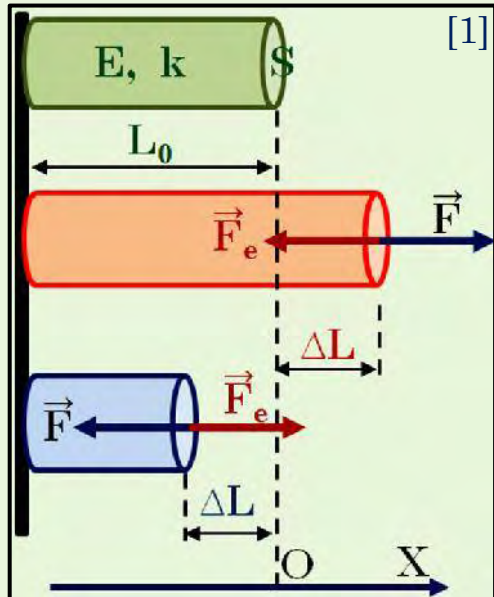
2.იმპულსი და ძალის იმპულსი. იმპულსის მუდმივობის კანონი

046

3.გალილეის ფარდობითობის პრინციპი



# 1. დრეკადობის ძალა



✓ **დეფორმაცია** გარეშე ძალის მოქმედებით სხეულის ზომის, ფორმის ცვლილება;

▪ დეფორმაციის სახეები: **გაჭიმვა-შეკუმშვა** [1]; **ღუნვა** [2]; **გრეხა** [3]; **ძვრა** (ფენების ურთიერთწანაცვლება) [4];

▪ დეფორმაციისას სხეულის **შიგნით ჩნდება** გარე  $\vec{F}$  ძალის **საპირისპიროდ** მიმართული  $\vec{F}_e$  **დრეკადობის ძალა**, რომელიც ატომებს შორის არსებული {ელექტრომაგნიტური ბუნების} ურთიერთქმედების მაკროსკოპული გამოვლენაა;

▪  $F_e$  **დრეკადობის ძალა** ცდილობს, სხეულს პირვანდელი მდგომარეობა დაუბრუნოს (შეუნარჩუნოს);

▪ თუ ზემოქმედების შეწყვეტის შემდეგ:

• სხეული **აღიდგენს** ზომას და ფორმას - დეფორმაცია **დრეკადია**;

• **ინარჩუნებს** შეცვლილ ფორმას - დეფორმაცია **პლასტიკურია**;

▪ მცირე დეფორმაციისას ( $\Delta L \ll L_0$ ) დრეკადობის ძალა ემორჩილება **ჰუკის კანონს**: დრეკადი სხეულის გაჭიმვა-შეკუმშვის დეფორმაციისას აღძრული დრეკადობის ძალის სიდიდე სხეულის სიგრძის ცვლილების პირდაპირპროპორციულია:

$$F_e = -k\Delta L \quad (1.1)$$

“-” ხაზს უსვამს, რომ დრეკადობის ძალა ყოველთვის სხეულის ნაწილაკთა **წანაცვლების საწინააღმდეგოდაა** მიმართული;

▪ (1.1)  $\rightarrow$  სიხისტე  $k = F_e / \Delta L$  (1.2) და  $[k] = [F] / [x] = 1\text{ნ/მ}$

• სიხისტე რიცხობრივად ტოლია დრეკადობის ძალისა, რომელიც აღიძვრება სხეულის სიგრძის ერთი ერთეულით შეცვლისას;

▪სიხისტე დამოკიდებულია სხეულის გეომეტრიულ ზომებზე ( $L_0$  საწყისი სიგრძე,  $S$  განივკვეთის ფართობი) და მისი ნივთიერების დრეკადი თვისებების მახასიათებელ - **E იუნგის მოდულზე**:

$$k = ES/L_0 \quad (1.3)$$

▪(1.2) =>(1.3)  $\Rightarrow F_e/\Delta L = ES/L_0 \Rightarrow F_e/S = E\Delta L/L_0 \quad (1.4)$

აქ:  $F_e/S \equiv \sigma \quad (1.5)$  - მექანიკური ძაბვაა {რიცხოვრივად - ფართობის ერთეულზე მოქმედი ძალა},  $\Delta L/L_0 \equiv \varepsilon \quad (1.6)$  - ფარდობითი დეფორმაცია {სხეულის ზომის ცვლილების ფარდობა საწყის ზომასთან};

▪{(1.5),(1.6)}=>(1.4)  $\Rightarrow \sigma = E_0\varepsilon \quad (1.7)$  ასევე ასახავს ჰუკის კანონს.  $E_0$  - დრეკადობის მოდული {სხვადასხვა სახის დეფორმაციას კონკრეტული მოდული შეესაბამება};

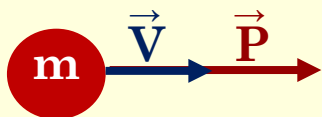
▪გაჭიმვა-შეკუმშვის დეფორმაციას აღწერს  $E$  - იუნგის მოდული  $\sigma = E\varepsilon \quad (1.8)$  იუნგის მოდული რიცხოვრივად იმ ძაბვის ტოლია, რომელიც აღიძვრება სხეულში მისი სიგრძის გაორმაგებისას. {(1.5),(1.8)}  $\Rightarrow [E]=[σ]=15/მ^2$ ;

▪ყველა სხეული დეფორმაციის გარკვეული მნიშვნელობისას (სიმტკიცის ზღვარი) კარგავს თავის დრეკად თვისებებს და პლასტიკური ხდება;



T.Young  
1773–1829

## 2. იმპულსი და ძალის იმპულსი. იმპულსის მუდმივობის კანონი



✓ სხეულის მოძრაობის მახასიათებელი სიდიდეა მისი **იმპულსი** – სხეულის მასისა და სიჩქარის ნამრავლი  $\vec{P} = m\vec{V}$  (2.1),  $[P] = 1 \text{ კგმ/წმ}$ ;  
 ▪ **იმპულსის** მიმართულებას სიჩქარის ვექტორის მიმართულება განსაზღვრავს;

ნიუტონის II კანონიდან:

$$\vec{F} = m\vec{a} = m d\vec{V}/dt = d(m\vec{V})/dt = d\vec{P}/dt \quad (2.2)$$

▪ სხეულზე მოქმედი ძალა იმპულსის ცვლილების სისწრაფის ტოლია

▪  $\{(2.2) \vec{F} = d\vec{P}/dt\} \Rightarrow$  იზოლირებული სხეულისას:

$$F=0 \text{ ე.ი. } \vec{P}=\text{const}; \vec{V}=\text{const}$$

იზოლირებული სხეულის **იმპულსი მუდმივია**;

$$(2.2) \Rightarrow d\vec{P} = \vec{F} dt \quad (2.3)$$

▪ ძალის ნამრავლს მისი მოქმედების დროზე **ძალის იმპულსი** ეწოდება;  
 ▪ სხეულის იმპულსის **ცვლილება** მცირე დროში, ამავე დროში მასზე მოქმედი **ძალის იმპულსის** ტოლია;  
 ▪  $t$  დროში იმპულსის ცვლილება

$$\Delta\vec{P} = \int_0^t \vec{F} dt \quad (2.4)$$

• თუ  $F=\text{const}$  (1.4)  $\Rightarrow \Delta\vec{P} = \vec{F} t \quad (2.5)$

▪ სხეულთა სისტემაში სხეულებზე შეიძლება მოქმედებდეს **შიდა** (ურთიერთქმედების) და **გარე** ძალები;

▪ ორი სხეულისას: **შიდა**  $F_{12}, F_{21}$ ; **გარე**  $F_1, F_2$ ; მაშინ (2.2)  $\Rightarrow$

$$\text{I სხ. } \vec{F}_{12} + \vec{F}_1 = d\vec{P}_1/dt = d(m_1\vec{V}_1)/dt \quad (2.6)$$


$$\text{II სხ. } \vec{F}_{21} + \vec{F}_2 = d\vec{P}_2/dt = d(m_2\vec{V}_2)/dt \quad (2.7)$$

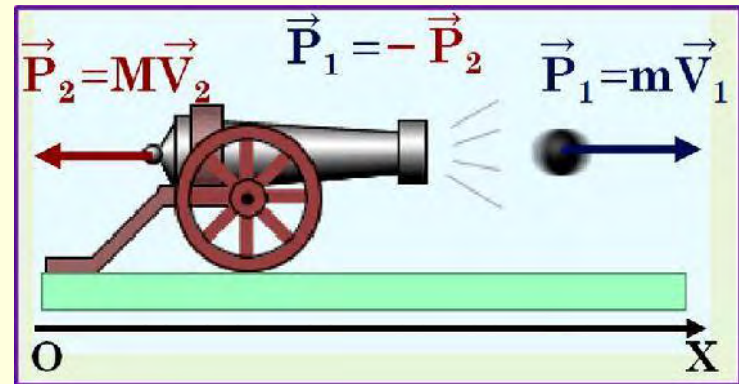
▪ შევკრიბოთ (2.6), (2.7) და გავითვალისწინოთ ნიუტონის III კანონი  $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \Rightarrow$

$$d(\vec{P}_1 + \vec{P}_2) / dt = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F} \quad (2.8) \Rightarrow$$

თუ  $\vec{F} = 0 \Rightarrow d(\vec{P}_1 + \vec{P}_2) / dt = 0 \quad (2.9) \Rightarrow$

$$\vec{P}_1 + \vec{P}_2 = \text{const} \quad (2.10) \Rightarrow \vec{P}_1 = -\vec{P}_2 \quad (2.11)$$

• (2.11) უდევს საფუძვლად **რეაქტიულ** მოძრაობას; 



✓ ჩაკეტილ სისტემაში შემავალ სხეულთა იმპულსების ვექტორული ჯამი მუდმივია ამ სხეულთა ნებისმიერი ურთიერთქმედებისას;

✓ ჩაკეტილი სისტემა ეწოდება იმ სხეულთა ჯგუფს, რომლებიც მხოლოდ ერთმანეთთან ურთიერთქმედებენ;

✓ მრავალწილაკიანი სისტემის შემთხვევაში

$$\text{სისტემის იმპულსი } \vec{P} = \sum_{i=1}^n \vec{P}_i = \sum_{i=1}^n m_i \vec{V}_i \quad (2.12)$$

შეიძლება განისაზღვროს **წარმოსახვითი C წერტილის** - მასათა ცენტრის (ინერციის ცენტრის) მიმართ, რომლის რადიუს-ვექტორი ტოლია:

$$\vec{R} = \left\{ \sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i \right\} / M \quad (2.13)$$

**M**- სისტემის სრული (ჯამური) მასაა; მასათა ცენტრის მოძრაობის სიჩქარე  $\vec{V} = d\vec{R}/dt \quad (2.14)$ ;

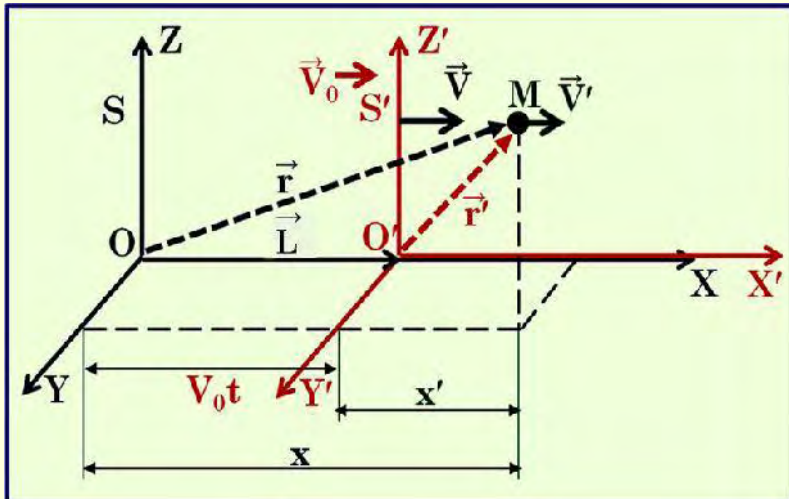
▪ მასათა ცენტრი მოძრაობს როგორც ნივთიერი წერტილი, რომლის მასა სისტემის სრული მასის ტოლია, მასზე მოქმედი ძალა კი სისტემაზე მოქმედი ყველა გარე ძალების ტოლქმედია {მასათა ცენტრის მოძრაობის თეორემა}

$$\vec{P} = M\vec{V} \quad (2.15)$$

$$\vec{F} = M d\vec{V}/dt \quad (2.16)$$



### 3. გალილეის ფარდობითობის პრინციპი



✓ ინერტულობის თვისების გამო სხეული **ინარჩუნებს** უცვლელად მოძრაობის სიჩქარეს. ე.ი., ყოველგვარი გარეშე ზემოქმედებისგან **იზოლირებული** სხეული მოძრაობს **ინერციით**. ეს არის **გალილეის ინერციის კანონის** არსი;

▪ ნიუტონმა ინერციის კანონის შესრულებას დაუკავშირა ათვლის სისტემის **ინერციულ სისტემად** აღქმა;

▪ **გალილეის ფარდობითობის პრინციპმა** დააკანონა ინერციული ათვლის სისტემების **იდენტურობა**;

▪ უძრავი  $S(OXYZ)$  ინერციული სისტემის მიმართ  $\vec{V}_0$  სიჩქარით მოძრაობს  $S'(O'X'Y'Z')$  სისტემა, თანაც საწყის მომენტში  $O' \equiv O$  (წერტილები უთავსდებიან ერთმანეთს);

▪ დროის  $t$  მომენტისთვის:

•  $S'$  სისტემის გადაადგილებაა

$$\vec{L} = \vec{OO'} \quad (3.1)$$

• ორივე სისტემის მიმართ მოძრავი  $M$  წერტილის მდებარეობაა

$$\vec{r} = \vec{r'} + \vec{L} \quad (3.2)$$

$$\vec{L} = \vec{V}_0 t \quad (3.3) \Rightarrow (3.2) \Rightarrow \vec{r} = \vec{r'} + \vec{V}_0 t \quad (3.4)$$

$$d\vec{r}/dt = d\vec{r'}/dt + \vec{V}_0 \quad (3.5)$$

აქ:

$$d\vec{r}/dt = \vec{V} \quad (3.6) \quad M \text{ წერტილის სიჩქარეა } S \text{ სისტემაში;}$$

$$d\vec{r'}/dt = \vec{V'} \quad (3.7) \quad M \text{ წერტილის სიჩქარეა } S' \text{ სისტემაში;}$$

$$\{(3.6), (3.7)\} \Rightarrow (3.5) \Rightarrow \vec{V} = \vec{V'} + \vec{V}_0 \quad (3.8)$$

✓ (3.8) სიჩქარეთა შეკრების კლასიკური წესია - ინერციული სისტემის მიმართ აჩქარების გარეშე მოძრავი ნებისმიერი სისტემა ასევე ინერციულია;

▪(3.8)  $\Rightarrow$  თუ  $\vec{V}_0 = \text{const}$   $d\vec{V}/dt = d\vec{V}'/dt \Rightarrow$

$$\vec{a} = \vec{a}' \quad (3.9) \Rightarrow$$

$$\vec{F} = \vec{F}' \quad (3.10) \Rightarrow F/a = F'/a' = m$$

▪ამრიგად: აჩქარება და მასა ერთნაირია (აბსოლუტურია) ყველა ინერციულ სისტემაში;

### გალილეის ფარდობითობის პრინციპი

- მექანიკის კანონები არ იცვლიან სახეს ერთი ინერციული სისტემიდან მეორეში გადასვლისას;  
ანუ
- მექანიკური მოვლენები ყველა ინერციულ სისტემაში ერთნაირად მიმდინარეობს;  
ანუ
- მექანიკური მოვლენების მიმდინარეობის თვალსაზრისით, ათვლის ინერციული სისტემები იგივურად ტოლფასნი არიან;

▪{ნახაზი და (3.4)}  $\Rightarrow$  ორ სისტემაში  $M$  წერტილის კოორდინატებსა და დროს შორის კავშირს ამყარებს გალილეის გარდაქმნის ფორმულები

$$\begin{aligned}x &= x' + V_0 t'; \\ y &= y'; \\ z &= z'; \\ t &= t';\end{aligned}$$

•მექანიკის კანონები ინვარიანტულნი {უცვლელნი} არიან გალილეის გარდაქმნის ფორმულების მიმართ {გალილეის ფარდობითობის პრინციპი}

✓ კლასიკური {არარელატივისტური ( $V \ll c$ )} ფიზიკის თანახმად, დრო ( $t \equiv t'$ ) და სივრცე ( $L \equiv L'$ ) აბსოლუტურია ყველა ნებისმიერად მოძრავ ათვლის სისტემაში;

▪ამ პოსტულატების საფუძველზე ხდება შესაძლებელი ნივთიერი წერტილის მოძრაობის განტოლების ჩაწერა ნებისმიერი არაინერციული {რომელშიც არ სრულდება ნიუტონის  $I$  კანონი} ათვლის სისტემისთვის;



“მხოლოდ ცოდნას აქვს საზღვრები, სიბრყვე – უსაზღვროა.”  
Salvador Dali



1904 - 1989

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

## სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 7

თემა:

სემესტრი I

### მექანიკა . დინამიკა

ზვ.

049

1.ათვლის არაინერციული სისტემები (წრფივი მოძრაობა)

0451

2.ათვლის არაინერციული სისტემები (ბრუნვითი მოძრაობა)

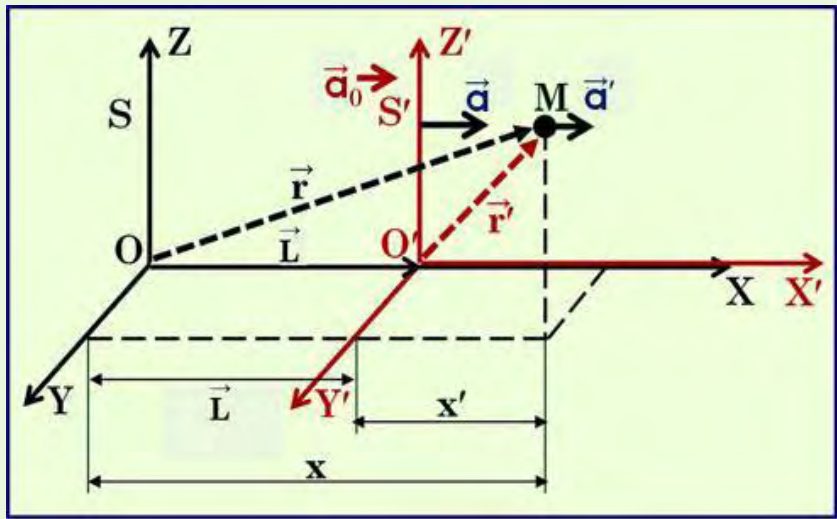
0453

3.ცენტრისკენული და ცენტრიდანული ძალები

055

4.დედამიწა, როგორც არაინერციული სისტემა

# 1. ათვლის არაინერციული სისტემები (წრფივი მოძრაობა)



▪ უძრავი  $S(OXYZ)$  ინერციული სისტემის მიმართ  $\vec{a}_0$  აჩქარებით მოძრაობს  $S'(O'X'Y'Z')$  სისტემა, თანაც საწყის მომენტში  $O' \equiv O$ ;

▪ დროის  $t$  მომენტისთვის:

•  $S'$  სისტემის გადაადგილება  

$$\vec{L} = \vec{OO'} \quad (1.1)$$

• ორივე სისტემის მიმართ მოძრავი  $M$  წერტილის მდებარეობაა

$$\vec{r} = \vec{r'} + \vec{L} \quad (1.2)$$

▪  $S$  ინერციულ სისტემაში ნიუტონის II კანონი  $m$  მასის  $M$  ნივთიერი წერტილის  $\vec{a}$  აჩქარებას უკავშირებს  $\vec{F}$  ძალის მოქმედებას

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (1.3)$$

$\vec{F}$  ძალა სხეულთა რეალურ ურთიერთქმედებას ასახავს;

▪  $S'$  არაინერციულ სისტემაში  $\vec{F}$  გარე ძალის უცვლელობისას  $M$ -ის აჩქარება დგინდება (1.2)-ს საფუძველზე

$$d^2\vec{r}/dt^2 = d^2\vec{r'}/dt^2 + d^2\vec{L}/dt^2 \quad (1.4)$$

ანუ 
$$\vec{a} = \vec{a'} + \vec{a}_0 \quad (1.5)$$

(1.5) => (1.3) 
$$\vec{F} = m\vec{a'} + m\vec{a}_0 \quad (1.6)$$

(1.6)  $\rightarrow$  
$$m\vec{a'} = \vec{F} - m\vec{a}_0 \quad (1.7) \rightarrow$$

• კლასიკური ფიზიკის ხედვით  $-m\vec{a}_0$  გაურკვეველი ძალაა, რადგან არ ასახავს სხეულთა ურთიერთქმედებას. მისი არსებობის მიზეზი ათვლის სისტემის არაინერციულობაა. ანუ, შეიძლება  $\vec{F}_{in}$ -ს ინერციის ძალა ეწოდოს:

$$-m\vec{a}_0 \equiv \vec{F}_{in} \quad (1.8) \Rightarrow (1.7) \rightarrow m\vec{a'} = \vec{F} + \vec{F}_{in} \quad (1.9)$$



{(1.9)  $m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_{in}$ }-ში

1.  $F$  ძალა სხეულთა ურთიერთქმედების შედეგია და ინარჩუნებს ინვარიანტობას ნებისმიერი ათვლის სისტემის მიმართ;

2. გადატანითი ინერციის ძალა  $F_{in} = m\mathbf{a}_0$  არაა ინვარიანტული, ანუ განსხვავებულია სხვადასხვა აჩქარებით მოძრავ ათვლის სისტემებში;

✓სხვა “თავსატეხი”  $\vec{F}_{in}$ -ზე:

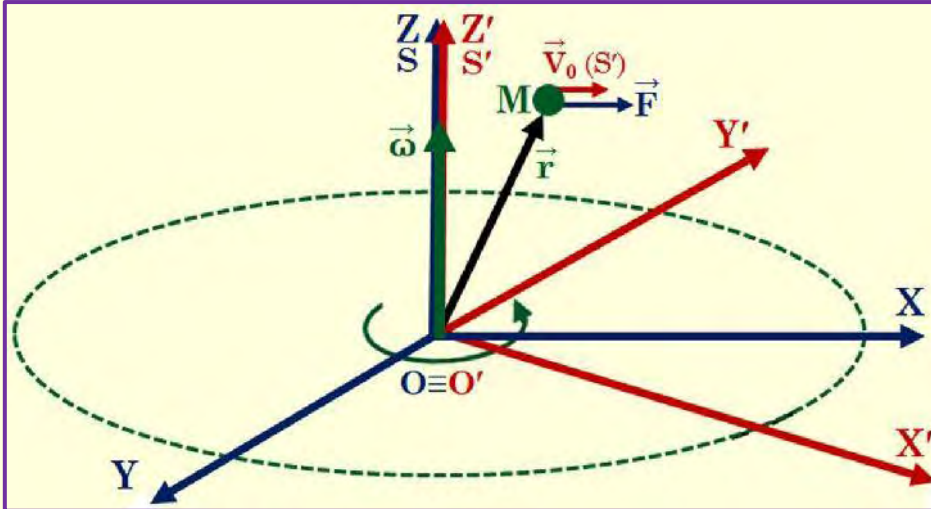
▪ამ ძალაზე არ ვრცელდება “ქმედება იწვევს უკუქმედებას” (ნიუტონის III) კანონი;

▪ის სხეულებისთვის ყოველთვის გარე ძალას წარმოადგენს (ემსგავსება რომელიმე გარეშე ველის მხრიდან მოქმედ ძალას);

▪ნიუტონის კანონების მიხედვით  $F_{in}$  ძალა “ფიქტიური” ძალაა. ის “ქრება” “ნორმალურ” - ინერციულ ათვლის სისტემებში;

▪თუმცა ის ისევე რეალურია, როგორც ელექტრომაგნიტური ველის მხრიდან მოქმედი ძალები, რომლებიც ასევე არ არიან ინვარიანტულნი!

## 2.ათვლის არაინერციული სისტემები (ბრუნვითი მოძრაობა)



✓  $S(OXYZ)$  უძრავ **ინერციულ** სისტემაში  $m$  მასის  $M$  ნივთიერი წერტილი იძენს  $\mathbf{a}$  აჩქარებას  $\mathbf{F}$  ძალის გავლენით  $m\mathbf{a}=\mathbf{F}$  (2.1);  
 ▪  $Z$  ღერძის ირგვლივ  $\omega$  კუთხური სიჩქარით მბრუნავ **არაინერციულ**  $S'(O'X'Y'Z')$  სისტემაში  $M$  წერტილი გადაადგილდება  $\vec{V}_0$  სიჩქარით და მისი სრული სიჩქარე ინერციულ  $S$  სისტემაში იქნება წირითი და ბრუნვითი სიჩქარეთა ჯამი:  $\vec{V} = \vec{V}_0 + [\vec{\omega} \vec{r}]$  (2.2)  
 ▪  $\vec{r}(S) \equiv \vec{r}(S')$ , მაგრამ  $r$ -ს **ცვლილება** სისტემებში განსხვავებულია

$$d\vec{r}/dt = d'\vec{r}/dt + [\vec{\omega} \vec{r}] \quad (2.3)$$

$$(2.2) \Rightarrow d\vec{V}/dt = d\vec{V}_0/dt + [\vec{\omega} d\vec{r}/dt] \quad (2.4)$$

(2.3)-ს ანალოგიურად, განსხვავებულია  $V_0$ -ს ცვლილებაც  $d\vec{V}_0/dt = d'\vec{V}_0/dt + [\vec{\omega} \vec{V}_0]$  (2.5)

$$\{(2.4), (2.3)\} \Rightarrow (2.5) \quad d\vec{V}/dt = d'\vec{V}_0/dt + [\vec{\omega} \vec{V}_0] + [\vec{\omega} d'\vec{r}/dt] + [\vec{\omega} [\vec{\omega} \vec{r}]] \quad (2.6)$$

$$\begin{array}{ccc} \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \mathbf{a} & \mathbf{a}' & \vec{V}_0 \\ \hline \mathbf{a} = \mathbf{a}' + 2[\vec{\omega} \vec{V}_0] + [\vec{\omega} [\vec{\omega} \vec{r}]] & (2.7) & \end{array}$$

$$(2.7) \Rightarrow \mathbf{a}' = \mathbf{a} - 2[\vec{\omega} \vec{V}_0] - [\vec{\omega} [\vec{\omega} \vec{r}]] \quad (2.8)$$

$\mathbf{a}_{iK}$  ინერც.კორიოლისისაჩქ.

$\mathbf{a}_{iC}$  ინერც.ცენტრიდანულიაჩქ.

$$\vec{a}_{iK} = -2 [\vec{\omega} \vec{V}_0] \quad (2.9)$$

•ინერციის კორიოლისის აჩქარებას განსაზღვრავს სხეულის სიჩქარე, მდებარეობა გავლენას არ ახდენს;

$$\vec{a}_{iC} = -[\vec{\omega} [\vec{\omega} \vec{r}]] \quad (2.10)$$

•ინერციის ცენტრიდანულ აჩქარებას განსაზღვრავს სხეულის მდებარეობა, სიჩქარე გავლენას არ ახდენს;

$$(2.7) \Rightarrow (2.1) \quad \vec{F} = m\{\vec{a}' + 2[\vec{\omega} \vec{V}_0] + [\vec{\omega} [\vec{\omega} \vec{r}]]\} \quad (2.11)$$

$$(2.8) \Rightarrow m\vec{a}' = m\{\vec{a} - 2[\vec{\omega} \vec{V}_0] - [\vec{\omega} [\vec{\omega} \vec{r}]]\} \quad (2.12)$$

$$\{(2.1), (2.9), (2.10)\} \Rightarrow (2.12) \quad m\vec{a}' = \vec{F} + m\vec{a}_{iK} + m\vec{a}_{iC} \Rightarrow$$

$$m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_{iK} + \vec{F}_{iC} \quad (2.13)$$

$F_{iC}$  - ინერციის ცენტრიდანული ძალა

$$F_{iC} = m\omega^2 R \quad (2.14)$$

$F_{iK}$  - ინერციის კორიოლისის ძალა

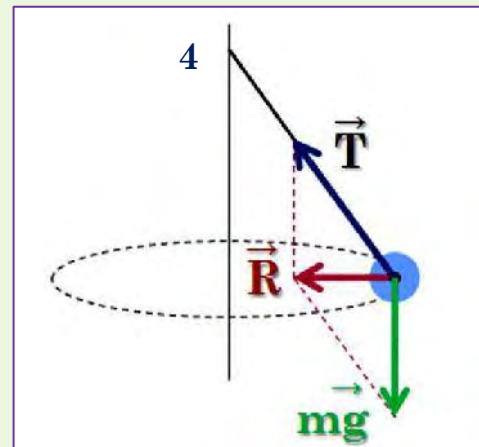
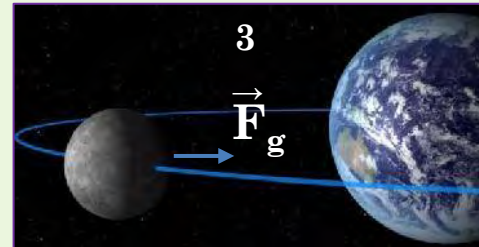
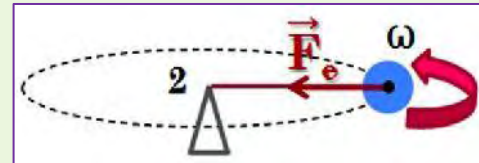
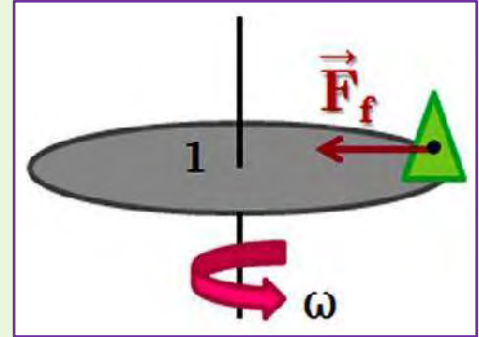
$$F_{iK} = 2mV_0\omega \sin\varphi \quad (2.15)$$

▪ინერციული ათვის სისტემა - არაინერციულის კერძო შემთხვევაა {როდესაც  $\vec{a}=0$  და  $\vec{\omega}=0$ }

### 3. ცენტრისკენული და ცენტრიდანული ძალები

✓ **მრუდ წირზე** სხეულის მოძრაობისას, სიჩქარის ვექტორის მიმართულეების ცვლილების გამო, ყოველთვის არსებობს წირის სიმრუდის ცენტრისკენ მიმართული აჩქარება;

▪ ცენტრისკენულ აჩქარებას გარკვეული **რეალური** {*სიმძიმის, დრეკადობის, ხახუნის, ელექტრული, ...*} ძალა ან ძალთა ტოლქმედი უზრუნველყოფს, გამაერთიანებელი სახელწოდებით – **ცენტრისკენული ძალა**;



▪ ცენტრისკენული ძალის მაგალითები:

• ხახუნის ძალა  $\vec{F}_c \equiv \vec{F}_f$  [1]

• დრეკადობის ძალა  $\vec{F}_c \equiv \vec{F}_e$  [2]

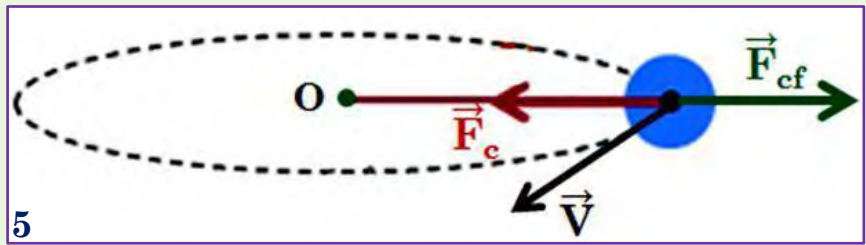
• სიმძიმის ძალა  $\vec{F}_c \equiv \vec{F}_g$  [3]

• სიმძიმისა და ძაფის დაჭიმულობის ძალთა ტოლქმედი  $\vec{F}_c \equiv \vec{R}$  [4]

▪ **ცენტრისკენული ძალა** სხეულის მოძრაობის შემზღუდავი, ბრუნვის ღერძის ირგვლივ შემობრუნების უზრუნველმყოფი **გარე ძალების** მოქმედებაა. დამოუკიდებლად ცენტრისკენული ძალა არ არსებობს, მის უკან ყოველთვის რეალური ძალაა;



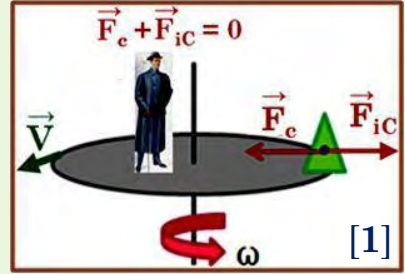
▪[1]-[4]-ში, სხეული განიხილებოდა მბრუნავ, ანუ აჩქარებულად მოძრავ და, ე.ი., **არაინერციულ სისტემაში**. დისკოზე სხეულის ამოძრავებას, სამაგრის დეფორმაციას, ძაფის გადახრას განაპირობებს ამ არაინერციული სისტემის მხრიდან მოქმედი **ინერციის ძალა** - ინერციის **ცენტრიდანული ძალა**;



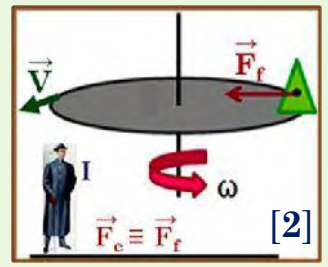
▪**ცენტრიდანული  $\vec{F}_{cf}$**  და ცენტრისკენული  $\vec{F}_c$  ძალები რიცხობრივად ტოლი, ერთი წრფის გასწვრივ მოქმედი, ურთიერთსაპირისპირო მიმართულებების [5] ძალებია

$$\vec{F}_c = -\vec{F}_{cf} \quad (3.1)$$

▪ცენტრისკენული  $\mathbf{a}_n$  აჩქარების გამოსახულებების გამოყენებით ცენტრისკენული და ცენტრიდანული ძალების სიდიდე:

$$\mathbf{F}_c = \mathbf{F}_{cf} = \mathbf{m}\mathbf{a}_c = mV^2/R = m\omega^2 R = 4\pi^2 m v^2 R = 4\pi^2 m R / T^2 \quad (3.2)$$


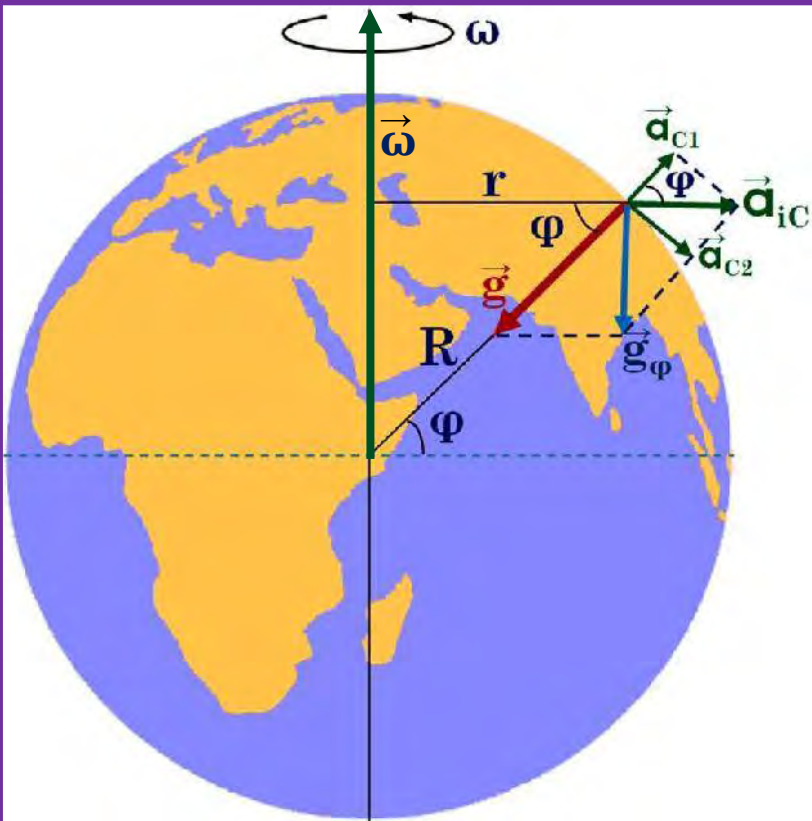
- $F_{cf}$  და  $F_c$  ძალები სხვადასხვა სხეულებზე მოდებული ძალებია და, ამდენად, ერთმანეთს **ვერ აბათილებენ**;
- $F_{cf}$  ცენტრიდანული ძალა მოქმედებს მოძრაობის შემზღუდავ კავშირზე (დისკოზე, ღეროზე, დედამიწაზე, ძაფზე);
- $F_c$  ცენტრისკენული ძალა მოქმედებს თავად სხეულზე;



✓ **ცენტრიდანული აჩქარება და ძალა ინერციული ცნებებია, არაინერციული (მბრუნავი) სისტემების [1] კუთვნილებაა (მხოლოდ !!!)**

▪ინერციული სისტემების [2] თვალთახედვით **ცენტრიდანული ძალა ქრება**, არსებობს მხოლოდ ცენტრისკენული ძალა;

## 4. დედამიწა, როგორც არაინერციული სისტემა



✓ ღერძის ირგვლივ  $\omega$  კუთხური სიჩქარით ბრუნვა აღძრავს ცენტრიდანულ  $\mathbf{a}_{iC}$  აჩქარებას და ცვლის თავისუფალი ვარდნის  $\mathbf{g} = \mathbf{GM}/R^2$  (4.1) აჩქარებას

$$\mathbf{g}_\varphi = \mathbf{g} + \mathbf{a}_{iC} \quad (4.2)$$

▪ დავაკავშიროთ თავისუფალი ვარდნის აჩქარების სიდიდე დედამიწაზე ადგილმდებარეობასთან ( $\varphi$ ) და ბრუნვასთან ( $\omega$ ) -

ნახაზიდან:  $\mathbf{g}_\varphi = \mathbf{g} - \mathbf{a}_{C1}$  (4.3)

$$\mathbf{a}_{C1} = \mathbf{a}_{iC} \cos\varphi = \omega^2 r \cos\varphi \quad (4.4)$$

(4.4) => (4.3)  $\mathbf{g}_\varphi = \mathbf{g} - \omega^2 r \cos\varphi$  (4.5)

ნახაზიდან:  $r = R \cos\varphi$  (4.6)

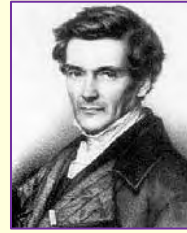
(4.6) => (4.5)  $\mathbf{g}_\varphi = \mathbf{g} - \omega^2 R \cos^2\varphi$  (4.7)

• ასევე (4.7) =>

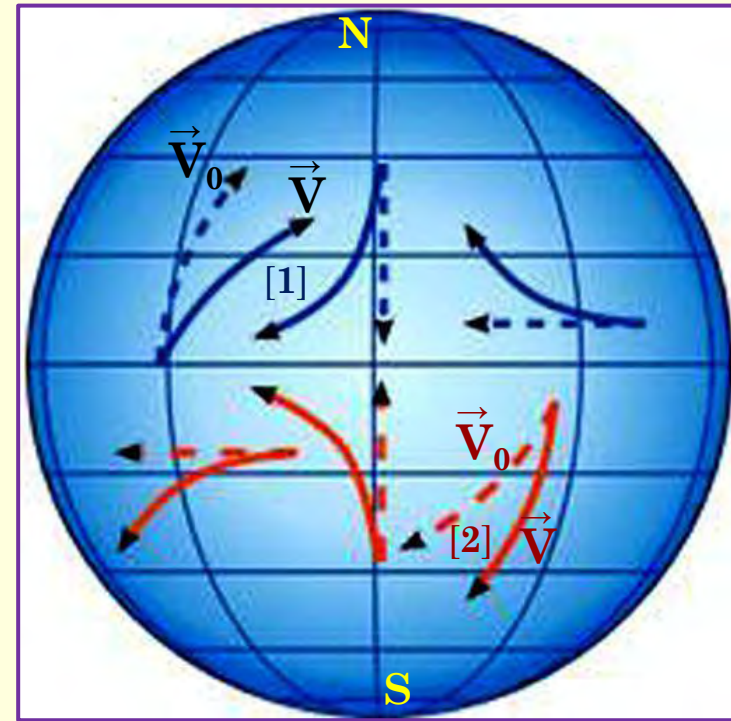
$$\{\mathbf{g}_\varphi / \mathbf{g}\} = 1 - (\omega^2 R / \mathbf{g}) \cos^2\varphi = 1 - \delta \cos^2\varphi \quad (4.8)$$

სადაც  $\delta \equiv \omega^2 R / \mathbf{g} = 0.0034$  (4.9)

✓ დედამიწის ბრუნვის ( $\omega$ ) თანმხლები სხეულის ( $V_0$ ) გადატანითი მოძრაობა აღძრავს ინერციის **კორიოლისის** აჩქარებას (2.9), ანუ ინერციის **კორიოლისის** ძალას  $F_{iK} = 2mV_0 \omega \sin\varphi$ , რომელიც ცვლის სხეულის მოძრაობის ტრაექტორიას;



G. Coriolis  
1792 - 1843



✓ მერიდიანის გასწვრივ მოძრაობისას:

▪ ჩრდილოეთის ნახევარსფერო (N) -  $F_{iK}$  მიმართულია **მოძრაობისადმი მარჯვნივ** [1];

▪ სამხრეთის ნახევარსფერო (S) -  $F_{iK}$  მიმართულია **მოძრაობისადმი მარცხნივ** [2];

✓ ეკვატორის გასწვრივ მოძრაობისას:

▪ აღმოსავლეთიდან დასავლეთისკენ -  $F_{iK}$  მიმართულია ისე, რომ ამცირებს მოძრავი სხეულის წონას;

▪ დასავლეთიდან აღმოსავლეთისკენ -  $F_{iK}$  მიმართულია ისე, რომ ზრდის ზეწოლას დედამიწაზე;



“სრული სიმართლის თქმა შეუძლებელია, მაგრამ ყოველივე შენს მიერ თქმული უნდა იყოს სიმართლე.” Otto von Bismarck



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1815 - 1898

## სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 8

თემა:

სემესტრი I

### მექანიკა . დინამიკა. მუშაობა და ენერგია

ზვ.

058

1.მექანიკური მუშაობა და სიმძლავრე

060

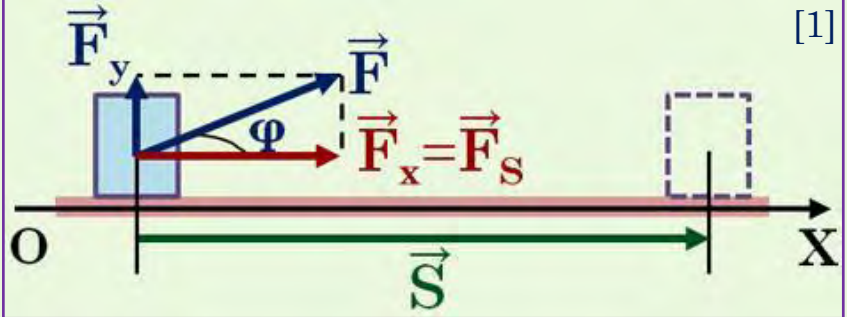
2.სიმძიმის ძალის და დრეკადობის ძალის მუშაობა

062

3.კონსერვატიული და არაკონსერვატიული ძალები



# 1. მექანიკური მუშაობა და სიმბლავრე



•(1.1)  $\Rightarrow [A]=[F][S]=1\text{ნმ}=1\text{ჯ}$ , ეს **მუშაობაა**, რომელსაც ასრულებს **1 ნ** ძალა მოდების წერტილის **1 მ**-ზე გადაადგილებისას {ძალის მოქმედების წრფის გასწვრივ};

J.Joule  
1818-1889



▪**მრუდ** წირზე მოძრაობისას ან (და) ძალის ცვლილებისას გადაადგილება უნდა დაიყოს მცირე  $\Delta S_i$  უბნებად, რომელთა ფარგლებში  $F_{Si} = \text{const}$  და  $\phi_i = \text{const}$ , მაშინ მუშაობა გამოითვლება განსაზღვრული ინტეგრალით

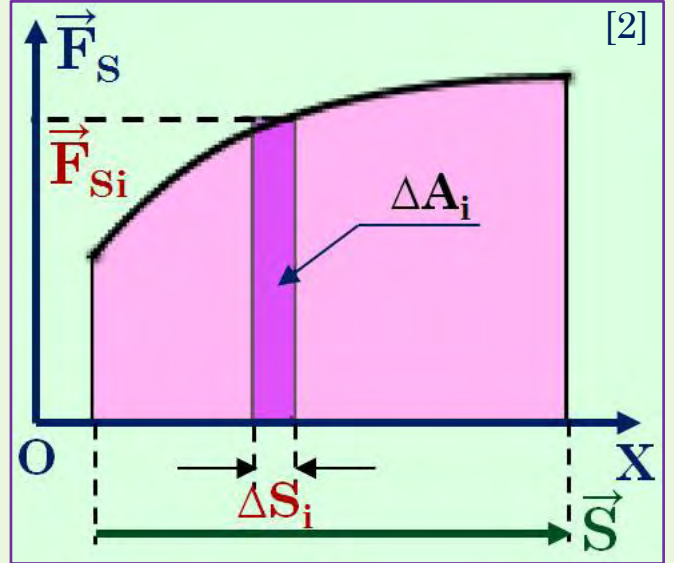
$$A = \int_0^S \mathbf{F}_s dS \quad (1.2)$$

•ასევე, ცვლადი ძალის კოორდინატზე  $F_s(x)$  დამოკიდებულების ქვეშ მოთავსებული ნაკვთის ფართობით [2];

✓**მექანიკური მუშაობა** ახასიათებს სხეულის გადაადგილებაზე გაწეულ ძალისხმევას;  
▪**ძალის** (ძალთა ტოლქმედის) მიერ შესრულებული **მუშაობა A** ტოლია ძალისა და გადაადგილების ვექტორთა **სკალარული ნამრავლის**

$$A = (\vec{F} \cdot \vec{S}) = F_s \cdot S = F \cdot S \cos \phi \quad (1.1)$$

- (1.1)  $\Rightarrow$  მუშაობას ასრულებს გადაადგილების მიმართულებაზე ძალის ვექტორის  $F_s = F \cos \phi$  გეგმილი [1];
- (1.1)  $\Rightarrow$  1.  $0 \leq \phi \leq 90^\circ$  მუშაობა **დადებითია** ( $A > 0$ );  
2.  $\phi = 90^\circ$  მუშაობა **არ სრულდება** ( $A = 0$ );  
3.  $90 < \phi \leq 180^\circ$   $A < 0$  - **უარყოფითია**;

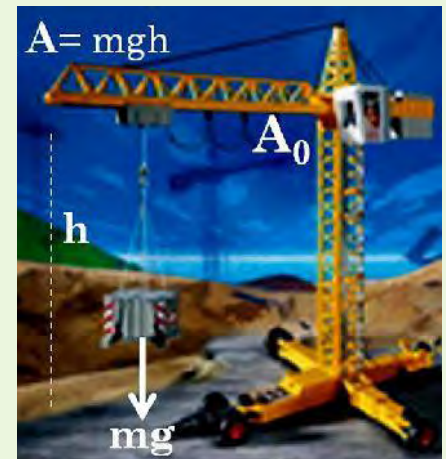


✓ მუშაობის შესრულების სისწრაფეს **სიმძლავრე** ასახავს;  
 ▪ **მექანიკური სიმძლავრე** ტოლია {მანქანა-მექანიზმის მიერ} შესრულებული მუშაობის ფარდობისა ამ მუშაობაზე დახარჯულ დროსთან;

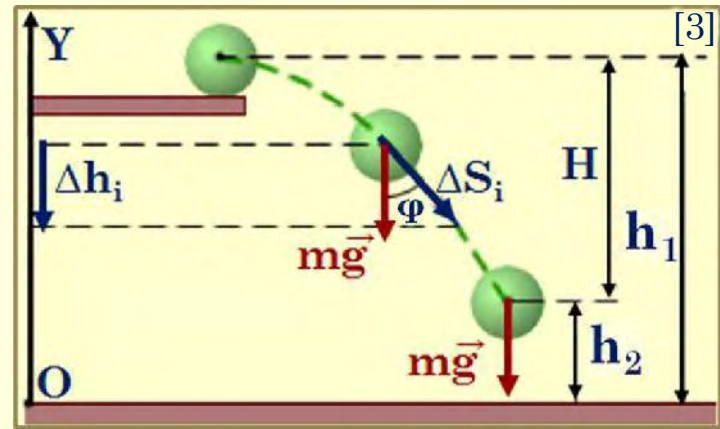
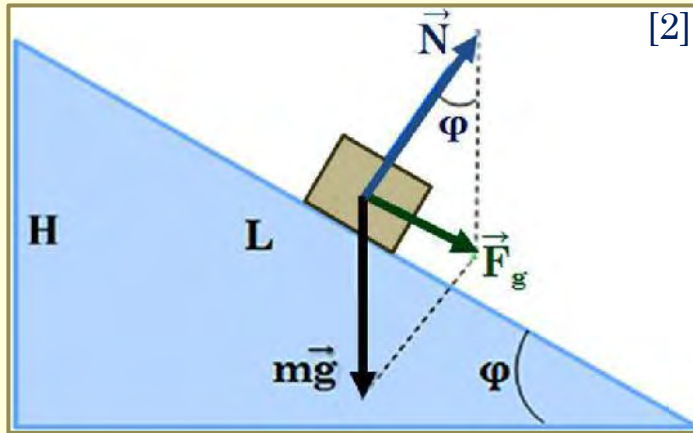
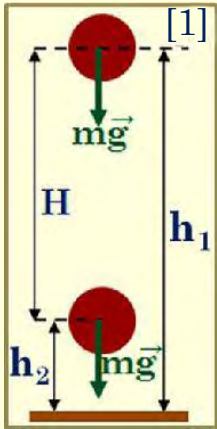
- ანსხვავებენ სიმძლავრეს (**N**):
- მუშაობის **თანაბარი** შესრულებისას  $N = A/t$  (1.3)
- **არათანაბარი** მუშაობისას - **საშუალო** სიმძლავრე  $N_a = \Delta A / \Delta t$  (1.4)
- **მყისის** სიმძლავრეს  $N = dA / dt$  (1.5);  $\{(1.1) A = F_s \cdot V\} \Rightarrow (1.5) \rightarrow$   
 $N = F_s \cdot dS / dt = F_s \cdot V = (\vec{F} \cdot \vec{V}) = F \cdot V \cos \varphi$  (1.6)  
 { $\varphi$  კუთხეა ძალისა და სიჩქარის ვექტორებს შორის};

- (1.3)  $\rightarrow [N] = [A] / [t] = 1 \text{ჯ/წმ} = 1 \text{ ვტ};$   
 ერთი ვატის ისეთი სიმძლავრეა, როდესაც 1 წამში 1ჯოული მუშაობა სრულდება;
- გამოიყენება ასევე {პრაქტიკული ერთეულები}:  
 • ცხენის ძალა - 1 ც.ძ. = 735 ვტ;  
 • კვტ·სთ - 1 კვტ·სთ =  $3.6 \cdot 10^6$  ვტ;

✓ მექანიზმის მიერ **სასარგებლოდ** შესრულებული მუშაობის (სიმძლავრის) **წილს** ასახავს  $\eta$  მარგი ქმედების კოეფიციენტი (**მქკ**);  
 ▪ **სასარგებლო A** მუშაობის (**N** სიმძლავრის) შეფარდებას **სრულ A<sub>0</sub>** მუშაობასთან (**N<sub>0</sub>** სიმძლავრესთან) მექანიზმის **მქკ** ეწოდება:  
 $\eta = A / A_0$  (1.7)                       $\eta = N / N_0$  (1.8)



## 2. სიმძიმის ძალის და დრეკადობის ძალის მუშაობა



✓სხეულზე მოქმედი  $mg$  სიმძიმის ძალა ყოველთვის ცდილობს ამ სხეულის გარკვეული სიმალიდან დედამიწის ზედაპირზე გადაყვანას და ნებისმიერი ტრაექტორიით [1,2,3] **სიმაღლის** ცვლილებისას ასრულებს გარკვეულ **მუშაობას**;



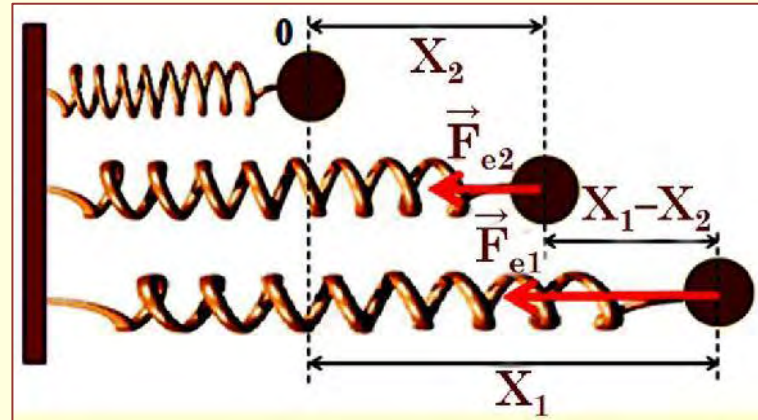
[1]. ვერტიკალური ვარდნა -  
 $A = F \Delta S = mg(h_1 - h_2) = mgH$  (2.1)  
 [2]. დახრილ სიბრტყეზე მოძრაობა -  
 $A = F_g \Delta S = F_g L = (mg \sin \phi) \cdot (H / \sin \phi) = mgH$  (2.2)

▪{(2.1),(2.2),(2.3)} ➔ სიმძიმის ძალის მუშაობა არაა დამოკიდებული ტრაექტორიის ფორმაზე, ის განისაზღვრება სხეულის საწყისი და საბოლოო მდებარეობით;  
 ▪შეკრულ ტრაექტორიაზე სიმძიმის ძალის მუშაობა  $A=0$ , რადგან, {მაგალითად, ვერტიკალურად ასროლილი სხეულის მოძრაობისას} სიდიდით ტოლ  $A_{\uparrow}, A_{\downarrow}$  მუშაობებს აქვთ საპირისპირო ნიშანი;

[3]. მრუდ წირზე მოძრაობა - დავყოთ წირი მცირე  $\Delta S_i$  უბნებათ ისე, რომ კუთხე  $\phi = \text{const}$ . მაშინ:  
 $A_i = mg \Delta S_i \cdot \cos \phi = mg \Delta h_i$   
 მთლიანად შესრულებული მუშაობა  
 $A = \sum_i A_i = mg \sum_i \Delta h_i = mgH$  (2.3)

✓ ზამბარის დეფორმაციისას ზამბარაში აღძრული  $F_e$  დრეკადობის ძალა, ცდილობს რა საწყისი მდგომარეობის აღდგენას, გადაადგილებს სხეულს და, ე.ი., ასრულებს მუშაობას;

▪ მუშაობის შესრულებისას დრეკადობის ძალა განუწყვეტილად იცვლება ზამბარის  $X$  წაგრძელების ცვლილების გამო;



▪ ამდენად, დრეკადობის ძალის სრული მუშაობა გამოითვლება მცირე უბნებზე ელემენტარული მუშაობების  $dA = F_e \cdot dx = kx dx$  (2.4) ინტეგრებით:

$$A = \int dA = -k \int_{x_1}^{x_2} x dx = -kx^2/2 \Big|_{x_1}^{x_2} = (kx_1^2/2) - (kx_2^2/2) \quad (2.5)$$

▪ დრეკადობის ძალის მუშაობა არაა დამოკიდებული ტრაექტორიის ფორმაზე, ის განისაზღვრება სხეულის საწყისი და საბოლოო მდებარეობით;

▪ შეკრულ ტრაექტორიაზე დრეკადობის ძალის მუშაობა ნულის ტოლია;



### 3. კონსერვატიული და არაკონსერვატიული ძალები

✓ მექანიკის ფარგლებში განხილული ბუნების სამი ძალიდან (სიმძიმის, დრეკადობის, ხახუნის) ორი - **სიმძიმის** და **დრეკადობის** ძალები - მექანიკურ მოვლენებთან მიმართებაში მკვეთრად გამოხატულ მსგავსებას ავლენენ;

- ამ ძალებს მხოლოდ სისტემის კონფიგურაცია - შემადგენელი **სხეულების მდებარეობა** - განსაზღვრავს;
- სივრცის ნებისმიერ ორ წერტილს შორის სხეულის გადაადგილებაზე ამ ძალების მიერ შესრულებული მუშაობა ტრაექტორიის ფორმაზე დამოკიდებული არ არის და მხოლოდ სხეულის საწყისი და საბოლოო მდებარეობებით განისაზღვრება;
- შეკრულ ტრაექტორიაზე შესრულებული **მუშაობა ნულის** ტოლია;

- ✓ ასეთი ნიშან-თვისების მატარებელ ძალებს ფიზიკა **კონსერვატიულ (პოტენციურ)** ძალებს უწოდებს;
- სიმძიმის და დრეკადობის ძალების გარდა **კონსერვატიულია** კულონური (ელექტროსტატიკური ურთიერთქმედების) ძალა;
- მხოლოდ **პოტენციურ (კონსერვატიულ)** ძალებს შეიძლება უკავშირდებოდეს სისტემაში **პოტენციური ენერჯიის** არსებობა;

- ✓ ყველა სხვა ძალა მიეკუთვნება **არაკონსერვატიული** ძალების ჯგუფს;
- მაგალითად, **არაკონსერვატიულია** ხახუნის ძალა. მის მიერ შესრულებული მუშაობა ყოველთვის **უარყოფითია**, ვინაიდან ის ყოველთვის **მომრავობის საპირისპიროდ** არის მიმართული;
- ამდენად, შეკრულ ტრაექტორიაზე ხახუნის ძალის მუშაობა ნულს არ უტოლდება, ხოლო ტრაექტორიის სიგრძის **ზრდა** ყოველთვის მხოლოდ **ზრდის ხახუნის ძალის მუშაობას**;

- ხახუნის ძალა - **დისიპატიური** ძალაა. ანუ, ისეთი ძალაა რომლის გავლენით სისტემის მექანიკური ენერგია **მცირდება (დისიპირებს)** და არამექანიკურ, უმეტესად, სითბურ ენერგიად გარდაიქმნება;
- ხახუნის ძალის მუშაობა ასოცირდება სხეულის მხოლოდ **კინეტიკური** ენერგიის შემცირებასთან;
- არაკონსერვატიულ ძალასთან მიმართებაში **პოტენციური ენერგიის** ცნება საერთოდ კარგავს ყოველგვარ აზრს;



“უბედნიერესია ის ადამიანი, ვინც საინტერესო აზრებზე ფიქრობს.” Timothy Dwight



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1752 - 1817

**სტუ**-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 9

თემა:

სემესტრი I

**მექანიკა . დინამიკა. მუშაობა და ენერგია**

ზვ.

065

1.მექანიკური (კინეტიკური და პოტენციური) ენერგია

067

2.ენერგიის მუდმივობის კანონი

068

3.ნაწილაკების დაჯახება

# 1. მექანიკური (კინეტიკური და პოტენციური) ენერგია

✓ **ენერგია** {energia (ბერძნ.) - მოქმედება, მოღვაწეობა} მოძრაობის ყველა ტიპის და ურთიერთქმედების ყველა სახის {გრავიტაციული, ელექტრომაგნიტური, ბირთვული ...} რაოდენობრივი ზომია;

✓ **მექანიკური ენერგია** - კინეტიკური და პოტენციური - {მექანიკურ} მოძრაობას და ურთიერთქმედებას ასახავს;

✓ ენერგია  $E$  განსაზღვრავს სხეულის მუშაობის {პროცესის} შესრულების უნარს, ენერგიის მარაგი კი - მუშაობის სიდიდეს; {შეუძლებელია სისტემას "მუშაობის მარაგი" გააჩნდეს};

- მუშაობა განაპირობებს ენერგიის ცვლილებას  $\Delta E = A$  (1.1)
- მუშაობა ენერგიის გარდაქმნის და გადაცემის ფორმაა;

✓  $E_k$  კინეტიკური ენერგია სხეულის მოძრაობის ზომია, რომელიც სხეულის მხოლოდ მასითა და {არჩეულ ათვლის სისტემაში} სიჩქარის მოდულით განისაზღვრება;

- სხეული  $V$  სიჩქარეს (ე.ი.,  $E_k$  ენერგიას)  $F$  ძალის მიერ სხეულის  $S$ -ით გადაადგილებისას  $A$  მუშაობის შესრულების შედეგად იძენს

$$A = F \cdot S = ma \cdot (V^2 - V_0^2) / 2a = mV^2/2 - mV_0^2/2 \quad (1.2)$$

$$\{(1.1) \Rightarrow (1.2)\} \Rightarrow \Delta E = A = mV^2/2 - mV_0^2/2 = E_k - E_{k0} \quad (1.3) \text{ ანუ, ზოგადად } E_k = mV^2/2 \quad (1.4)$$

(1.3) - თეორემა კინეტიკური ენერგიის შესახებ:

▪ სხეულზე მოქმედი ძალების მიერ შესრულებული მუშაობა ამ სხეულის კინეტიკური ენერგიის ცვლილების ტოლია;

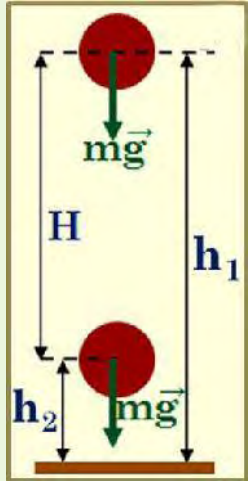
▪ (1.4)  $\Rightarrow$

- $E_k \equiv$  მუშაობას, რომელიც უნდა შეასრულოს ძალამ, რომ უძრავმა სხეულმა  $V$  სიჩქარე შეიძინოს;
- $E_k \equiv$  მუშაობას, რომელსაც გაჩერებამდე შეასრულებს  $V$  სიჩქარით მოძრავი სხეული;



✓სხეულის მდებარეობაზე, ფორმაზე  
დამოკიდებული ენერგია -  
მექანიკური პოტენციური ენერგიაა;

✓სხეულს მექანიკურ პოტენციურ ენერგიას ანიჭებს მასზე მოქმედი კონსერვატიული ძალები {მექანიკაში სიმძიმის და დრეკადობის ძალები}



▪  $m$  მასის სხეულზე მოქმედი სიმძიმის ძალა  $F_g = mg$  ანიჭებს მას {გრავიტაციულ} მექანიკურ პოტენციურ  $E_p$  ენერგიას {ათვლის ნულოვანი დონის მიმართ}, რომელიც სხეულის  $h$  სიმაღლით განისაზღვრება;

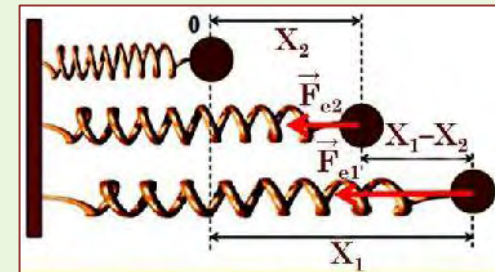
▪  $h_1$ -დან  $h_2$  სიმაღლეზე  $m$  მასის სხეულის ვარდნისას  
{(8.2.1), (1.1)}  $\Rightarrow A_g = mg \cdot (h_1 - h_2) = -(mgh_2 - mgh_1) = -\Delta E_p$  (1.5)

სიმძიმის ძალის მუშაობა პოტენციური ენერგიის ცვლილების ტოლია შებრუნებული ნიშნით;

•(1.5)  $\Rightarrow E_p = mgh$  (1.6)

▪  $k$  სიხისტის დეფორმირებულ ზამბარაში აღძრული დრეკადობის ძალა  $F_e = kx$  ანიჭებს მას {დრეკადი დეფორმაციის} მექანიკურ პოტენციურ  $E_p$  ენერგიას, რომელიც ზამბარის  $x$  წაგრძელებით განისაზღვრება;

▪{(8.2.5), (1.1)}  $\Rightarrow A_e = kx_1^2/2 - kx_2^2/2 = -(kx_2^2/2 - kx_1^2/2) = -\Delta E_p$  (1.7)  
დრეკადობის ძალის მუშაობა ზამბარის პოტენციური ენერგიის ცვლილების ტოლია შებრუნებული ნიშნით; (1.7)  $\Rightarrow E_p = kx^2/2$  (1.8)



•მცირე  $d\vec{r}$  გადაადგილებისას კონსერვატიული ძალის მუშაობის  $dA = F dr \cos \phi = F_r dr = -dE_p$  (1.9) გამოსახულებიდან შესაძლებელი ხდება მოქმედი ძალის ენერგიით გამოსახვა  $\Rightarrow$

$$F_r = -dE_p/dr \Rightarrow \vec{F} = -\text{grad} E_p \quad (1.10) \Rightarrow \{F_x = -\partial E_p / \partial x; F_y = -\partial E_p / \partial y; F_z = -\partial E_p / \partial z\} \quad (1.11)$$

## 2. ენერჯის მუდმივობის კანონი

✓ ენერჯია მრავალი პროცესის მნიშვნელოვანი მახასიათებელი და, ამავე დროს, იზოლირებულ ფიზიკურ სისტემაში დროში უცვლელი (მუდმივი) ფიზიკური სიდიდეა;

▪ ენერჯია, ჯამური მნიშვნელობის შეუცვლელად, შეიძლება გადადიოდეს ერთი ფორმიდან მეორეში;

▪ ენერჯის მუდმივობა უნივერსალური კანონზომიერებაა, ის განსხვავებული ფიზიკური ბუნების სისტემების კუთვნილებაა {მექანიკურის, თერმოდინამიკურის, ელექტრულის და ა.შ.};

✓ ჩაკეტილი სისტემის სხეულთა სრული მექანიკური ენერჯია უცვლელია ( $E_m = E_k + E_p = \text{const}$ ), თუ სხეულები ურთიერთქმედებენ კონსერვატიული (სიმძიმის ან დრეკადობის) ძალებით;

[1]  $t=0$ , სხეული აისროლეს  $V_0$  სიჩქარით ( $E_{k0} = 0.5mV_0^2$ ),  $h_0$  სიმაღლიდან ( $E_{p0} = mgh_0$ ). სრული მექანიკური ენერჯია

$$E_0 = 0.5mV_0^2 + mgh_0 \quad (2.1)$$

[2] მაქსიმალურ სიმაღლეზე  $E_{km} = 0$ ,  $E_{pm} = mgh_m$  და

$$E_m = mgh_m \quad (2.2)$$

[3] შუალედურ სიმაღლეზე  $E_{k1} = 0.5mV_1^2$ ,  $E_{p1} = mgh_1$  და

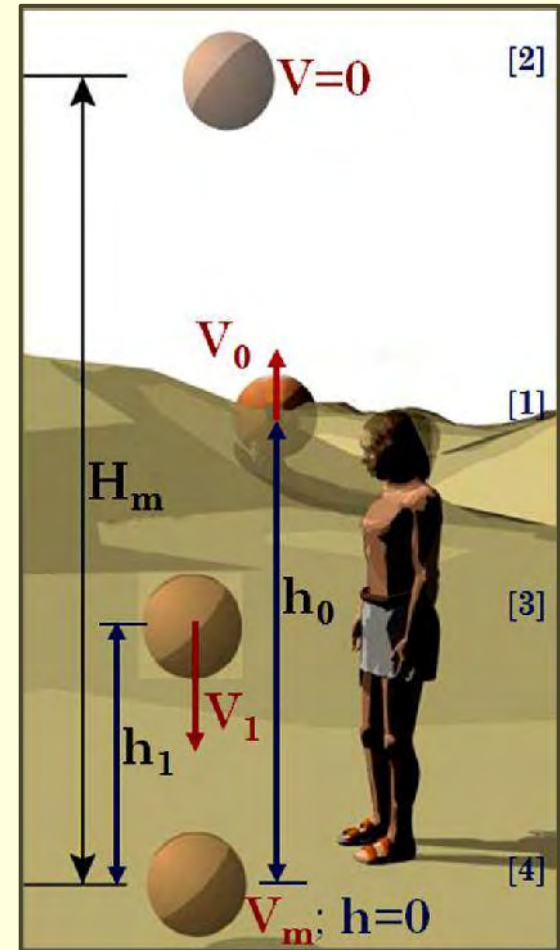
$$E_3 = 0.5mV_1^2 + mgh_1 \quad (2.3)$$

[4] დაცემის მომენტში  $h=0$  ( $E_p = 0$ ),  $E_{k4} = 0.5mV_4^2$  და

$$E_4 = 0.5mV_4^2 \quad (2.4)$$

• მარტივი საჩვენებელია, რომ  $E_4 = E_m$  - ენერჯია რჩება უცვლელი:

$$E_4 = 0.5mV_4^2 = 0.5m(2gH_m) = mgh_m = E_m \quad (2.5)$$



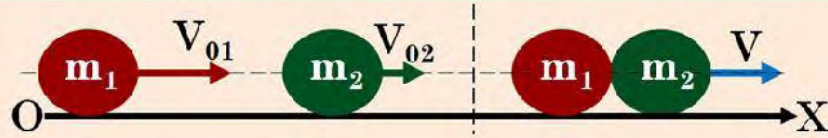
▪ ამრიგად, მექანიკური ენერჯის მუდმივობის კანონის მიხედვით

$$E_0 = E_m = E_3 = E_4 = \text{const}$$

### 3. ნაწილაკების დაჯახება

✓ მექანიკის ორივე მუდმივობის კანონის (იმპულსის, ენერჯის) საფუძველზე ხდება ნაწილაკთა დაჯახების დეტალური აღწერა. აქ განიხილება ცენტრალური {ცენტრებზე გამავალი წრფის გასწვრივ} დაჯახების ორი ვარიანტი: **აბსოლუტურად დრეკადი** - დაჯახების შემდეგ სხეულები დამოუკიდებლად მოძრაობენ; **აბსოლუტურად არადრეკადი** - დაჯახების შემდეგ სხეულები მოძრაობენ ერთად, როგორც ერთი სხეული ჯამური მასით და ერთი სიჩქარით;

#### არადრეკადი ცენტრალური დაჯახება



$$\bullet \Sigma \vec{P} = \text{const} \Rightarrow m_1 V_{01} + m_2 V_{02} = (m_1 + m_2) V \quad (3.1)$$

$$\bullet (3.1) \Rightarrow V = (m_1 V_{01} + m_2 V_{02}) / (m_1 + m_2) \quad (3.2)$$

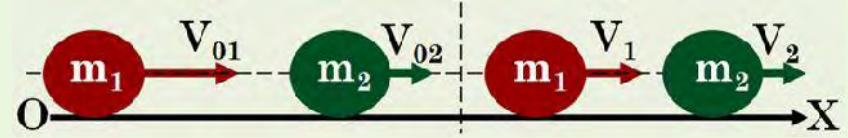
$$\bullet \text{თუ } m_1 = m_2 = m \Rightarrow V = 0.5(V_{01} + V_{02}) \quad (3.3)$$

$$\bullet \text{თუ } m_1 = m_2 = m \text{ და } V_{01} = -V_{02} \Rightarrow V = 0$$

• არადრეკადი დაჯახებისას მექანიკური ენერჯის მუდმივობის კანონი არ სრულდება. ბირთვების დეფორმაციის შედეგად კინეტიკური ენერჯის ნაწილი მათ შინაგან ენერჯიად გარდაიქმნება:

$$\Delta U = E_{k0} - E_k = 0.5[m_1 V_{01}^2 + m_2 V_{02}^2] - 0.5[(m_1 + m_2) V^2] \quad (3.4)$$

#### დრეკადი ცენტრალური დაჯახება



$$\bullet \Sigma \vec{P} = \text{const} \Rightarrow m_1 V_{01} + m_2 V_{02} = m_1 V_1 + m_2 V_2 \quad (3.5)$$

$$\bullet \Sigma E_k = \text{const} \Rightarrow 0.5[m_1 V_{01}^2 + m_2 V_{02}^2] = 0.5[m_1 V_1^2 + m_2 V_2^2] \quad (3.6)$$

$$\bullet \{(3.5), (3.6)\} \Rightarrow$$

$$V_1 = [(m_1 - m_2)V_{01} + 2m_2 V_{02}] / (m_1 + m_2) \quad (3.7)$$

$$V_2 = [(m_2 - m_1)V_{02} + 2m_1 V_{01}] / (m_1 + m_2) \quad (3.8)$$

$$\bullet \text{თუ } m_1 = m_2 = m \Rightarrow V_1 = V_{02}; V_2 = V_{01} \quad (3.9)$$

$$\bullet \text{თუ } m_1 = m_2 = m \text{ და } V_{02} = 0 \Rightarrow V_1 = 0; V_2 = V_{01}$$

• ვინაიდან  $E_k = \text{const}$ , არ იცვლება შინაგანი ენერჯიაც  $\Delta U = 0$ .



“მასწავლე - შეუძლებელი არ მოვითხოვო და გამოუსწორებელზე არ ვილაპარაკო.”  
George V

George V



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1865 - 1936

## სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 10

თემა:

სემესტრი I

### მყარი სხეულის ბრუნვითი მოძრაობის დინამიკა

88·

070

1. {მაბრუნებელი} ძალის მომენტი

071

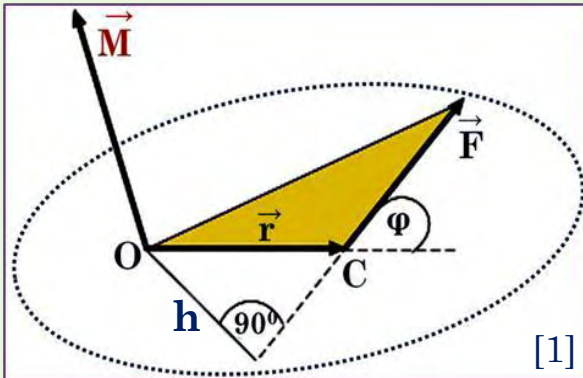
2. ინერციის მომენტი

073

3. იმპულსის მომენტი

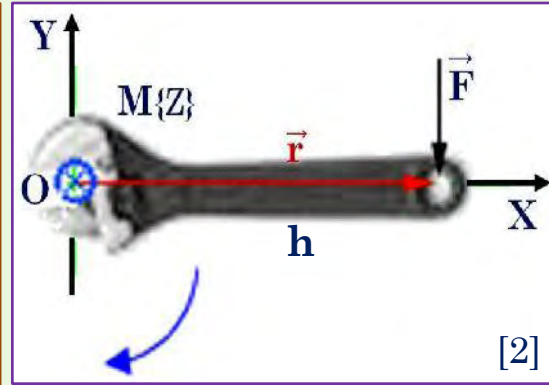


# 1. {მაბრუნებელი} ძალის მომენტი



✓ ძალის მაბრუნებელ ეფექტიანობას ახასიათებენ ვექტორული სიდიდით - ძალის მომენტით ( $\vec{M}$ );

- ძალის მომენტის ორი სახე:
  - [1] წერტილის (ანუ პოლუსის) მიმართ;
  - [2] ღერძის მიმართ;



▪ მყარი სხეულის რომელიმე (O) წერტილის მიმართ ძალის მომენტი  $\vec{M}$  - ვექტორული სიდიდეა [1]. მას განსაზღვრავს ძალის ვექტორი  $\vec{F}$  და მისი მოდების წერტილის (C)  $\vec{r}$  რადიუს-ვექტორი:

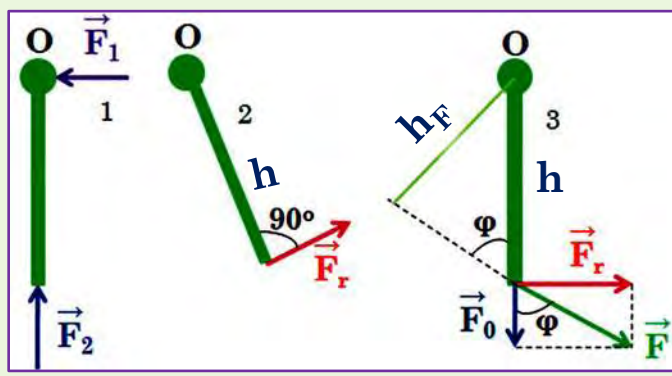
$$\vec{M} = [\vec{r} \cdot \vec{F}] \quad (1.1)$$

▪ ძალის მომენტი მართობია  $\vec{F}$  და  $\vec{r}$  ვექტორებზე გავლებული სიბრტყის, ხოლო მისი მიმართულება დგინდება ბურღის წესით (სახელურს ვაბრუნებთ  $\vec{r}$  ვექტორიდან  $\vec{F}$ -კენ);

- {(1.1), [1]}  $\Rightarrow M = F \cdot r \sin \phi = F \cdot h \quad (1.2)$
- $h$  - ძალის მხარი, პოლუსიდან ძალის მიმართულებაზე დაშვებული მართობი;
- (1.2)  $\Rightarrow$  ძალის მომენტი სიდიდით ძალისა და მხრის ნამრავლის ტოლია;

▪ ნებისმიერი ღერძის მიმართ ძალის მომენტი წარმოადგენს ღერძის რომელიმე წერტილის მიმართ ძალის მომენტის გვემილს ღერძზე;

• ამდენად, ძალის ვექტორის მომენტი ღერძის მიმართ აღარ არის ვექტორი - სკალარული სიდიდეა;



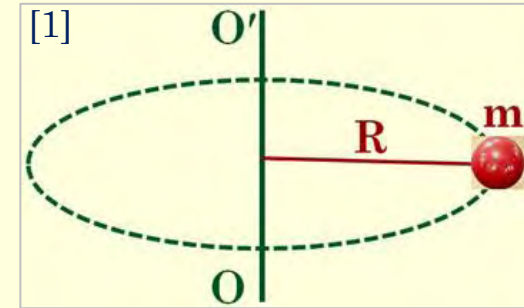
- [1]  $h=0$   
 $M(F_1)=0$ ;  
 $M(F_2)=0$ ;
- [2]  
 $M_m = F_r h$ ;

[3]  $M = F_r h = F r \sin \phi$  ან  $M = F \cdot h_F = F r \sin \phi$ ;

## 2.ინერციის მომენტი

▪ გადატანითი მოძრაობისას ძალის ზემოქმედებით სხეულის მიერ შეძენილ აჩქარებას **ინერტულობა** განსაზღვრავს, რომლის ზომა **მასაა**:  $\mathbf{ma}=\mathbf{F}$  (2.1)

✓ ღერძის ირგვლივ ბრუნვითი მოძრაობისას [1] სხეულის **ინერტულობას** ასახავს სკალარული ფიზიკური სიდიდე - **J ინერციის მომენტი**, რომელიც აკავშირებს სხეულის კუთხურ აჩქარებას ძალის მომენტთან:  $\mathbf{J}\beta=\mathbf{M}$  (2.2)



▪ უძრავი ღერძიდან **R** მანძილით დაცილებული **m** მასის ნივთიერი წერტილის **ინერციის მომენტი** ამ ღერძის მიმართ  $\mathbf{J} = mR^2$  (2.3)  $\Rightarrow [\mathbf{J}] = \text{კგ}\cdot\text{მ}^2$ ;

▪ მრავალ ნაწილაკიანი (**n**) მექანიკური სისტემის **ინერციის მომენტი** უძრავი ღერძის მიმართ

$$\mathbf{J} = \sum_{i=1}^n \Delta m_i R_i^2 \quad (2.4) \Rightarrow \mathbf{J} = \int_m R^2 dm = \int_V \rho R^2 dV \quad (2.5)$$

▪ მყარი სხეულის **J ინერციის მომენტი** დამოკიდებულია:

- სხეულის მასაზე, ფორმასა და ზომეზე;
- მის მდებარეობაზე ბრუნვის ღერძის მიმართ;

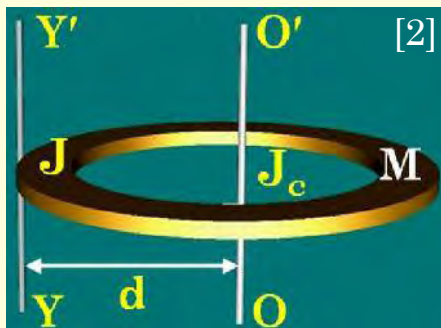
▪ **შტეინერის** თეორემის თანახმად, **J** სხეულის ინერციის მომენტი ნებისმიერი ღერძის მიმართ ტოლია ამ სხეულის **მასათა ცენტრზე** გამავალი ღერძის მიმართ **J<sub>c</sub>** ინერციის მომენტისა და სხეულის **M** მასის ღერძებს შორის **d** მანძილზე ნამრავლის ჯამისა [2]:  $\mathbf{J} = \mathbf{J}_c + \mathbf{Md}^2$  (2.7)

რგოლის ინერციის მომენტი:

$$\mathbf{J}_c = \mathbf{M}(R_1^2 + R_2^2)/2 \quad (2.6)$$

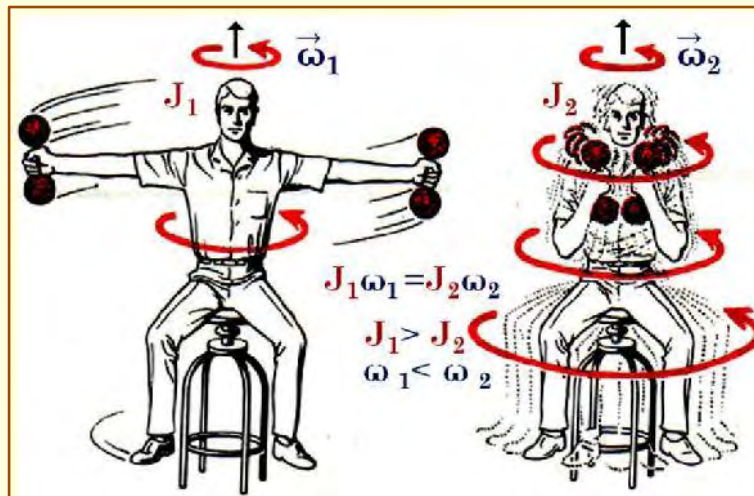
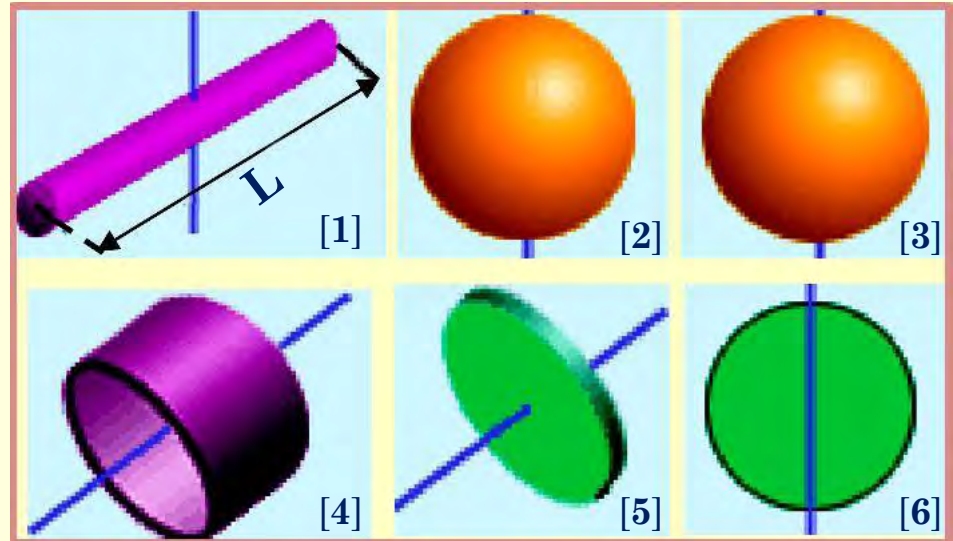


J. Steiner  
1796 - 1863



მარტივი ფორმის ერთგვაროვან სხეულთა ინერციის მომენტები  
(ზოგიერთი ბრუნვის ღერძის მიმართ)

- |                           |                     |
|---------------------------|---------------------|
| [1] მყარი ღერო            | $J_c = (1/12)ML^2;$ |
| [2] სფერო                 | $J_c = (1/5)MR^2;$  |
| [3] სფერული ზედაპირი      | $J_c = (2/3)MR^2;$  |
| [4] ცილინდრი თხელკედლიანი | $J_c = MR^2;$       |
| [5] დისკო                 | $J_c = (1/2)MR^2;$  |
| [6] დისკო                 | $J_c = (1/4)MR^2;$  |

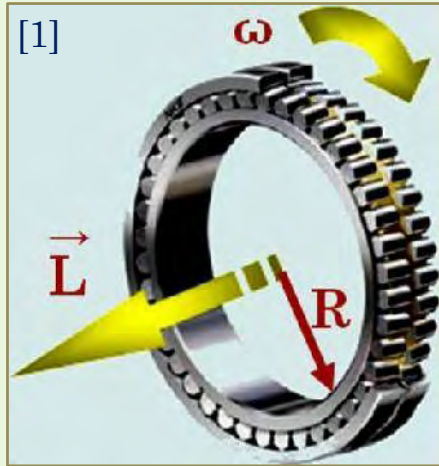


↓ რატომ ? მიზეზი ? ↓



## 3. იმპულსის მომენტი

▪ გადატანითი მოძრაობისას ძალა განსაზღვრავს სხეულის იმპულსის ცვლილების სიჩქარეს:  $\vec{F} = d\vec{P}/dt = m d\vec{V}/dt$  (3.1)  $\rightarrow$  თუ  $\vec{F}=0 \Rightarrow \vec{P} = \text{const}$  (3.2)



✓ ღერძის ირგვლივ ბრუნვისას [1] მოძრაობის ანალიზი (3.1)-ს ანალოგიურია, მაგრამ ეფუძნება ძალის მომენტს

$$\{(2.2) \mathbf{J}\vec{\beta} = \vec{M}\} \Rightarrow \vec{M} = J d\vec{\omega} / dt = d(\mathbf{J}\vec{\omega}) / dt = d\vec{L} / dt \quad (3.3)$$

▪ **L იმპულსის მომენტი**ა, ის ითვალისწინებს: 1.რა სიდიდის მასა ბრუნავს; 2.როგორია ბრუნვის სიჩქარე; 3.როგორ არის მასა განაწილებული ბრუნვის ღერძის მიმართ;

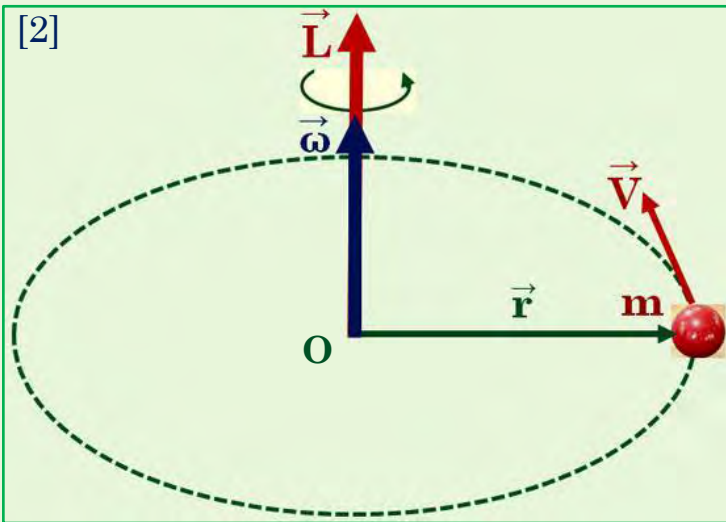
▪ (3.3)  $\vec{M} = d\vec{L} / dt$  ბრუნვითი მოძრაობის ძირითადი განტოლებაა; •სხეულის  $\vec{L}$  იმპულსის მომენტის ცვლილების  $d\vec{L} / dt$  სიჩქარე გარეშე ძალების მომენტების ვექტორული ჯამის (გარეშე ძალების  $\vec{M}$  მთავარი მომენტის) ტოლია და იგივე მიმართულება აქვს;

▪ (3.3)  $\Rightarrow$  თუ ძალის მომენტი  $\vec{M} = 0 \Rightarrow \vec{\omega} = \text{const}$  და იმპულსის მომენტი  $\vec{L} = J\vec{\omega} = \text{const}$  (3.4)

▪ (3.4) **იმპულსის მომენტის მუდმივობის კანონია** (III მუდმივობის კანონი მექანიკაში). მბრუნავი სხეულის იმპულსის სრული მომენტი მუდმივია, თუ მასზე მოქმედი ძალების მთავარი (ჯამური) მომენტი ნულის ტოლია;



[2]



✓  $\vec{L}$  იმპულსის მომენტის ვექტორი [2] მართობია  $\vec{r}$  და  $\vec{V}$  (ანუ  $\vec{P}$ ) ვექტორების, დევს ბრუნვის ღერძზე და  $\vec{\omega}$ -ს თანამიმართულია;

▪ O წერტილის მიმართ  $\vec{L}$  ვექტორს  $\vec{r}$  და  $\vec{P}$  ვექტორების ვექტორული ნამრავლი განსაზღვრავს:

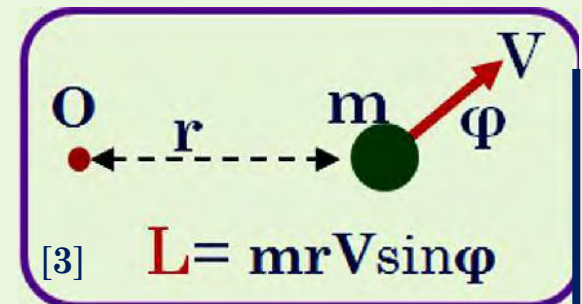
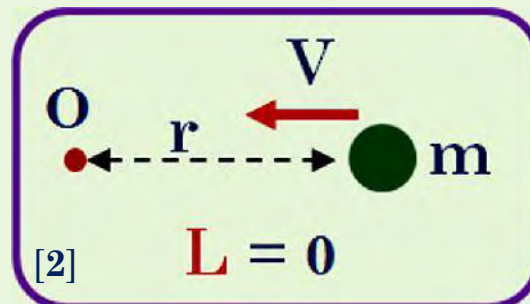
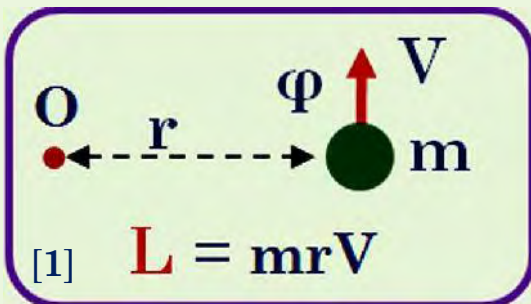
$$\vec{L} = [\vec{r} \cdot \vec{P}] = m[\vec{r} \cdot \vec{V}] \quad (3.5); \quad \vec{V} = [\vec{\omega} \vec{r}] \quad (3.6) \Rightarrow (3.5)$$

$$\vec{L} = m[\vec{r} [\vec{\omega} \vec{r}]] \quad (3.7); \quad \Rightarrow \vec{L} = m r^2 \vec{\omega} = J \vec{\omega} \quad (3.8);$$

▪ (3.5)  $\Rightarrow$  იმპულსის მომენტის რიცხვითი მნიშვნელობის

$$L = m r V \sin \varphi = m r^2 \omega \sin \varphi = J \omega \sin \varphi \quad (3.9)$$

სამი მაგალითი:



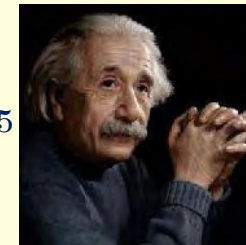
✓ კინეტიკური ენერგია ბრუნვითი მოძრაობისას:  $E_k = J \omega^2 / 2 \quad (3.10)$

▪ სრული კინეტიკური ენერგია {გადატანითი და ბრუნვითი მოძრაობა}:

$$E_k = m V_c^2 / 2 + J \omega^2 / 2 \quad (3.11) \quad (V_c - \text{მასათა ცენტრის სიჩქარე})$$



“წარმოდგენა ცოდნაზე მნიშვნელოვანია.”  
Albert Einstein



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1879 - 1955

## სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 11

თემა:

სემესტრი I

### რხევები და ტალღები

88

076

1. რხევითი მოძრაობა {საყრდენი ცნებები}

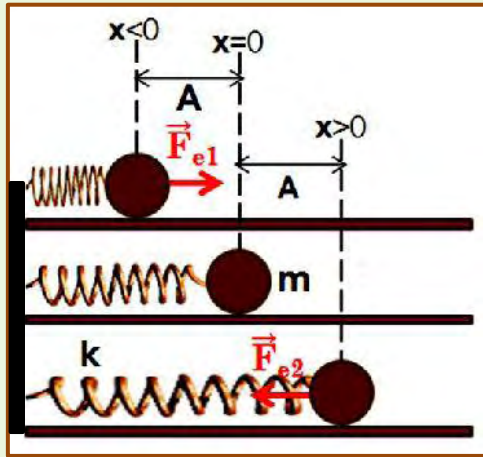
077

2. ჰარმონიული რხევა {განტოლება, სიჩქარე, აჩქარება, ენერგია}

079

3. მილევადი და იძულებითი რხევები. რეზონანსი

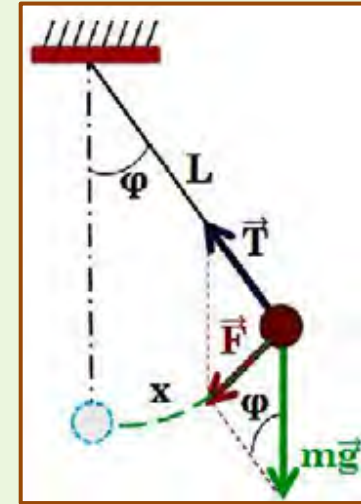
# 1. რხევითი მოძრაობა {საყრდენი ცნებები}



✓ მრავალი პროცესი ხასიათდება **პერიოდული განმეორებადობით**;

✓ **ნებისმიერი** ფიზიკური პარამეტრის (მექანიკურის, ელექტრომაგნიტურის, ატომურის) **პერიოდულ ცვლილებას** უწოდებენ **რხევას**;

✓ ბუნებისგან განურჩევლად რხევითი პროცესები ერთიან წარმოდგენას ექვემდებარებიან, ერთნაირ კანონებს ემორჩილებიან და **ფიზიკურ სიდიდეთა უცვლელი ერთობლიობით** (პერიოდი, სიხშირე, ამპლიტუდა) აიწერებიან;



▪ **T პერიოდი** - ერთი სრული რხევის დრო. {ანუ} **მინიმალური დრო**, რომლის განმავლობაში **პარამეტრი**, რომელიც ცვლილებას განიცდის, **ორჯერ იძენს რიცხობრივად და მიმართულებით ტოლ მნიშვნელობას**;

▪ **A ამპლიტუდა** - რხევით პროცესში მონაწილე ფიზიკური პარამეტრის შესაძლო **მაქსიმალური მნიშვნელობის მოდული**;

▪ **v სიხშირე** - დროის ერთეულში შესრულებული სრული რხევების რიცხვი;  
•  $\omega = 2\pi v$  - ციკლური სიხშირე;

▪ თუ **t** დროში **N** სრული რხევა სრულდება  
{  $T = t / N$ ;  $v = N / t$ ;  $T = 1/v$  } (1.1)

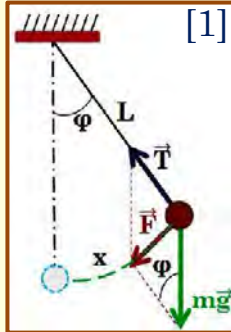
[T] = 1 წმ; [v] = 1 ჰც;

1 ჰერცი ისეთი რხევის სიხშირეა, როდესაც 1 წამში 1 სრული რხევა სრულდება;

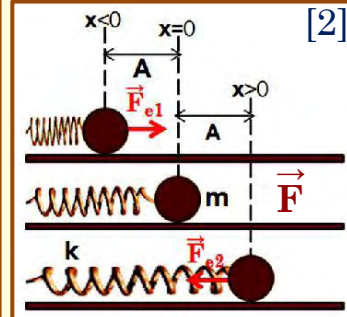
▪ **მექანიკური** რხევებისას წონასწორული მდგომარეობიდან **x გადახრა** (წანაცვლება) განსაზღვრავს სხეულის **მდებარეობას** დროის ნებისმიერ მომენტში;

## 2.ჰარმონიული რხევა {განტოლება, სიჩქარე, აჩქარება, ენერჯია}

▪ მრავალი მერხევი სისტემა ასრულებს მარტივ და რეგულარულ რხევებს სისტემის შიდა ძალების მოქმედებით {გარეშე ძალის ერთჯერადი ზეგავლენით - წონასწორობიდან გამოყვანისას};



▪ გარეშე ძალამ:  
 • გადახარა [1];  
 $R_1$  შეკუმშვა [2];  
 ▪ შიდა {მერხევი} ძალაა:  
 [1]  $F$  { $mg \sin \phi$ } სიმძიმის;  
 [2]  $F_e$  დრეკადობის;



ერთი სრული რხევისას სხეული გადის  $4A$ -ს ტოლ მანძილს, რომელსაც პერიოდის ( $t = T$ ) ტოლ დროს ანდომებს { $v = 1/T$ ;  $\omega = 2\pi v$ }:

<u>ზამბარა</u>	<u>ქანქარა</u>
$T = 2\pi\sqrt{m/k}$ (2.3);	$T = 2\pi\sqrt{L/g}$ (2.6);
$v = (2\pi)^{-1}\sqrt{k/m}$ (2.4);	$v = (2\pi)^{-1}\sqrt{g/L}$ (2.7);
$\omega = \sqrt{k/m}$ (2.5);	$\omega = \sqrt{g/L}$ (2.8);

▪ წონასწორობიდან გადახრის პროპორციული და წონასწორობის მდებარეობისკენ მიმართული ძალით გამოწვეულ რხევას ჰარმონიული რხევა ეწოდება (*I განმარტება*);

$F = -mg \sin \phi$  (2.1);       $F_e = -kx$  (2.2)

▪ ამ შიდა ძალის, როგორც სიდიდეს, ასევე მიმართულებას დროის მოცემულ მომენტში მერხევი სხეულის მდებარეობა განსაზღვრავს {ძალის მაქსიმალურ სიდიდეს -  $A$  ამპლიტუდა};

ნიუტონის II კანონი

$a = F_e/m$  (2.9);       $a = -mg \sin \phi / m$  (2.12);

$a = -kx/m$  (2.10);       $a = -gx/L$  (2.13);

ავლნიშნით:

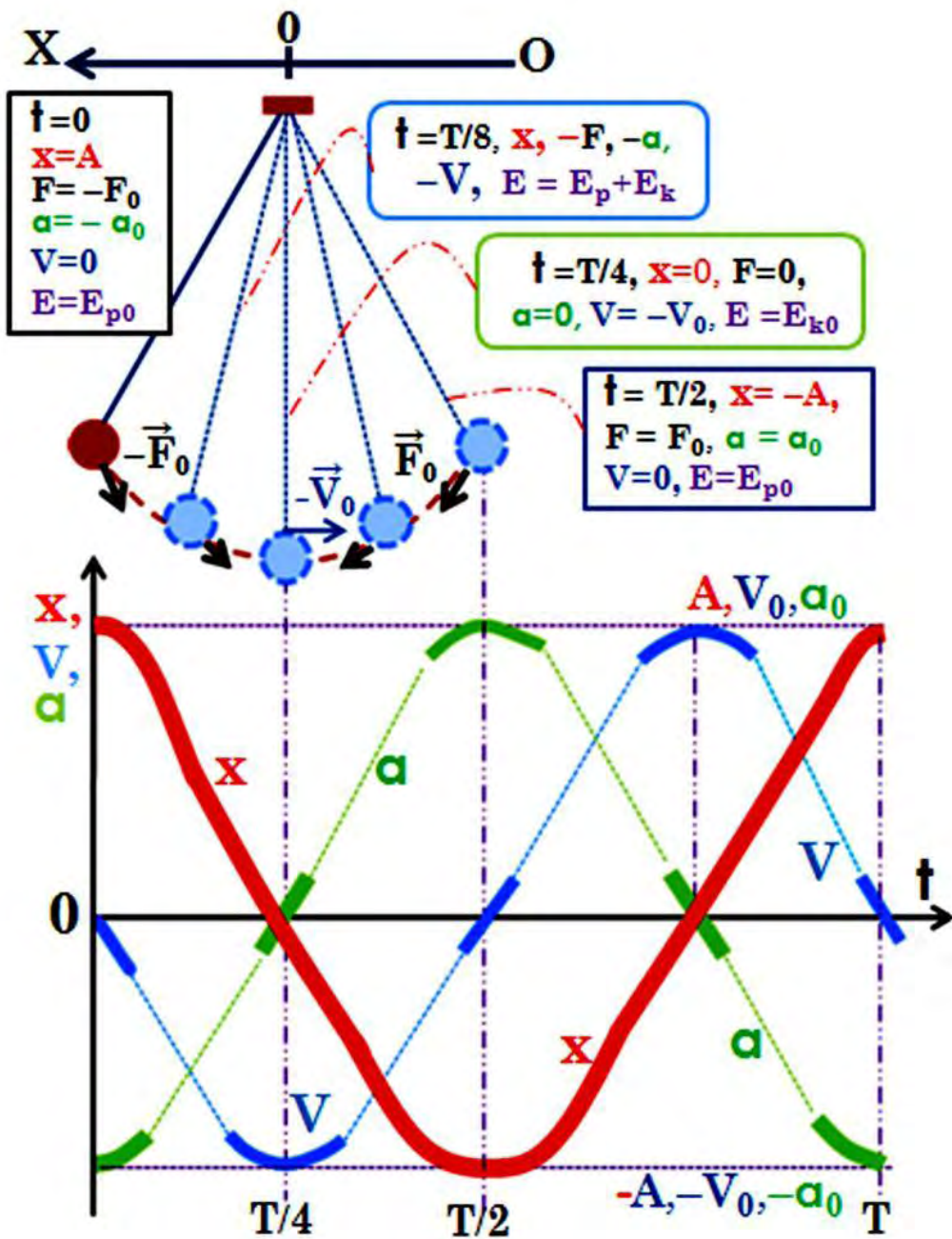
$k/m = \omega_0^2$  (2.11);       $g/L = \omega_0^2$  (2.14);

$d^2x/dt^2 = -\omega_0^2 x$  (2.15);

$x = A \cos(\omega_0 t + \phi)$  (2.16)       $x = A \sin(\omega_0 t + \phi)$  (2.17)

(2.16, 2.17) ჰარმონიული რხევის განტოლებებია  
 $x$  - წანაცვლება;       $A$  - რხევის ამპლიტუდა;  
 $(\omega_0 t + \phi)$  - რხევის ფაზა;       $\phi$  - რხევის საწყისი ფაზა;  
 რხევა, რომელიც სრულად აიწერება  $\sin$  ან  $\cos$  ფუნქციით - ჰარმონიული რხევა (*II განმარტება*);





▪ თუ ქანქარა წონასწორობიდან *ბიძგიით* ( $t=0, x=0$ ) გამოიყვანეს, მაშინ  $x(t)$  სინუსოიდაა. თუ ჯერ გადახარეს ( $t=0, x=A$ ) და მერე *გაათავისუფლეს* -  $x(t)$  კოსინუსოიდაა;

▪ (2.16)  $\Rightarrow$  რხევის ფაზა დამოკიდებულია რხევის პერიოდის (სიხშირის) სიდიდეზე, მაგრამ (იხევე, როგორც *პერიოდი*) არ არის დამოკიდებული ამპლიტუდაზე;

▪ (2.16) ეფუძნება  $T, v, a$ -ს დროზე დამოუკიდებლობას (მუდმივობას). ე.ი., მექანიკური რხევა *ჰარმონიულია*, თუ მისი პერიოდი და სიხშირე მუდმივი სიდიდეებია (*III გან-ბა*);

▪ ჰარმონიული რხევისას *სიჩქარე* :

$$V = dx/dt = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi) = A\omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi + \pi/2) \quad (2.18)$$

▪ ჰარმონიული რხევისას *აჩქარება* :

$$a = dV/dt = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi) = -\omega_0^2 x = A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi + \pi) \quad (2.19)$$

▪ წონასწორობიდან ამპლიტუდური ( $x=A$ ) გადახრისას: *მაქსიმალურია* -  $F, a$  და  $E_p$ , მაგრამ  $V=0$  და  $E_k=0$ ;

▪ ნებისმიერი  $t$  მომენტისთვის:

$$E_k = mV^2/2 = 0.5mA^2\omega_0^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi) \quad (2.20)$$

$$\{(2.11) k/m = \omega_0^2\} \Rightarrow k = m\omega_0^2$$

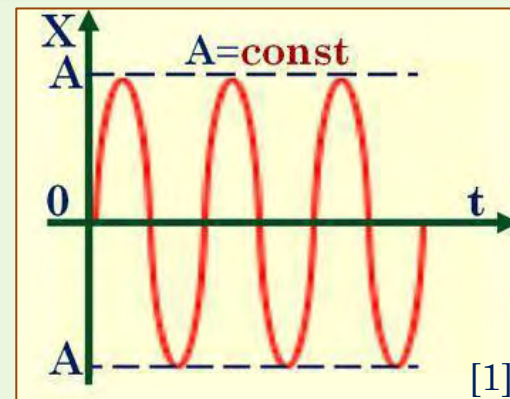
$$E_p = kx^2/2 = 0.5mA^2\omega_0^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi) \quad (2.21)$$

$$E = E_k + E_p = 0.5mA^2\omega_0^2 [\sin^2(\omega_0 t + \varphi) + \cos^2(\omega_0 t + \varphi)] = 0.5mA^2\omega_0^2 = E_{k0} = E_{p0} \quad (2.22)$$

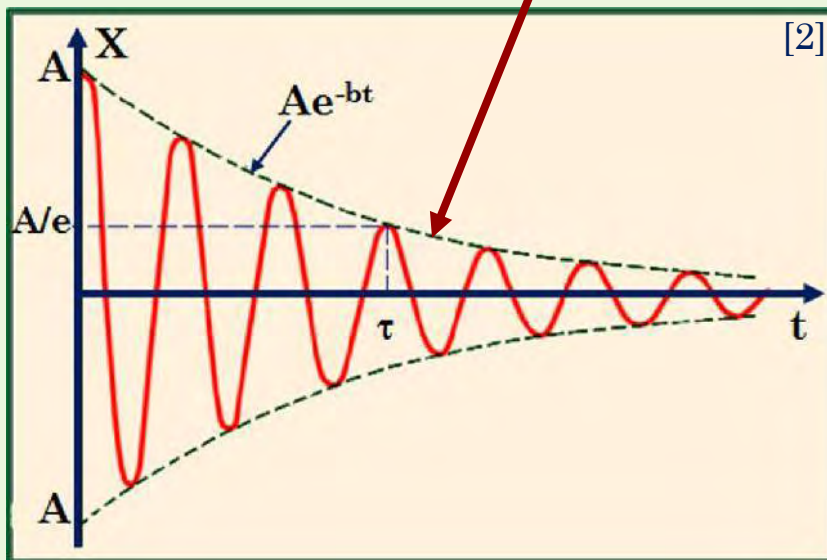
$E = \text{const}$

## 3. მილევადი და იძულებითი რხევები. რეზონანსი

✓ ჰარმონიული რხევები თავისუფალი რხევებია. თუ არაა გარედან ზემოქმედება - მერხევი სისტემა "საკუთარ თავს ეკუთვნის", ირხევა **საკუთარი სიხშირით** და განუსაზღვრელი დროის განმავლობაში - უცვლელი ამპლიტუდით [1];



✓ შემაფერხებელი ძალის არსებობისას რხევა **კლებადი ამპლიტუდით** ხასიათდება [2] - რხევა მილევადია;



✓ მილევადი რხევის განტოლებაა -

$$x = Ae^{-bt} \cos(\omega t + \theta) \quad (3.1) \text{ აქ}$$

- $b = \mu/2m$  ( $\mu$  - წინაღობის კოეფიციენტი);
- $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - b^2}$  მილევადი რხევის სიხშირე;
- $A' = Ae^{-bt}$  მილევადი რხევის ამპლიტუდა;
- $T = 2\pi / \omega = 2\pi / \sqrt{\omega_0^2 - b^2}$  მილევადი რხევის პერიოდი ( $T \rightarrow \infty$ , ე.ი. არ ირხევა, თუ  $b \rightarrow \omega_0$ );

✓ მილევადი რხევის II განტოლებაა -

$$x = Ae^{-\lambda t/T} \cos(\omega t + \theta) \quad (3.2) \text{ აქ}$$

- $\lambda$  - მილევადი რხევის ლოგარითმული დეკრემენტი  
 $\lambda = \ln(A_1/A_2)$  ან  $\lambda = \mu T/2m$  ;

რხევითი სისტემა ხასიათდება **საკუთარი  $\omega_0$**  სიხშირით, მაგრამ მიღების აღმოსაფხვრელად, **ენერჯის დანაკარგების აღსადგენად** ის შეიძლება “ვაიძულოთ” რხევა **სხვა  $\omega$**  სიხშირით წარმართოს;

✓ რხევები **იძულებითია**, როდესაც მოქმედი გარეშე, **მაიძულებელი** ძალის ცვლილების პერიოდი განსაზღვრავს სისტემის რხევის **რეალურ სიხშირეს**;

- **იძულებით** რხევებს სამი მდგენელი აყალიბებს -
- საკუთარი (ვთქვათ დრეკადობის ძალით):  $-(k/m)x \equiv -\omega_0^2 x$ ;
- წინააღობის:  $-(\mu/m)(dx/dt) \equiv -2b dx/dt$ ;
- იძულებითი:  $(H/m) \cos \omega t \equiv h \cos \omega t$   
{ **H** - გარე, ცვლადი ძალის ამპლიტუდაა და **h**  $\equiv H/m$  };



იძულებითი რხევების დიფერენციალური განტოლება

$$d^2x/dt^2 = -\omega_0^2 x - 2b dx/dt + h \cos \omega t \quad (3.3)$$



იძულებითი რხევების განტოლება და ამპლიტუდა

$$x = A_0 \cos\{\omega t - \arctg[2b\omega/(\omega_0^2 - \omega^2)]\} \quad (3.4)$$

$$A_0 = h / \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4b^2\omega^2} \quad (3.5)$$

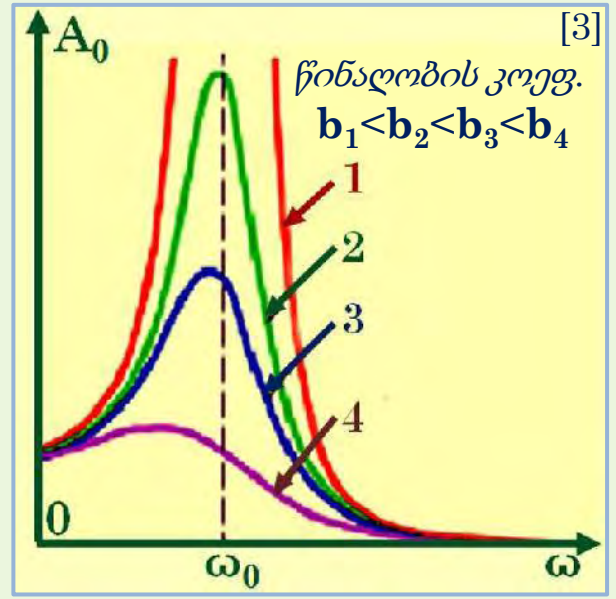
✓ **რეზონანსი** - იძულებითი რხევის **ამპლიტუდის მკვეთრი ზრდა**, როდესაც **მაიძულებელი** ძალის სიხშირე ემთხვევა რხევის **რეზონანსულ** ( $\approx$ საკუთარ,  $\omega_R \approx \omega_0$ ) სიხშირეს [3];

რეზონანსული ამპლიტუდა

$$A_0 = h / 2b \sqrt{(\omega_0^2 - b^2)} \quad (3.6)$$

რეზონანსული სიხშირე

$$\omega_R = \sqrt{(\omega_0^2 - 2b^2)} \quad (3.7)$$

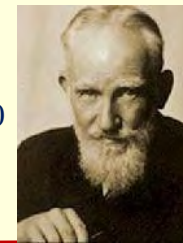


[3]





“თუ თქვენ ვერ იღებთ იმას, რაც გიყვართ, ისღა დაგრჩენიათ, შეიყვაროთ ის, რაც გერგებათ.” George B. Shaw



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1856 - 1950

## სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 12

თემა:

სემესტრი I

### რხევები და ტალღები

88

1. ტალღური მოძრაობა. ტალღის ზედაპირი და ფრონტი

082

2. განივი და გრძივი ტალღები. ტალღის სიგრძე, სიხშირე, სიჩქარე

083

3. ტალღის განტოლება და ენერგია

085

4. ტალღების ინტერფერენცია. მდგარი ტალღები

087

5. დინამიკის Mind Map

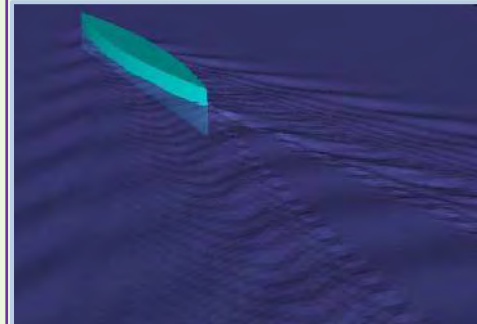
090



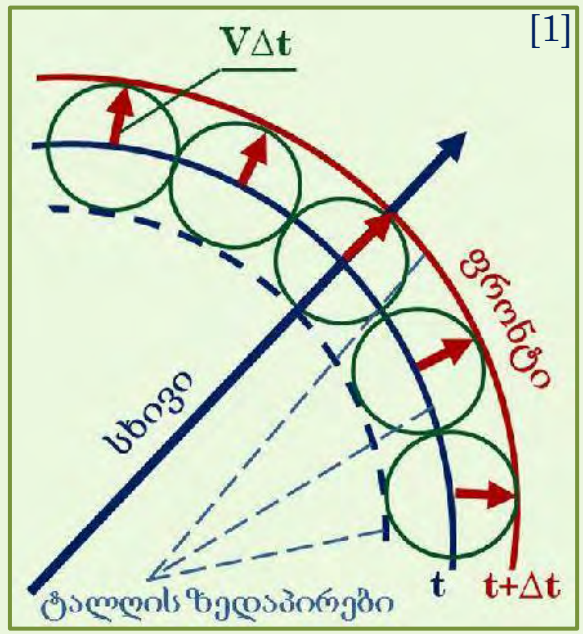
# 1. ტალღური მოძრაობა. ტალღის ზედაპირი და ფრონტი



✓ გარემოს ნაწილის დეფორმაციისას, წონასწორობის მდგომარეობიდან **წანაცვლებული მოლეკულები** ურთიერთქმედებენ მეზობელ ნაწილაკებთან და მათი **ახალი ჯგუფის** მდებარეობის ცვლილებას განაპირობებენ;



✓ სხეულის რომელიმე ნაწილის რხევით მოძრაობაში მოყვანისას, რხევით პროცესში {წერტილ-წერტილ} **თანმიმდევრულად** ჩართული აღმოჩნდება ამ სხეულის სხვა არეებიც. პროცესი **დროს** მოითხოვს და დროის **სხვადასხვა მომენტში** ნაწილაკების **წანაცვლება სხვადასხვაა**;



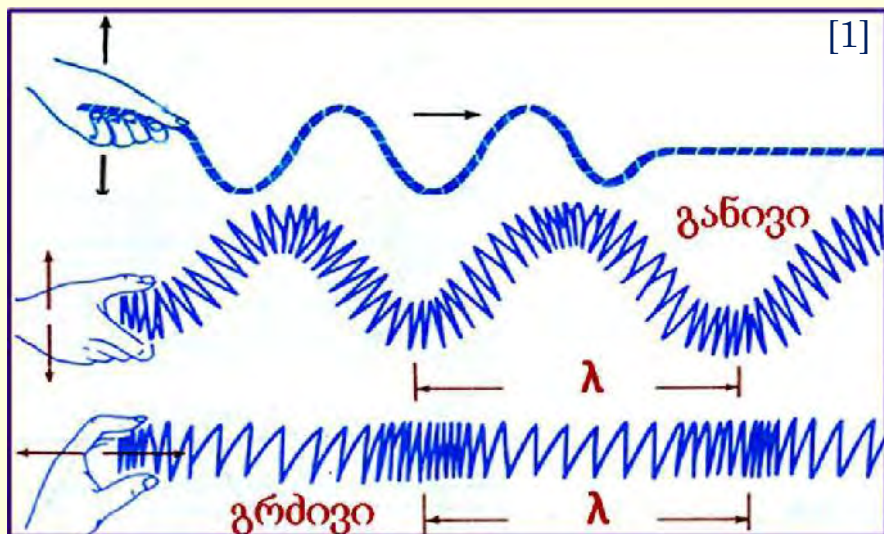
- ✓ ნებისმიერი ტალღური მოძრაობის საფუძველი **რხევაა**. გარემოს ყოველი ნაწილაკი იძვრება წინა ნაწილაკის რხევას, მაგრამ გარკვეული დაგვიანებით. **რხევის გავრცელებას გარემოში, დროის განმავლობაში ტალღა ეწოდება**;
- ტალღის ფიზიკურ ცნებას აყალიბებს [1]:
- **ტალღის ზედაპირი** - იმ წერტილთა გეომეტრიული ადგილი, რომლებსაც რხევები ერთდროულად აღწევენ {ანუ, რხევის ფაზა **თანხვედრილი** აქვთ};
- **სხივი** - ტალღის გავრცელების **მიმართულება** {ტალღური ზედაპირის ნორმალი};
- **ტალღის ფრონტი** - ტალღის ყველაზე **წინ** მდებარე ზედაპირი;

## 2. განივი და გრძივი ტალღები. ტალღის სიგრძე, სიხშირე, სიჩქარე

ტალღის გავრცელებისას გარემოს ნაწილაკების ჩაბმა რხევით პროცესში, ტალღის ფრონტის “ენაზე” ჩამოაყალიბა ჰიუგენსმა. **ჰიუგენსის პრინციპი**: სივრცის ყოველი წერტილი, რომელსაც აღწევს ტალღის ფრონტი, **თვითონ ხდება მეორადი** სფერული ტალღების წყარო. ამ მეორეული სფერული ტალღების მომვლები წირი წარმოადგენს ტალღის **ახალ ფრონტს** დროის მომდევნო მომენტში



C. Huygens  
1629-1695



✓ რხევით მოძრაობაში მონაწილე ნაწილაკების **რხევის მიმართულების და ტალღის გავრცელების მიმართულების ურთიერთორიენტაციის** მიხედვით [1], ანსხვავებენ **განივ** და **გრძივ** ტალღებს;

- **განივია** ტალღა, თუ ნაწილაკების რხევა წარმოებს ტალღის გავრცელების **მართობულად**;
- **გრძივია** ტალღა, თუ ნაწილაკების რხევა წარმოებს ტალღის გავრცელების **გასწვრივ**;
- **ნებისმიერი** ტიპის ტალღისას, გარემოს ნაწილაკები ირხევიან ამ გარემოს **მცირე არეში**, ტალღა კი დიდ მანძილზე ვრცელდება;

✓ ტალღის გავრცელებას თან ახლავს **ენერგიის** გადატანა ნივთიერების გადატანის გარეშე;

▪ ტალღა ჰარმონიულია, თუ ტალღის აღძვრის მიზეზი - ნაწილაკების რხევა **სინუსის** ან **კოსინუსის** კანონს ექვემდებარება;



▪გარემოს ერთი არის რხევა **V სიჩქარით** გადაეცემა მეზობელ არეს  $\Delta t$  დროში;

•ტალღა  $\Delta x = V\Delta t$  მანძილით წაინაცვლებს გავრცელების მიმართულებით (X ღერძი);

•მერხევი წერტილების მდებარეობა იცვლება Y ღერძის მიმართ [2];

▪მერხევი ნაწილაკების მდებარეობა იცვლება და პერიოდულად მეორდება სივრცეშიც და დროშიც;

•**ორმაგი პერიოდულობა** ტალღური მოძრაობის ნიშანდობლივი თავისებურებაა;

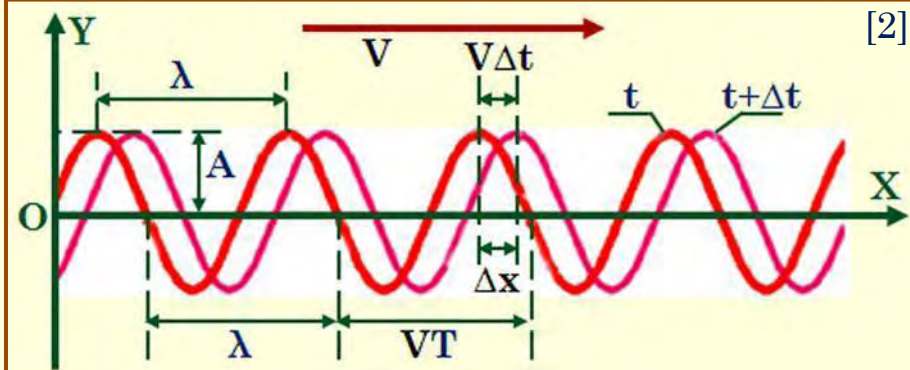
▪ტალღის **A ამპლიტუდა** ტალღურ მოძრაობაში მონაწილე ნაწილაკების ნულოვანი ( $y=0$ ) დონიდან **მაქსიმალური გადახრაა** [2];

▪ტალღის ზედა წერტილების ერთობლიობა ქმნის ტალღის თხემებს, ქვედა წერტილების – ღრმულებს;

▪**ორ მეზობელ თხემს (ღრმულს) შორის მანძილს  $\lambda$  ტალღის სიგრძე** ეწოდება;

▪**ტალღის სიგრძის** ტოლ მანძილზე ტალღა **პერიოდის (T)** განმავლობაში ვრცელდება;

▪ე.ი., ტალღის სიჩქარე  $V = \lambda/T = \lambda\nu$  (2.1);



▪ტალღის გრაფიკი [2] ასახავს დროის t მომენტში გარემოს ნაწილაკების **y გადახრის** დამოკიდებულებას რხევის წყაროდან **x მანძილზე**;

▪წყაროს **რხევის სიხშირე** განსაზღვრავს {ცალსახად} ტალღის **სიხშირეს**;

▪ტალღის გავრცელების სიჩქარე კი დამოკიდებულია გარემოს **მექანიკურ** თვისებებზე. ამიტომ, ერთი სიხშირის ტალღებს **განსხვავებული ტალღის სიგრძე** აქვთ სხვადასხვა გარემოში;

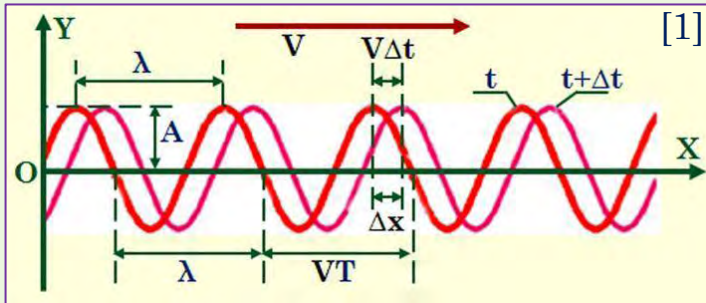
▪ორი გარემოს გამყოფ საზღვრზე მექანიკური ტალღის **დაცემისას** შეიძლება მოხდეს:

•**არეკვლა** {ნაწილობრივ ან მთლიანად};

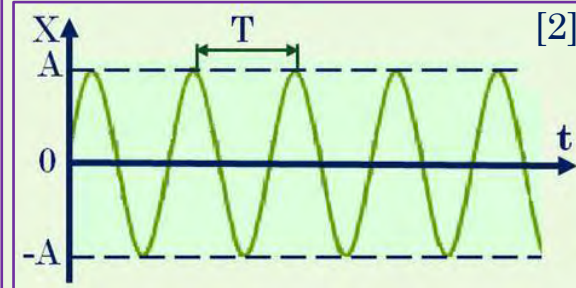
•**შთანთქმა**;

•**გარდატეხა**;

### 3. ტალღის განტოლება და ენერგია



▪ ჰარმონიული ტალღის [1] და ჰარმონიული რხევის [2] გრაფიკებიდან ჩანს, რომ პროცესების **პერიოდულობას** სხვადასხვა პარამეტრები განსაზღვრავენ: [1] -  $\lambda$  ტალღის სიგრძე და [2] -  $T$  პერიოდი;



- [1] ასახავს რხევის წყაროდან სხვადასხვა  $x$  მანძილით დაშორებულ წერტილთა  $Y(x,t)$  გადახრას დროის 2 მომენტში:  $t$  და  $t+\Delta t$ ;
- რაც უფრო დიდია  $x$  (დაშორება რხევის წყაროდან) და ნაკლებია ტალღის გავრცელების (ფაზური)  $V$  სიჩქარე, მით უფრო **გვიან**  $\{t_x = x/V$  (3.1) მომენტში} ჩაებმება ეს წერტილი რხევაში და მით უფრო **ნაკლები** იქნება მისი რხევის **დრო** ( $t-t_x$ );

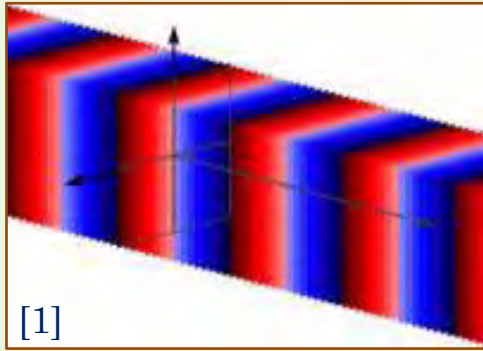
$$\bullet Y = A \cos \omega(t - t_x) \quad (3.2) \quad \{t_x = x/V \text{ (3.1)} \Rightarrow (3.2)\} \rightarrow$$

$$Y = A \cos \{\omega(t - x/V)\} = A \cos \{\omega t - (\omega/V)x\} \quad (3.3)$$

▪ (3.3) ტალღის განტოლებაა და ის განსაზღვრავს დროის ნებისმიერი  $t$  მომენტისთვის,  $X$  ღერძზე განლაგებული ნებისმიერი  $x$  წერტილის გადახრას;

▪ ტალღების განხილვა მარტივდება  $k$  ტალღური რიცხვის გამოყენებით:  $\omega/V = 2\pi/TV = 2\pi/\lambda = k$  (3.4) ანუ,  $k \equiv$  ტალღათა რაოდენობა  $2\pi$  სიგრძეში;





[1]

•(3.4) => (3.3) ➔

• $Y = A \cos(\omega t - kx)$  (3.5)

ბრტყელი [1] ტალღის განტოლებაა;

• $Y = A \cos(\omega t - kr)$  (3.6)

სფერული [2] ტალღის განტოლებაა;



[2]

✓ ტალღის მიერ გადატანილი **E ენერგია** წარმოადგენს მერხვევი ნაწილაკების **კინეტიკური ენერგიის** და {დრეკად გარემოში} დრეკადად დეფორმირებული გარემოს **პოტენციური ენერგიის** ჯამს;

▪ ტალღის მახასიათებლად გამოიყენება ენერგიის სიმკვრივე და ინტენსივობა:

• ენერგიის სიმკვრივის **მყისი** მნიშვნელობა

$\xi = E/\nu = \rho A^2 \omega^2 \sin^2(\omega t - kx)$  (3.7) { $\rho$  - გარემოს სიმკვრივეა  
 $\nu$  - მოცულობა}

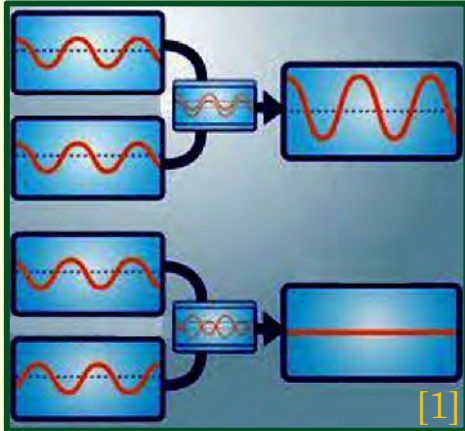
▪ ენერგიის სიმკვრივის **საშუალო** მნიშვნელობა

$\xi_a = (1/2)\rho A^2 \omega^2$  (3.8)  $\leftarrow \{ \sin^2(\omega t - kx) \}_a = 1/2$

▪ ტალღის **ინტენსივობა I** {ტალღის გავრცელების მიმართულების მართობ ფართის ერთეულში, 1 წმ-ში გასული ენერგია}

$I = \xi_a V = (1/2)\rho V A^2 \omega^2$  (3.9)

## 4. ტალღების ინტერფერენცია. მდგარი ტალღები



- სხვადასხვა ტალღები ერთმანეთისგან **დამოუკიდებლად** ვრცელდებიან (არ ურთიერთქმედებენ);
- მაგრამ მათ გააჩნიათ **ურთიერთგამლიერების** ან **შესუსტების** (სრულ "ჩაქრობამდეც" კი) უნარი [1];
- რამდენიმე ტალღის ზემოქმედებისას, გარემოს რომელიმე წერტილის გადახრა წონასწორული მდგომარეობიდან ცალკეული ტალღით განპირობებულ გადახრათა **ვექტორული ჯამის** ტოლია;
- ტალღების ზედდებისას მათი ურთიერთგამლიერებისა და შესუსტების მოვლენას ტალღების **ინტერფერენცია** ეწოდება;

- $O_1$  და  $O_2$  წერტილებიდან [2] ვრცელდება **ერთი სიხშირის** ტალღები

$$Y_1 = A_1 \cos(\omega t - kx_1) \quad (4.1)$$

$$Y_2 = A_2 \cos(\omega t - kx_2) \quad (4.2)$$

- $C$  წერტილში ამ ტალღების ზედდების შედეგი დამოკიდებულია  **$\delta\phi$**  ფაზათა სხვაობაზე:

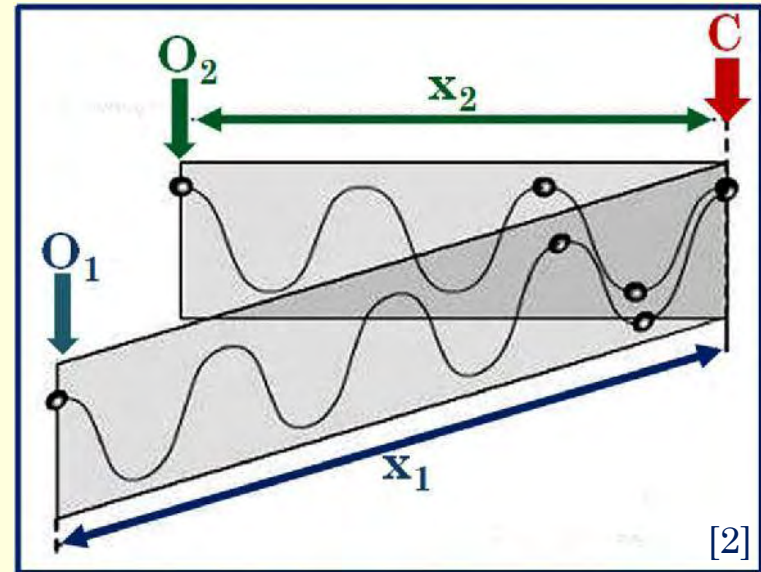
$$\delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = kx_2 - kx_1 = k(x_2 - x_1) = k\Delta \quad (4.3)$$

- {  $\Delta$  - ტალღების სვლათა სხვაობა:  $\Delta = x_2 - x_1$  (4.4) }

- მოხდება **გამლიერება** თუ  $\delta\phi = (2\pi/\lambda)\Delta = 2n\pi$  ანუ,

$$\text{თუ } \Delta = n\lambda = 2n\lambda/2 \quad (4.5) \quad \{n = 1, 2, 3, \dots\}$$

- მოხდება **შესუსტება**, თუ  $\Delta = (2n+1)\lambda/2$  (4.6)



- ✓ ტალღები **ამლიერებენ** ერთმანეთს სივრცის იმ წერტილებში, სადაც სვლათა სხვაობა ტალღის სიგრძის ნახევრის **ლუწი რიცხვის** ტოლია და **ასუსტებენ** - სადაც სვლათა სხვაობა ტალღის სიგრძის ნახევრის **კენტრიცხვის** ტოლია ;

✓ მდგრადი ინტერფერენციული სურათის მისაღებად ტალღები კოჰერენტული უნდა იყვნენ, ანუ:

1. სიხშირე უნდა იყოს ტოლი  $\{\omega_1 = \omega_2\}$ ;
2. ფაზათა სხვაობა - მუდმივი  $\{\Delta\varphi = \text{const}\}$ ;
3. რხევები ერთ სიბრტყეში უნდა ხდებოდეს;

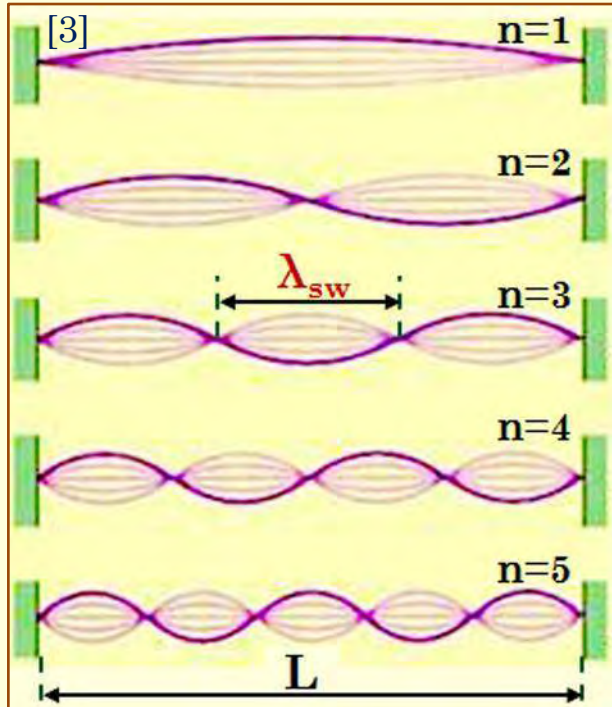
▪ კოჰერენტულობას მხოლოდ მონოქრომატული ტალღები უზრუნველყოფენ;

• მონოქრომატული - ანუ, ერთი კონკრეტული და მკაცრად მუდმივი სიხშირის ტალღა;

▪ 2 შემხვედრი {მაგ.: ძირითადი და არეკვლილი}, კოჰერენტული და ტოლი  $A_0$  ამპლიტუდის ტალღის

$Y_1 = A_0 \cos(\omega t + kx)$  და  $Y_2 = A_0 \cos(\omega t - kx)$  ზედდებისას შეიძლება ჩამოყალიბდეს მდგარი ტალღა. მისი განტოლებაა:

$$Y = 2A_0 [\cos kx] [\cos \omega t] \quad (4.7)$$



▪ (4.7)  $\Rightarrow$  მდგარი ტალღის ამპლიტუდა  $A = 2A_0 |\cos kx|$  (4.8) იცვლება  $A=0$  მინიმუმიდან {ტალღის კვანძი  $x_0 = (2n+1)\lambda/4$   $A=2A_0$  მაქსიმუმამდე {ტალღის ბურცობი  $x_m = 2n\lambda/4$  (4.9)}.

• (4.9)-ში  $n=1, 2, \dots$  ასახავს მერხვე სისტემაში (ვთქვათ, სიმში) ბურცობების რაოდენობას და აკავშირებს მოცემული ჰარმონიკის  $\lambda_n$  ტალღის სიგრძეს სიმის L სიგრძესთან

$$\lambda_n = 2L/n \quad (4.10)$$

▪ მანძილი 2 მეზობელ ბურცობს (ან კვანძს) შორის მოცემული მდგარი ტალღის  $\lambda_{sw}$  სიგრძეა და ის მსრბოლი ტალღის სიგრძის ნახევარს შეადგენს  $\lambda_{sw} = \lambda/2$  (4.11);





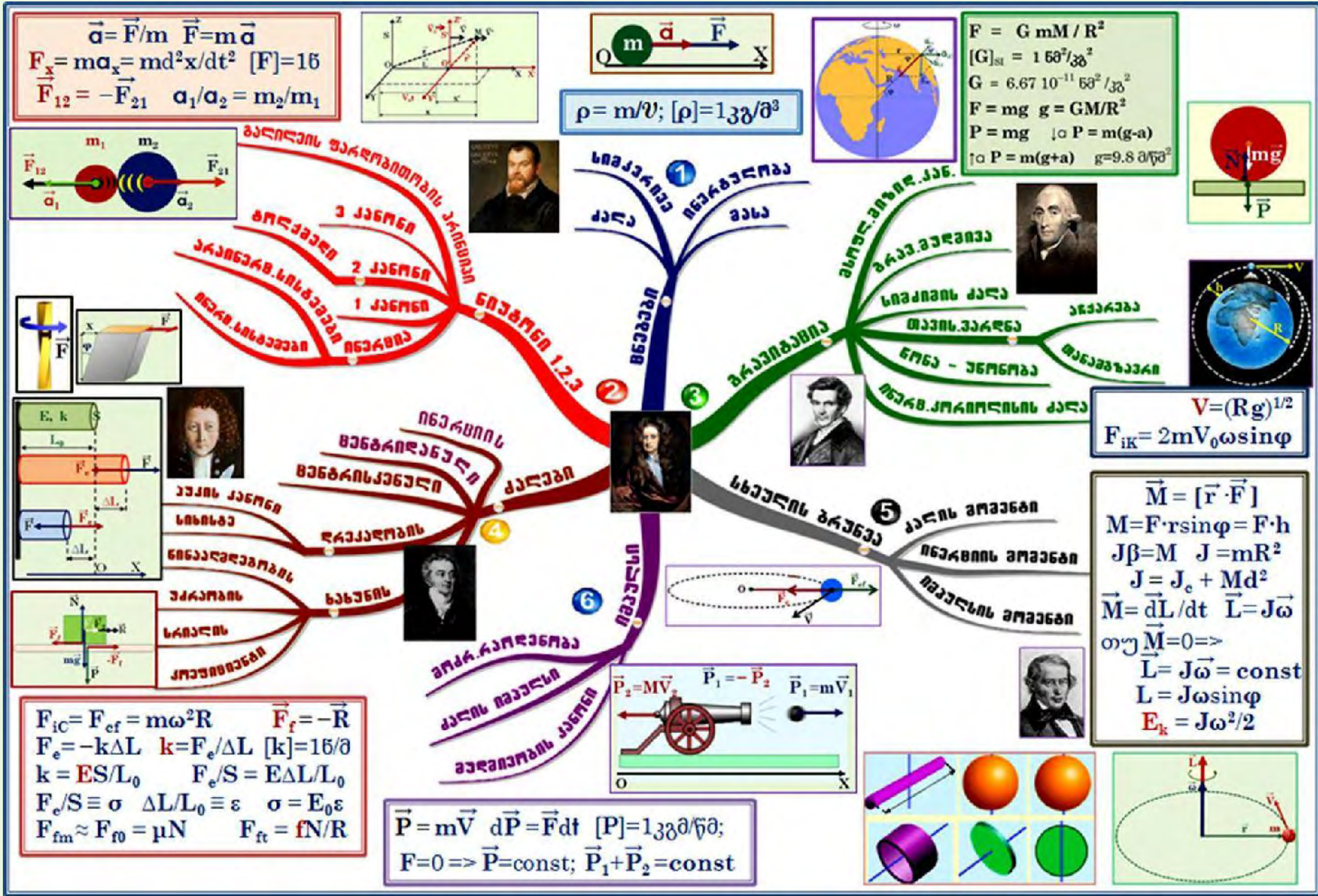
•**მდგარ ტალღაში** სხვადასხვა წერტილს განსხვავებული რხევის **ამპლიტუდა** აქვს {*მსრბოლ ტალღაში ერთნაირი*};  
•**მდგარ ტალღაში** მეზობელ კვანძებს შორის ყველა წერტილი **ერთნაირ ფაზაში** ირხევა {*მსრბოლ ტალღაში სხვადასხვა წერტილი სხვადასხვა ფაზით ირხევა*};

•**მდგარ ტალღას** არც ნივთიერება და არც ენერგია არ გადააქვს, ვინაიდან მდგარი ტალღის შემქმნელ **2 მსბორლ ტალღას** საპირისპირო მიმართულებით მიაქვს **ტოლი ენერგია**;

{*მსრბოლ ტალღას გადააქვს ენერგია*};

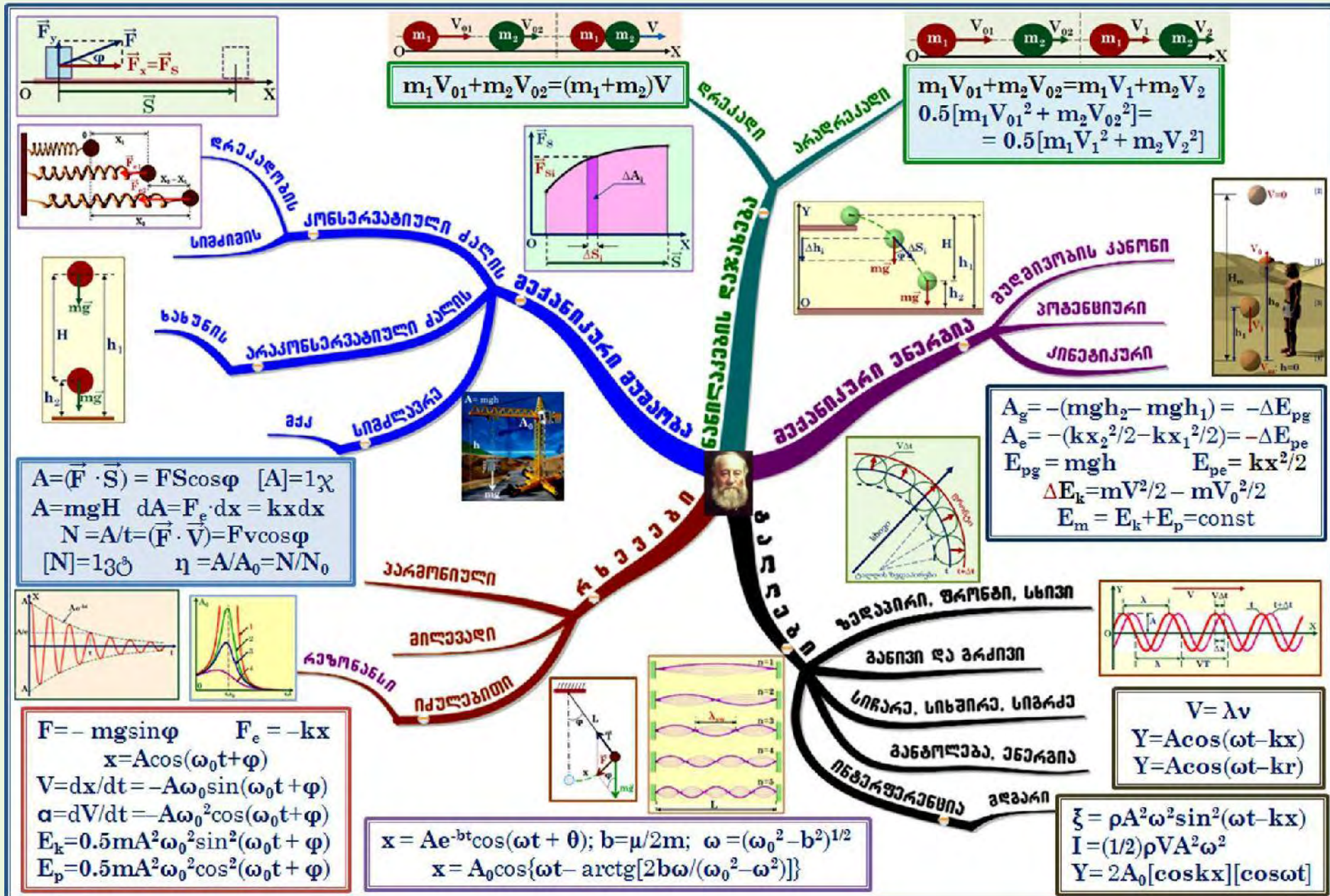


# ფიზიკის Mind Map (მაღეზი)





# დინამიკის Mind Map (მუშაობა და ენერჯია. რხევები)





“ისწავლე ისე, თითქოს მარადიულად უნდა იცხოვრო; იცხოვრე ისე, თითქოს ხვალ მოგიწევს სიკვდილი.” Otto von Bismark



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1815 - 1898

## სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 13

თემა:

სემესტრი I

### სითხისა და აირის მექანიკა

88·

093

1. წნევა. პასკალის კანონი. სითხის წნევა. ატმოსფერული წნევა

096

2. არქიმედეს კანონი. სხეულთა ცურვის პირობები

098

3. იდეალური სითხის სტაციონარული დინება. ბერნულის განტოლება

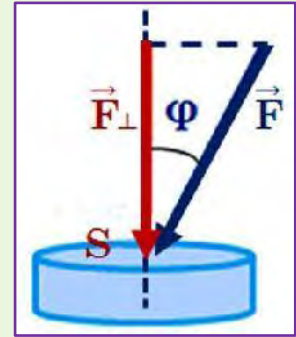


# 1. წნევა. პასკალის კანონი. სითხის წნევა. ატმოსფერული წნევა

✓სხეულზე ძალის ზემოქმედება დამოკიდებულია როგორც  $F$  ძალაზე, ასევე, იმ ზედაპირის  $S$  ფართობზე, რომელზეც ეს ძალა მოქმედებს;

- სიდიდე - **წნევა** ( $P$ ) ითვალისწინებს ორივე ფაქტორის ( $F$ ,  $S$ ) გავლენას;
- წნევა** - ზედაპირისადმი **მართობულად მოქმედი ძალის** სიდიდის შეფარდება ამ ზედაპირის **ფართობთან**

$$P = F_{\perp}/S = (F \cos \varphi)/S \quad (1.1)$$

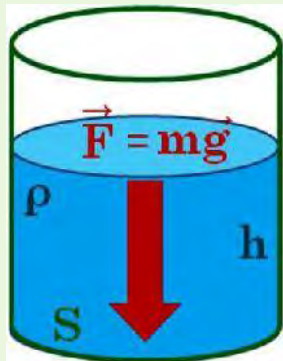


- (1.1) $\Rightarrow [P] = [F]/[S] = 1\text{ნ}/\text{მ}^2 = 1\text{პა}$ . 1 პასკალი არის წნევა, რომელსაც განაპირობებს 1 მ<sup>2</sup> ფართობზე **მართობულად** მოქმედი 1 ნ ძალა;
- წნევის პრაქტიკული ერთეულებია:
  - ვერცხლისწყლის სვეტის მილიმეტრი (ტორი): 1 ვ.სვ.მმ  $\equiv$  1 ტორი  $\approx$  133.3 პა;
  - ატმოსფერო: 1 ატმ = 760 ვ.სვ.მმ =  $1.013 \cdot 10^5$  პა;

✓სითხესა და აირში მიმდინარე პროცესების აღწერა და ახსნა ეფუძნება **პასკალის კანონს**: ზედაპირზე მოქმედი ძალებით გამოწვეული წნევა ერთნაირად გადაეცემა სითხის ან აირის ყველა წერტილს;



B.Pascal  
1623–1662



✓სითხის წონით წარმოებული წნევა:  $h$  სიმაღლის სვეტი აწვება ჭურჭლის ფსკერს  $F = mg$  ძალით და ქმნის  **$P$  ჰიდროსტატიკურ წნევას**

$$P = F/S = mg/S = \rho Vg/S = \rho gSh/S = \rho gh \quad (1.2)$$

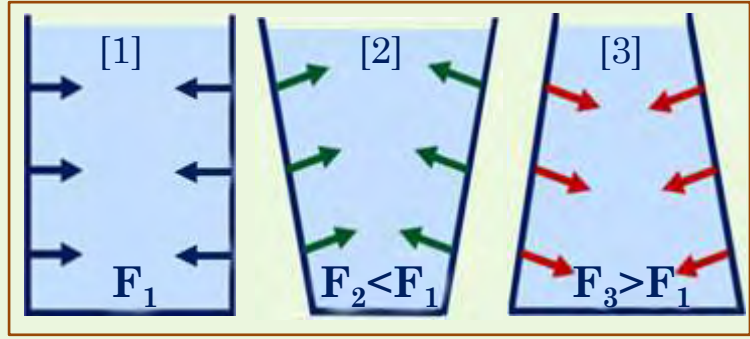
•**წნევა** ჭურჭლის ფსკერზე განისაზღვრება **სითხის სიმკვრივით** და **მისი სვეტის სიმაღლით**;



•(1.2)-ს შესაბამისად, ზედაპირიდან ნებისმიერ  $h_i$  სიღრმეზე სითხე ჭურჭლის კედლებზე მოქმედებს  $P=\rho gh_i$  წნევით;

•ჭურჭლის ფორმა და ფუძის ფართობი არ ახდენს გავლენას ჰიდროსტატიკურ წნევაზე;

✓**ჰიდროსტატიკური პარადოქსი** - ფსკერზე სითხის  $F$  წნევის ძალა ყოველთვის არაა სითხის  $mg$  სიმძიმის ძალის ტოლი:  
 [1] სტანდარტული მდგომარეობა  $F=mg$ ;  
 [2]  $F < mg$  {ვინაიდან ჭურჭლის კედლების ჯამური რეაქციის ძალა მიმართულია **ზევით**};  
 [3]  $F > mg$  {ვინაიდან ჭურჭლის კედლების ჯამური რეაქციის ძალა მიმართულია **ქვევით**};



▪მზის სისტემის პრაქტიკულად ყველა პლანეტა გარშემორტყმულია აირთა გარკვეული ნარევის გარსით. მიზიდულობის გამო პლანეტა და მისი გარსი ერთობლივად მონაწილეობენ ბრუნვით მოძრაობაში;  
 ▪ყველა პლანეტის ასეთ გარსს “**ატმოსფეროს**” უწოდებენ, თუმცა მხოლოდ დედამიწის ატმოსფერო – **ჰაერი** უზრუნველყოფს სიცოცხლის შესაძლებლობას თავის “ფსკერზე”;  
 ▪ჰაერის შემადგენლობა: აზოტი 78.1%, ჟანგბადი 21%, არგონი 0.9% {უმცირესი რაოდენობით – წყალბადი, ნეონი, ჰელიუმი, მეთანი, კრიპტონი, წყლის ორთქლი, ნახშირბადის დიოქსიდი};  
 ▪100კმ სიმაღლის ფენის მთელი მასის **50%** მოდის **ქვედა 5 კმ-ზე**, **99%** კი თავმოყრილია **30 კმ-ის** ფარგლებში;

✓**ატმოსფერო** აწვება დედამიწას სიმძიმის ძალით და აწარმოებს **ატმოსფერულ წნევას**, რომელიც პასკალის კანონის თანახმად ყველა მიმართულეობით გადაეცემა;

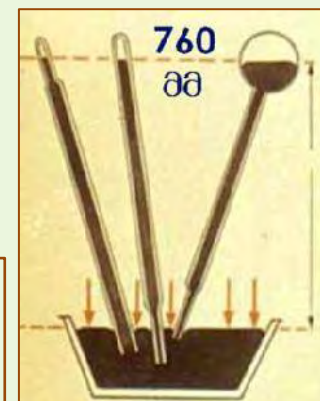


E.Torricelli  
1608–1647

▪ ტორიჩელიმ ერთი მხრიდან დახშული, 1 მ სიგრძის ვერცხლისწყლით სავსე მილი გადმოაპირქვა ვერცხლისწყლიან ჯამში. დონემ მილში **დაიწია** და ჯამში მისი დონიდან **760 მმ** სიმაღლეზე გაჩერდა. (მილის ზედა ნაწილში დარჩა “ტორიჩელის სივარცელი”);

▪ მილში **760 მმ** სიმაღლის ვერცხლისწყლის სვეტის არსებობას ვერცხლისწყლის ღია ზედაპირზე **ატმოსფერული წნევის მოქმედება** განაპირობებს. ამ სიმაღლის ვერცხლისწყლის სვეტით წარმოებული წნევა მიჩნეულია **ნორმალურ ატმოსფერულ წნევად**:

$$1 \text{ ატმ} = 760 \text{ ვ.სვ.მმ} = 1.013 \cdot 10^5 \text{ პა}$$



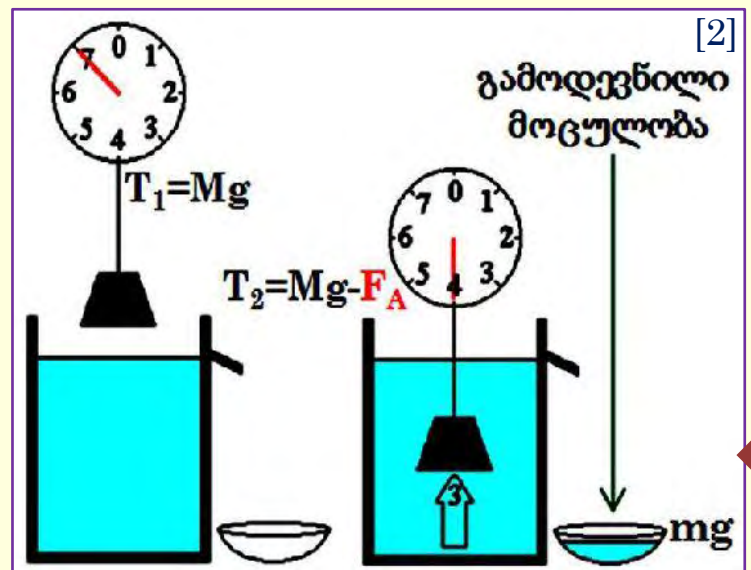
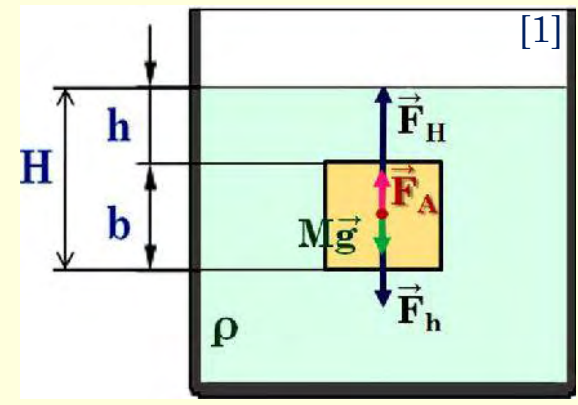
## 2. არქიმედეს კანონი. სხეულთა ცურვის პირობები



არქიმედე  
(287–212)

✓ წნევის სიდიდის სითხის (აირის) სიღრმეზე დამოკიდებულება განაპირობებს სითხეში (აირში) მოთავსებულ სხეულზე ამომგდები {არქიმედეს} ძალის მოქმედებას;

- სხეულის [1] ქვედა წახნაგზე {H სიღრმე} მოქმედებს ზევით მიმართული  $F_H$  ძალა;
  - ზედა წახნაგზე {h სიღრმე} მოქმედებს ქვევით მიმართული  $F_h$  ძალა;
  - ცხადია,  $F_H > F_h$ , ე.ი. მათი ტოლქმედი  $F_A$  არქიმედეს (ამომგდები) ძალა მიმართულია ზევით:
- $$F_A = F_H - F_h \quad (1.1)$$
- $$F_H = P_H S = \rho g H S \quad (1.2) \quad F_h = P_h S = \rho g h S \quad (1.3)$$



▪  $F_A = F_H - F_h = \rho g(H - h)S = \rho g b S = \rho V g \quad (1.4)$   
 სითხეში (აირში) ჩაშვებულ სხეულზე მოქმედებს ვერტიკალურად ზევით მიმართული ძალა. ის ამ სხეულის მიერ გამოდევნილი სითხის (აირის) სიმძიმის ძალის ტოლია;

▪ სხეულის Mg და გამოდევნილი [2] სითხის  $mg = F_A$  სიმძიმის ძალთა თანაფარდობა (ანუ, სხეულის  $\rho_b$  და სითხის  $\rho$  სიმკვრივეთა თანაფარდობა) განსაზღვრავს სხეულის მდგომარეობას სითხეში (აირში);

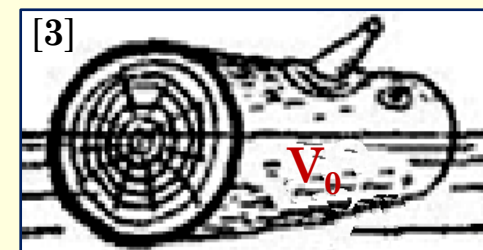


[1] სხეული **დევს** ფსკერზე  
 {აქ - “ტიტანიკის” ფინჯანი}  
 ე.ი.  $Mg > F_A$ ,  $\rho_b Vg > \rho Vg$   
 $\rho_b > \rho$  (1.5)

•სხეული იძირება, თუ მისი  
 სიმკვრივე **მეტია** სითხის  
 სიმკვრივეზე;



[2] სხეული **შეწონილია**  
 (არც ადის, არც ჩადის)  
 {აქ - ისტორიულად I საჰა-  
 ერო ბურთის კატასტროფა}  
 ე.ი.  $Mg = F_A$ ,  
 $\rho_b Vg = \rho Vg$   
 $\rho_b = \rho$  (1.6)  
 სხეულის სიმძიმის ძალა  
**გაწონასწორებულია**  
 ამომგდები ძალით;



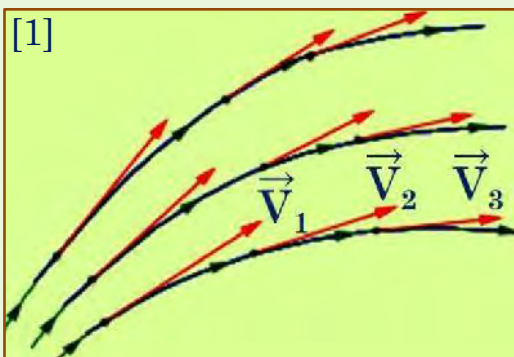
[3] მორი ნაწილობრივად  
 ჩაძირული და ტივტივებს  
 სითხის ზედაპირზე  
 $\rho_b < \rho$  (1.7)  
 თავიდან  $F_A > Mg$ , სხეული  
**ამოტივტივდება** და  
 მისი ისეთი  $V_0$  მოცულობა  
**დარჩება** სითხეში, რომ  
 $\rho_b Vg = \rho V_0g \Rightarrow \rho_b V = \rho V_0$



### 3. იდეალური სითხის სტაციონარული დინება. ბერნულის განტოლება

✓ სითხის მოძრაობას (დინებას), მის **ნაკადს** სწავლობს ჰიდროდინამიკა. თანაც, ძირითადად, ეყრდნობა სითხის იდეალიზირებულ მოდელს;

▪ **სითხე იდეალურია**, თუ ის არ იკუმშება და მის ფენებს შორის ადგილი არა აქვს ხახუნს;



▪ დინების ვიზუალიზაცია [1] ხდება “**დენის წირებით**“, რომელთა ყოველ წერტილში გავლებულ მხებს აქვს ამ წერტილში **სიჩქარის ვექტორის** მიმართულება;

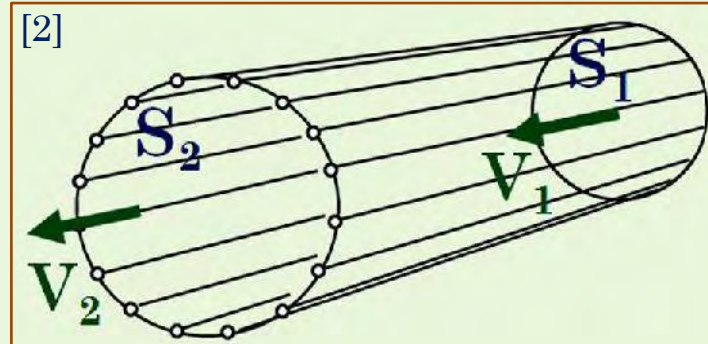
▪ დინება დამყარებული - **სტაციონარულია**, თუ სითხის ნებისმიერ წერტილში ნაწილაკების სიჩქარე **მუდმივია** დროის მიხედვით;

▪ სითხეში გამოყოფილი ნებისმიერი შეკრული კონტურის **დენის წირების ერთობლიობა** [2] შემოსაზღვრავს სითხის გარკვეულ ნაწილს - “**დენის მილს**”;

▪ კვეთის ფართობის და ნაკადის სიჩქარის ნამრავლი  **$S \cdot V = \text{const}$** , ანუ დროის ერთეულში განიკვეთში გასული **სითხის რაოდენობა მუდმივია**:

$$S_1 V_1 = S_2 V_2 \quad (3.1) \Rightarrow V_1 / V_2 = S_2 / S_1 \quad (3.2)$$

(3.1) სითხის ჭავლის **უწყვეტობის** განტოლებაა;

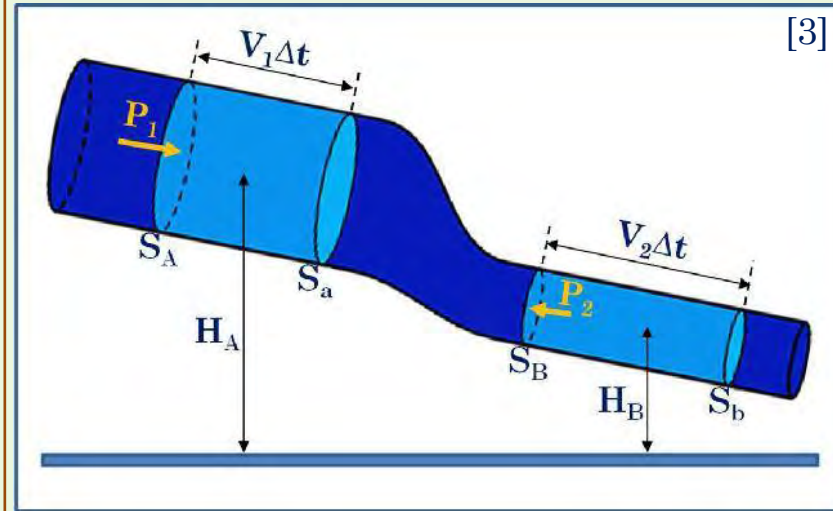




D. Bernoulli  
1700–1782

✓ ბერნულიმ გამოავლინა და რაოდენობრივად დაადგინა **ბერნულის განტოლება** კავშირი ნაკადში წნევასა და სიჩქარეს შორის. მოხერხდა კავშირის ენერგეტიკული ინტერპრეტაციაც;

- განიხილება სტაციონარული დინება **განსხვავებული** კვეთის  $\{S_A, S_B\}$  და სიმაღლის  $\{H_A, H_B\}$  მილში [3];
- $S_A$  კვეთზე მის მარცხნივ არსებული სითხე მოქმედებს  $P_1$  წნევით,  $P_2$  წნევა მოქმედებს მარჯვნიდან  $S_B$ -ზე;



▪  $P_1, P_2$  წნევებთან დაკავშირებული წნევის ძალების გავლენით  $S_A, S_B$  კვეთებს შორის არსებული სითხე გადაადგილდება და  $\Delta t$  დროში აღმოჩნდება  $S_a, S_b$  საზღვრებში. გადანაცვლებული სითხის მოცულობა  $\Delta \mathcal{V}$  (ანუ, მასა  $\Delta m = \rho \Delta \mathcal{V}$ ) იქნება:

$$\Delta \mathcal{V} = S_A \cdot L_1 = S_A \cdot V_1 \Delta t \quad (3.3)$$

ასევე, სითხის ჭავლის უწყვეტობის გათვალისწინებით

$$\Delta \mathcal{V} = S_B \cdot L_2 = S_B \cdot V_2 \Delta t \quad (3.4)$$

▪  $\Delta m$  მასის სიჩქარის და სიმაღლის (კინეტიკური და პოტენციური ენერგიების) ცვლილება განსაზღვრავს **სრული მექანიკური ენერგიის ცვლილებას**

$$\Delta E = 0.5 \Delta m V_2^2 + \Delta m g H_B - 0.5 \Delta m V_1^2 - \Delta m g H_A \quad (3.5)$$

• ენერგიის ეს ცვლილება უკავშირდება **წნევის ძალების მუშაობას**  $\Delta E = \Delta A$  (3.6)

$$\Delta A = \Delta A_1 + \Delta A_2 = P_1 S_A V_1 \Delta t + (-P_2 S_B V_2 \Delta t) = (P_1 \Delta \mathcal{V}) + (-P_2 \Delta \mathcal{V}) \quad (3.7)$$

▪{(3.5),(3.7)} =>(3.6)  $0.5\Delta m_2 V_2^2 + \Delta m_2 g H_B - 0.5\Delta m_1 V_1^2 - \Delta m_1 g H_A = P_1 \Delta \mathcal{V} - P_2 \Delta \mathcal{V}$  (3.8)

(3.8) გავყოთ  $\{-\Delta \mathcal{V}\}$  →

$$0.5\rho V_1^2 + \rho g H_A + P_1 = 0.5\rho V_2^2 + \rho g H_B + P_2 \quad (3.9) \rightarrow$$

$$0.5\rho V^2 + \rho g H + P = \text{const} \quad (3.10)$$

▪(3.10) - ბერნულის განტოლება - ენერგიის მუდმივობის კანონი მოძრავი სითხისთვის;

▪(3.10)-ს თითოეულ წევრს {ტერმინოლოგიურად} აიგივებენ გარკვეულ **წნევასთან**:

• $\rho g H$  ჰიდრავლიკური;  $0.5\rho V^2$  დინამიკური;  $P$  სტატიკური;

▪ბერნულის განტოლების მნიშვნელოვანი შედეგი:

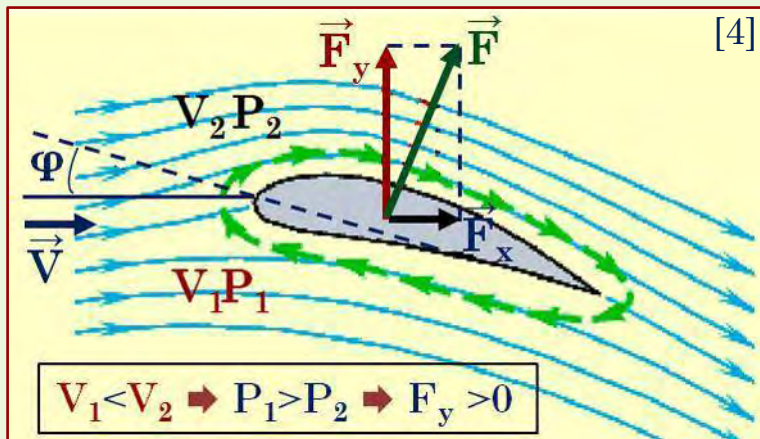
თუ სიმაღლე ფიქსირებულია  $H_A = H_B$ , მაშინ (3.10) →

$$0.5\rho V^2 + P = \text{const} \text{ ანუ:}$$

მეტ სიჩქარეს **ნაკლები წნევა** შეესაბამება და პირიქით,

**ნაკლებ სიჩქარეს მეტი წნევა**;

•ამ დებულებას ეფუძნება ფრთის ამწევი ძალა [4];





“აწმყო - ერთადერთია, რასაც დასასრული არა აქვს.” Erwin Schrödinger

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1887 - 1961



## სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 14

თემა:

სემესტრი I

### სითხისა და აირის მექანიკა

გვ.

102

1.რეალური სითხის დინება. სიბლანტე

104

2.სითხის ლამინარული და ტურბულენტური დინება. რეინოლდსის რიცხვი

105

3.სხეულების მოძრაობა რეალურ სითხეში



# 1. რეალური სითხის დინება. სიბლანტე

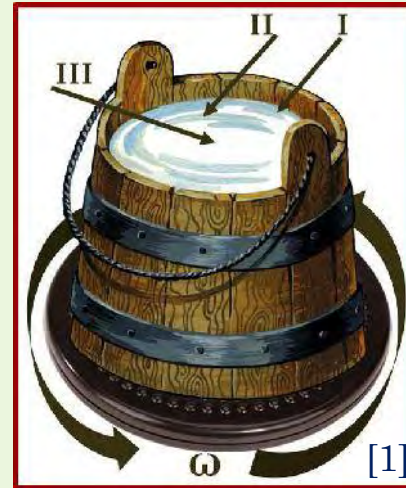
✓ რეალური სითხის იდეალურისგან ძირითადი განმასხვავებელი ნიშანი რეალური სითხის ფენებს შორის შინაგანი ხახუნის (სიბლანტის) არსებობაა.

• კუმშვადობა ძალიან მცირეა და ითვლება, რომ რეალური სითხეც პრაქტიკულად არ იკუმშება;

▪ სიბლანტე არის გარემოს ფენების ხახუნი, ამ ფენების ერთმანეთის მიმართ მოძრაობისას;

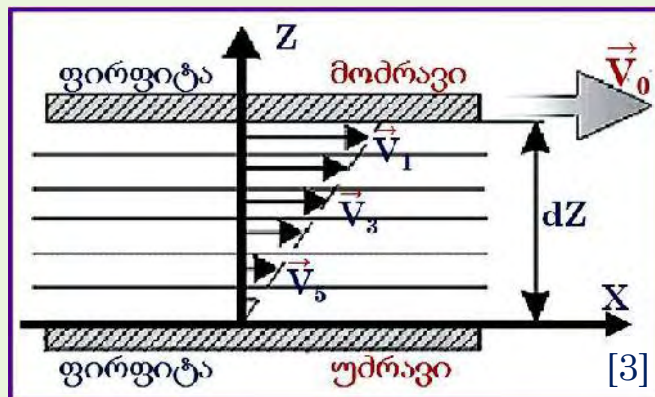
▪ სიბლანტეს განაპირობებს:

- სითხეში - კოჰეზია {მოლეკულებს შორის მიზიდვა};
- აირში - მოლეკულების დაჯახება;



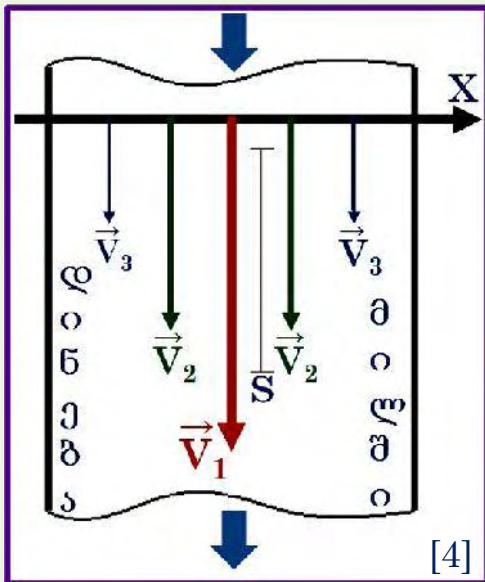
▪ სითხის ფენიდან ფენაზე მოძრაობის გადაცემას ხახუნის მხები ძალების არსებობა განაპირობებს:

- [1] შინაგანი ხახუნის - სითხის ფენებს შორის ხახუნი {სიბლანტე};
- [2] გარეშე ხახუნის - ჭურჭლის კედელსა და სითხეს შორის ხახუნი;
- ამ ძალების გავლენით, მცირე დროში სითხის ყველა ფენა იქნება ჩართული ბრუნვით მოძრაობაში, ტოლი კუთხური სიჩქარით {მყარი სხეულის მსგავსად};



▪ [3] ასახავს მოძრავი ფირფიტის ზეგავლენით მის ქვემოთ არსებული სითხის სიჩქარის განაწილებას ფენების მიხედვით (ქვედა ფირფიტა უძრავია);

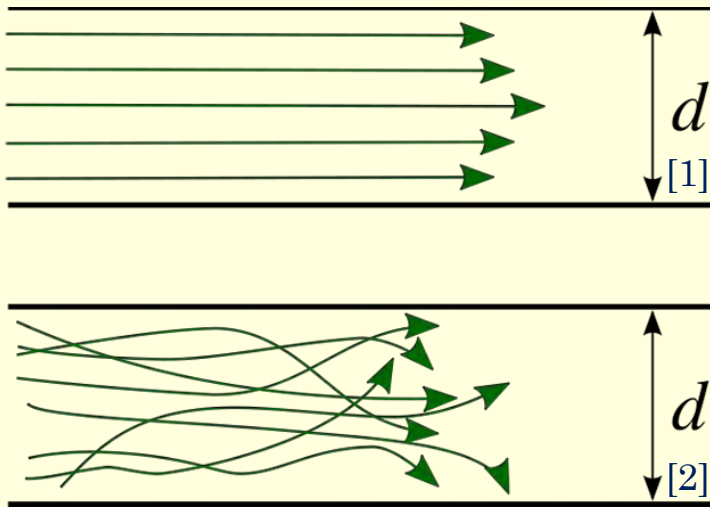
• სიჩქარის მკვეთრად გამოხატული  $dV/dz$  გრადიენტის არსებობას სითხის სიბლანტე განსაზღვრავს, რომლის რაოდენობრივი მახასიათებელია სიბლანტის კოეფიციენტი  $\eta$ ;



•სიბლანტეს და მილის კედელთან ადჰეზიას (სითხის და მილის მოლეკულებს შორის მიზიდვას) უკავშირდება სიჩქარის მართობული  $dV/dx$  გრადიენტის არსებობა მილში სითხის დინებისას [4];

- მოქმედი შინაგანი ხახუნის ძალის სიდიდე განისაზღვრება ნიუტონის ფორმულით:
  - [3]  $F = \eta S dV/dZ$  (1.1)
  - [4]  $F = \eta S dV/dX$  (1.2)
- ამრიგად, სიჩქარის გრადიენტის და სიბლანტის კოეფიციენტის გარდა, ხახუნის ძალის სიდიდეზე ზეგავლენას ახდენს ფენების შეხების ფართობი S;
- {(1.1),(1.2)}  $\eta$ -ს ერთეული იქნება  $[\eta] = [F]/[S] \cdot [dV/dX] = \text{ნ} / \text{მ}^2 \cdot \text{წმ} = \text{პა} \cdot \text{წმ}$ ;

## 2.სითხის ლამინარული და ტურბულენტური დინება. რეინოლდსის რიცხვი



✓ ანსხვავებენ სითხის **ლამინარულ** [1] და **ტურბულენტურ** [2] დინებას;

▪ **ლამინარული** {ფენობრივი} - სითხის ფენები ერთმანეთის მიმართ მისრიალებენ. არ ხდება ფენებს შორის ნაწილაკების გაცვლა {გადასვლა} [1];

▪ **სტაციონალური** დინება **ლამინარულია**. მისი შენარჩუნება მხოლოდ დაბალი სიჩქარეებისას არის შესაძლებელი;

▪ **ტურბულენტური** - სითხის დინება **მოუწესრიგებელია**. ვლინდება: ფენების შერევა, გრიგალების წარმოქმნა, სიჩქარის უწესრიგო ცვლილება [2];

▪ **ლამინარული** დინება  $V_c$  **კრიტიკული** მნიშვნელობის სიჩქარის მიღწევისას ხდება **ტურბულენტური**;

✓ ტურბულენტურობის აღძვრის შესაძლებლობის შეფასება ეფუძნება **Re რეინოლდსის რიცხვის**

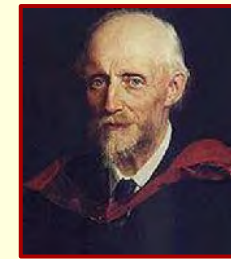
$$Re = \rho V_a d / \eta \quad (2.1)$$

კონკრეტულ მნიშვნელობას  $\{V_a$  - სითხის საშუალო სიჩქარე მილში,  $\rho$  - სითხის სიმკვრივე,  $d$  - მილის დიამეტრი};

•  $Re < Re_c$  - დინება **ლამინარულია**;

•  $Re > Re_c$  - დინება **ტურბულენტურია**;

•  $Re_c$  - რეინოლდსის რიცხვის **კრიტიკული** სიდიდე  $\approx 2000$ ;



O.Reynolds  
1842 - 1912

### 3.სხეულების მოძრაობა რეალურ სითხეში

✓სითხეში {აირში} მოძრავ სხეულზე მოქმედებს **შუბლა წინააღმდეგობის ძალა**. ის შინაგანი ხახუნის ძალების და, ასევე, შესაძლო **ტურბულენტურობის** მოქმედების გამოვლენაა;

▪**შუბლა წინააღმდეგობის ძალის** ორი მდგენელი:

1.**მხები** {ტანგენციალური} ძალა - მიმართულია სხეულის ზედაპირის გასწვრივ;

2.**წნევის** {ნორმალური} ძალა - მიმართულია სხეულის ზედაპირის მართობულად;

▪სითხეში {აირში} სხეულის მოძრაობაში გასარკვევად გამოიყენება კიდევ ერთი {ფორმალურად (2.1)-ს ანალოგიური, მაგრამ შინაარსობრივად განსხვავებული, ვინაიდან არ არის მილთან დაკავშირებული} **Re\*** რეინოლდსის რიცხვი

$$Re^* = \rho VL / \eta \quad (3.1)$$

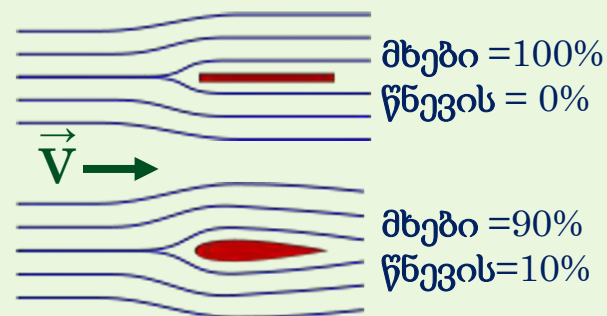
{L - სხეულის მახასიათებელი სიგრძეა};



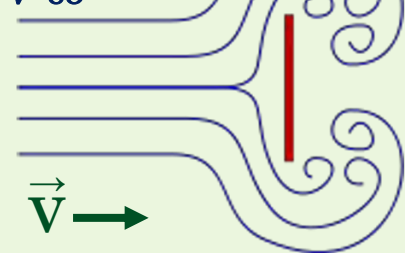
G. Stokes  
1819-1903

▪მცირე რეინოლდსის რიცხვისას  $Re^* < 1$ , სხეულის გარსშემომდინარე ნაკადი **ლამინარულია** და მცირე სფერული სხეულისთვის **ბლანტი ხახუნის ძალას** განსაზღვრავს სტოქსის ფორმულა

$$F_f = 6\pi\eta rV \quad (3.2)$$



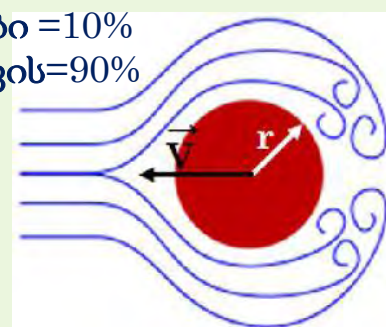
მხები = 0%  
წნევის = 100%



•თუ  $Re^* \gg 1$ , სხეულის უკან ჩნდება **მძლავრი გრიგალები**. ტურბულენტობას ხელს უწყობს სხეულის ზედაპირზე შექმნილი სითხის თხელი ფენა, რომელშიც დიდია სიჩქარის გრადიენტი (0-V). **წნევის წინააღმდეგობის ძალა** დგინდება უკვე ნიუტონის ფორმულით:

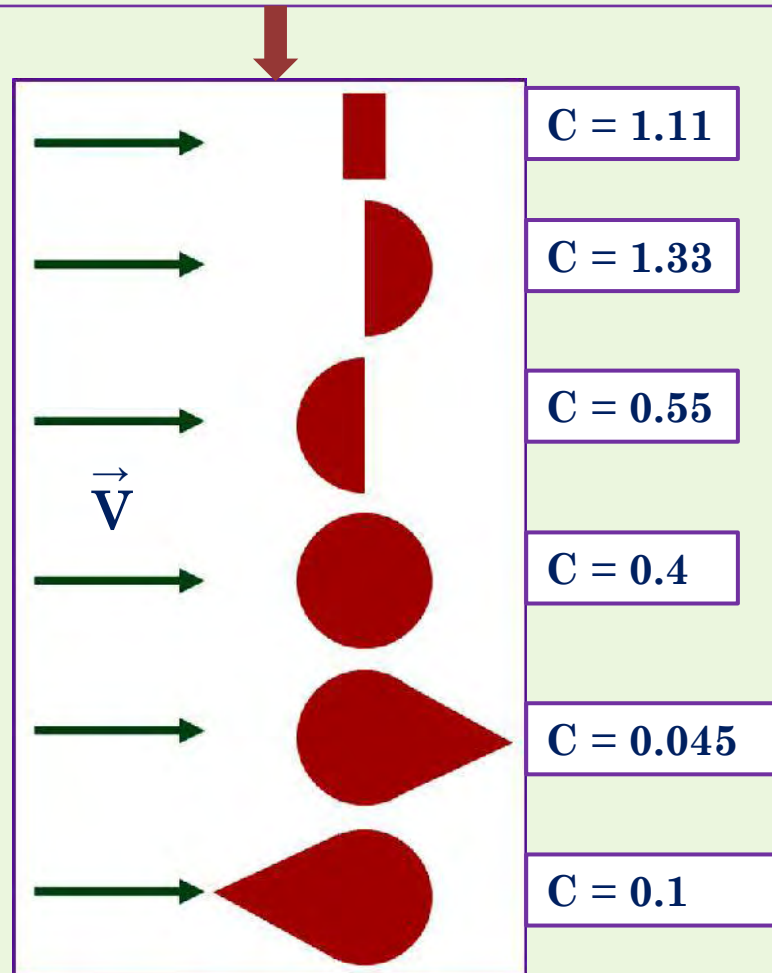
$$F_p = 0.5CV^2S \quad (3.3)$$

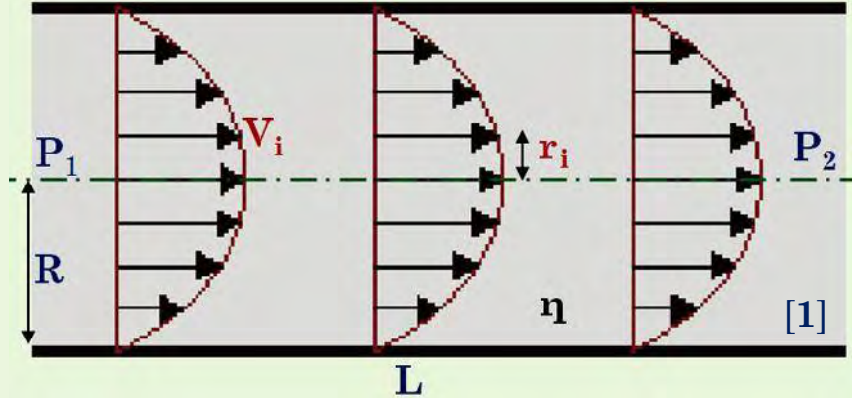
მხები = 10%  
წნევის = 90%





- წნევის წინააღმდეგობის ძალის ნიუტონის (3.3) ფორმულაში:
- $S$  - სხეულის {მოძრაობისადმი მართობი} განივკვეთის ფართობია;
- $C$  – სხეულის ფორმაზე დამოკიდებული შუბლა წინააღმდეგობის კოეფიციენტი;





✓რეალური სითხის სტაციონალური დინება ცილინდრულ მილებში - **პუაზეილის დინება**, სიბლანტის გამო, შესაძლებელია მხოლოდ მილის ბოლოებს შორის [1] **წნევათა სხვაობის** პირობებში  $(P_1 - P_2) > 0$ ;



J. Poiseuille  
1799 – 1869

▪სითხის დინების სიჩქარე მაქსიმალურია მილის **ცენტრში**, კედლებთან კი, ადჰეზიის გამო, **ნულს** უახლოვდება. სიჩქარის გრაფიკი [1,2]

$$dV/dr = - (P_1 - P_2) \cdot r / 2\eta L \quad (3.4)$$

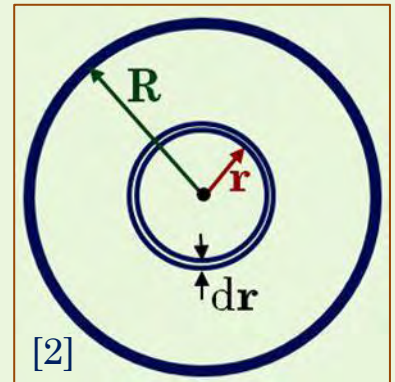
▪სიჩქარეთა ( $V_i$ ) განაწილება მილში {არხის ღერძის მიმართ} ქმნის პარაბოლურ პროფილს [1] - **პუაზეილის პროფილი**

$$V_i = (P_1 - P_2) \cdot (R^2 - r_i^2) / 4\eta L \quad (3.5)$$

▪(3.5) =>  $dV/dt$  განსაზღვრავს **Q** სითხის სრულ ნაკადს, ანუ სითხის **მოცულობით ხარჯს** {ჰააგენ-პუაზეილის კანონი}

$$Q = \pi (P_1 - P_2) \cdot R^4 / 8\eta L \quad (3.6)$$

•(3.6) ძალიან ძლიერი ( $\sim R^4$ ) დამოკიდებულებაა {მაგ.: სისხლძარღვის რადიუსის 2-ჯერ შემცირება გამოიწვევს სისხლის ნაკადის **16**-ჯერ შესუსტებას! (პუაზეილი იყო ექიმი!)}.





“ცხოვრების მიზანია – ცხოვრება მიზნით.” Robert Burns



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1759 - 1796

## სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 15

თემა:

სემესტრი I

### მკთ და თერმოდინამიკა

88·

109

1. მოლეკულურ-კინეტიკურ თეორია - “მკთ” {წინასიტყვაობა}

111

2. თერმოდინამიკა {წინასიტყვაობა}

112

3. ტემპერატურა. ტემპერატურის სკალები. აბსოლუტური ნული

# 1. მოლეკულურ-კინეტიკურ თეორია - “მკთ” {წინასიტყვაობა}

✓ **მკთ** - XIX ს-ში ფორმულირებული თეორია, რომელიც ნივთიერების (ძირითადად, აირების) აგებულებას იხილავს 3 განმსაზღვრელი დებულების საფუძველზე:

1. ყველა სხეული შედგება ძალიან დიდი რაოდენობის უმცირესი სტრუქტურული ელემენტებისგან (*სე* - ატომი, მოლეკულა, იონი);

2. სტრუქტურული ელემენტები განუწყვეტლად ქაოსურად მოძრაობენ;

3. სტრუქტურული ელემენტები ურთიერთქმედებენ მიზიდვა-განზიდვის (ელექტრომაგნიტური ბუნების) ძალებით;

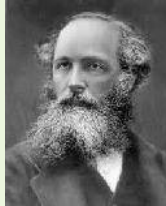
▪ **მკთ**-ს დამამტკიცებელი მოვლენებია: დიფუზია, ბროუნის მოძრაობა, ნივთიერების აგრეგატული მდგომარეობის (აირადი, თხევადი, მყარი) ცვლილება;

▪ თეორიის ფუძემდებლები (კლაუზიუსი, მაქსველი, ბოლცმანი) ეყრდნობოდნენ ნივთიერების (აირის) იდეალიზირებულ მოდელებს, რომლებმაც გამაერთიანებელი სახელწოდება - **იდეალური აირი** - მიიღეს;

✓ **იდეალური აირი** ეწოდება აირს, რომლის ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედება უგულვებელყოფილია (უშუალო, აბსოლუტურად დრეკადი დაჯახების, ან უმცირესი მანძილებისას ურთიერთქმედების გარდა), და ეს ნაწილაკები ნივთიერ წერტილებად განიხილება;



R. Clausius  
1822-1888



J. Maxwell  
1831-1879



L. Boltzmann  
1844-1906

▪ **მოლეკულის ზომა და მასა:**

•  $R = 10^{-10} - 10^{-7}$  მ. განისაზღვრება ატომების რიცხვით (2-100) მოლეკულაში;

•  $m_0 \sim 10^{-27}$  კგ.;

• გამოიყენება  $M_r$  ფარდობითი მოლეკულური მასაც  $M_r = m_0 / (m_C / 12)$ . სადაც  $m_C$  - ნახშირბადის ატომის მასაა;



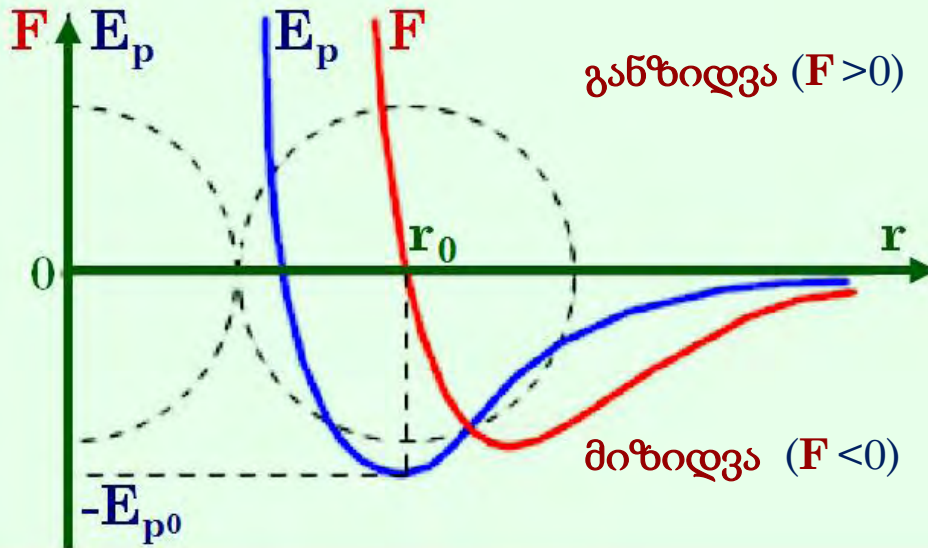
A. Avogadro  
1776-1856

▪  $\nu$  ნივთიერების რაოდენობა - *სე*-ის რიცხვის პროპორციული სიდიდე. ერთეულია 1 **მოლი**, ის შეიცავს იმდენივე *სე*-ს, რამდენიცაა 0.012 კგ მასის ნახშირბადში ( $N_A$  ავოგადროს რიცხვი  $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$  მოლი<sup>-1</sup>);

▪ მოლური მასა  $\mu = N_A m_0$ ,  $[\mu] = 1$  კგ/მოლი

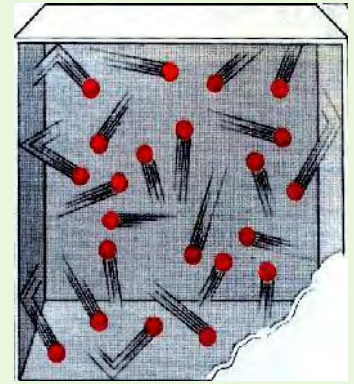


- ✓ *სე* ტემპერატურაზე დამოკიდებულ მუდმივ ქაოსურ (სითბურ) მოძრაობაში იმყოფებიან, ე.ი. გააჩნიათ  $E_k$  კინეტიკური ენერჯია;
- *სე* ურთიერთერთქმედებენ ე.ი. გააჩნიათ  $E_p$  პოტენციური ენერჯია;



- ✓ *სე* ურთიერთერთქმედებენ მიზიდვისა და განზიდვის ძალებით;
- ძალის *სიდიდე* და *მიმართულება* *სე*-ს შორის მანძილზეა დამოკიდებული;
- უახლოესი განლაგებისას ( $r_0$ ) მიზიდვა კომპენსირდება განზიდვით და  $F=0$ ;
- მიზიდვის ძალა ( $r > r_0$ ) ეწინააღმდეგება *სე*-ს ურთიერთ“გაქცევას”, თუმცა ძალიან მცირდება მანძილის ზრდისას ( $r \gg r_0$ )
- განზიდვის ძალის ძალიან სწრაფი ზრდა ( $r \approx r_0$ ) იცავს *სე*-ს ურთიერთ“შეჭრისგან”;

- *სე* სითბური მოძრაობისას ეჯახებიან ჭურჭლის კედლებს და, იმპულსის ცვლილების შედეგად, მოქმედებენ კედლებზე გარკვეული ძალით. ამდენად, აირის (სითხის) წნევას ჭურჭლის კედლებზე განაპირობებს *სე*-ს სითბური მოძრაობა;
- აირის მიერ ჭურჭლის კედელზე წარმოებულ წნევას ადგენს მკთ-ს ძირითადი განტოლება;



## 2. თერმოდინამიკა {წინასიტყვაობა}

✓ **მკთ**, სწავლობს რა ფიზიკურ სისტემაში მიმდინარე პროცესებს, ითვალისწინებს **მრავალნაწილაკინი ანსამბლის** არსებობას, ეყრდნობა ამ ანსამბლის შინაგან მიკროსტრუქტურას;

- ამდენად, **მკთ** ასახავს პრობლემისადმი **სტატისტიკურ** მიდგომას;

✓ **თერმოდინამიკა** ოპერირებს სისტემის მახასიათებელი მაკრო {**თერმოდინამიკური**} პარამეტრებით **P-წნევა**, **V-მოცულობა**, **T-ტემპერატურა** და **ინტერესდება** ენერჯის ცვლილების პროცესებით, რომელთა განხორციელება უკავშირდება **მუშაობის** შესრულებას, ან **სითბოს** გადაცემას;

✓ თერმოდინამიკური სისტემის რამდენიმე ნაირსახეობაა განსაზღვრული:

- **ჩაკეტილი** - სისტემის მასა მუდმივია;
- **ღია** - სისტემის მასა იზრდება {გარედან შემოდინებით}, ან მცირდება {სისტემიდან გადინებით};
- **ჩაკეტილი** სისტემა შეიძლება იყოს **იზოლირებული** - ე.ი. სისტემის ფარგლების გადაკვეთა ენერჯის (არანაირი ფორმით) არ ხდება. წინააღმდეგ შემთხვევაში, სისტემა არაა იზოლირებული;

✓ სისტემის **წონასწორული მდგომარეობა P, V, T** პარამეტრებით განისაზღვრება;

- **A მუშაობა** და **Q სითბო** არ გამოიყენება სისტემის მდგომარეობის აღსაწერად. ეს პარამეტრები განსაზღვრავენ სისტემის მდგომარეობის მხოლოდ **ცვლილებას**;

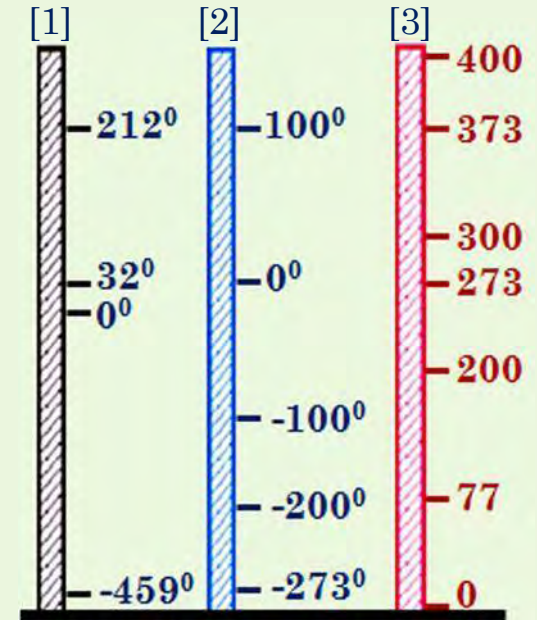
✓ **თერმოდინამიკა** - იკვლევს თერმოდინამიკური წონასწორობის მდგომარეობაში მყოფ მაკროსკოპულ ფიზიკურ სისტემებს და ამ სისტემების ერთი წონასწორული მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლის პროცესებს;

### 3. ტემპერატურა. ტემპერატურის სკალები. აბსოლუტური ნული

✓ **თერმოდინამიკური** სისტემის მახასიათებელ  $P$ ,  $V$ ,  $T$  პარამეტრებს შორის **ტემპერატურა** უმნიშვნელოვანესია, როგორც ღრმა ფიზიკური შინაარსის, ასევე პროცესებზე ზეგავლენის და, განსაკუთრებით, ზღვრული - **აბსოლუტური ნულის** მკაფიო მნიშვნელობის წყალობით;

▪ **ტემპერატურა** - შედარებით ადვილად გასაზომ და ნაწილაკთა კინეტიკურ ენერგიასთან დაკავშირებულ პარამეტრს წარმოადგენს {*temperatura* ლათ. - ნორმალური, წონასწორული მდგომარეობა};

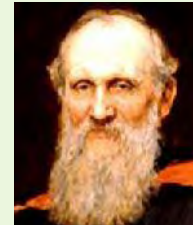
▪ ცხოვრებაში ფართოდ გავრცელებულია [2]-ცელსიუსის  $t$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] სკალა. ამერიკაში 1724 წლიდან გამოიყენება [1]-ფარენჰაიტის  $t$  [ $^{\circ}\text{F}$ ] სკალა. ფიზიკა ძირითადად [3] **აბსოლუტური (კელვინის)  $T$  [ $\text{K}$ ]** ტემპერატურით ოპერირებს;



G. Fahrenheit  
1686-1736



A. Celsius  
1701-1744



W. Thomson  
(1st Baron Kelvin)  
1824-1907

• **ცელსიუსის სკალა:**  
*ყინულის დნობის  $t \Rightarrow 0^{\circ}\text{C}$ ,*  
*წყლის დუღილის  $t \Rightarrow 100^{\circ}\text{C}$ . [ $1^{\circ}\text{C} = (100 - 0) / 100$ ];*

• **ფარენჰაიტის სკალა:**  
*ყინულის დნობის  $t \Rightarrow 32^{\circ}\text{F}$ ,*  
*წყლის დუღილის  $t \Rightarrow 212^{\circ}\text{F}$ . [ $1^{\circ}\text{F} = (212 - 32) / 180$ ].*  
კავშირი:  $t_{\text{C}} = (5/9)(t_{\text{F}} - 32)^{\circ}\text{C}$ ;

• **კელვინის (აბსოლუტური ტემპერატურის) სკალა:**  
**აბსოლუტური ნული  $\Rightarrow 0 \text{ K}$  [ $1 \text{ K} \equiv 1^{\circ}\text{C}$ ],**  
 $T = (t + 273) \text{ K}$ ,  $t_{\text{C}} = (T - 273)^{\circ}\text{C}$ ;

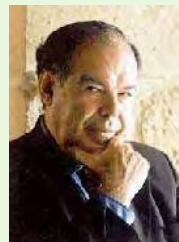
▪ **აბსოლუტური ნული** - ტემპერატურის მინიმალური (ზღვრული) მნიშვნელობა;

▪  $T \Rightarrow 0 \text{ K}$ -ზე **ნულისკენ** მიისრაფვის ნაწილაკთა სითბური მოძრაობის ენერგია {*კლასიკური ფიზიკის შესაბამისად*}. ასევე, - სითბოტევადობა, სითბური გაფართოების კოეფიციენტი ...



## Appendix I. ვისწავლოთ, თუ როგორ უნდა ვისწავლოთ

✓ ჩვენი ტვინი უმძლავრეს “ბიოსუპერკომპიუტერს” წარმოადგენს. უკანასკნელი 40-50 წლის განმავლობაში ჩამოყალიბდა ინოვაციური კონცეფციები საკუთარი აზროვნების შეცნობის, უკეთ გამოყენების და ტვინის მართვის უზრუნველსაყოფადაც;



Prof. Edward de Bono

1933

კრეატიული აზროვნება

Dr. Tony Buzan

1943

მეხსიერება & Mind Map



▪ ტვინი ზოგიერთ ინფორმაციას მაშინვე გამოუყოფს ადგილს მეხსიერებაში, მეორეს - თითქმის ასევე სწრაფად იშორებს (შლის) მეხსიერებიდან, მესამეს კი, ფაქტობრივად, სრულებით უგულებელყოფს;

▪ ტვინი სიამოვნების დიდი მოტრფიალეა. მას სიამოვნებას გვრის არასტანდარტული, არაჩვეულებრივი ინფორმაცია და მას ის უყოყმანოდ აფიქსირებს მეხსიერებაში, ყოველ შემთხვევაში – გარკვეული დროით;

▪ მიუხედავად მეხსიერების ვეებერთელა მოცულობისა და ინფორმაციული ერთეულებისთვის განკუთვნილ ადგილთა { $10^{15}$ } უდიდესი ნაწილის პერმანენტული დაუკავებლობისა, ტვინი თავის მეხსიერებას დიდი მოწიწებით ეპყრობა. ის ყოველგვარი გაფრთხილების გარეშე შლის მეხსიერებაში უკვე შეტანილ, მაგრამ, მისი აზრით, თქვენთვის ყოვლად უმნიშვნელო ინფორმაციას;

✓ არსებობს მექანიზმი, რომელიც კარნახობს ტვინს - რომელია ის ინფორმაცია, რომელსაც მან განსაკუთრებული ყურადღება უნდა მიაქციოს და სათუთადაც მოეპყრას. ასეთი მექანიზმია ადამიანის ემოციური განწყობა. თუ ინფორმაცია არამარტო ნეირონების (ტვინის უმნიშვნელოვანესი შემადგენელი ნაწილი - ნერვული უჯრედი) გააქტიურებას, არამედ ემოციების მოზღვავენებას და, შესაბამისად, სისხლში დიდი რაოდენობის ადრენალინის “შემზაპუნებას” იწვევს, თქვენი ტვინი ხვდება, რომ შემოსული ინფორმაცია მართლაც მნიშვნელოვანია თქვენთვის. ამდენად, ის არ უნდა იყოს დავიწყებული;



✓ რიგითი საქმიანობისას ტვინი იხსენებს შესაბამის ტიპურ მიდგომას და ადამიანი იყენებს მას თითქმის მყისიერად, დაფიქრების გარეშე. ასეთი მარტივი აზროვნული პროცესის წარმატებული გამოყენება ეფუძნება ცხოვრების განმავლობაში ტვინში დაგროვილ ქცევით შაბლონებს – **პატერნებს**;

▪ **პატერნი** – მზარდი, ეფექტიანი, მძიმედ გარდაქმნადი **აღქმის და რეაგირების წესის მოდელია** (სტერეოტიპული ქცევითი რეაქციების ერთობლიობა);

▪ ტვინი “**თვითმოწესრიგებადი**” ინფორმაციული სისტემაა - შემოსული (აღქმული) ინფორმაცია თავადვე ახდენს საკუთარ მოწესრიგებას პატერნებში და თვითონვე მოიცავს ამ პატერნების გამოყენების “**ინსტრუქციასაც**”;

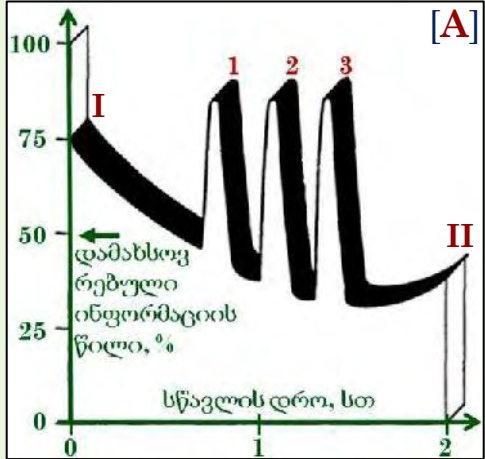
▪ ადამიანის ჩვევა - ერთიანობაში **განიხილოს** საკითხი, ერთიანობაში **იფიქროს** მასზე, ანუ **ერთდროულად** შეასრულოს რამდენიმე აზრობრივი ოპერაცია, იწვევს **აზრების შერევას** და უარყოფითად მოქმედებს **შედეგზე**;

▪ უნდა მოხდეს **საკითხის სტრუქტურირება** და ერთ ჯერზე შესრულდეს **მხოლოდ ერთი** – კონკრეტული მიმართულების და ემოციური დატვირთვის აზრობრივი ქმედება;

▪ ტვინის მნიშვნელოვანი მიდრეკილებაა - გარკვეული აზროვნული პროცესისას **შეარჩიოს ერთი საკვანძო** საგანი, მოვლენა (ცენტრალური ობიექტი), გამოავლინოს მისი **ასოციაციური კავშირები სხვა** ინფორმაციულ ერთეულებთან, შემდგომ კი, უკვე **მთლიანობაში აღიქვას** სრულად გააზრებული ინფორმაცია;

✓ ტვინი გააზრებისა და დამახსოვრების შესაძლებლობების თვალსაზრისით, გაცილებით უფრო **ძლიერია გამოსახულებებთან**, ვიდრე სიტყვებთან მიმართებაში. გამოსახულების შემთხვევაში **აღქმაზე** ერთობლივად რამდენიმე ფაქტორი მუშაობს: **ფერი, ფორმა, ხაზი, ზომა, ტექსტურა** და **წარმოსახვა**. შედეგად, ერთი სურათი “**1024** სიტყვად ფასობს”;

▪ **ვიზუალიზაციის** ფართო გამოყენება – განსაზღვრავს ინფორმაციის უკეთ სტრუქტურირებას, გააზრებულის ერთიანობაში აღქმის დახვეწას. **ფერების** სისტემის, როგორც აუცილებელი ატრიბუტის დანერგვა – ემსახურება მონაცემების თვალსაჩინო განცალკევებას, მასალის ათვისების გაადვილებას;



✓სწავლისას ეფექტიანად ვიმახსოვრებთ [A]:

**I.** სასწავლო პროცესის **დასაწყისში** მიღებულ ცოდნას (“პირველადი აღქმის ეფექტი”);

**II.** სასწავლო პროცესის **ბოლოს** მიღებულ ცოდნას (“ახლახან აღქმულის ეფექტი”);

**1.** ცოდნას, რომელსაც ტვინი ასოციაციურად აკავშირებს უკვე **ათვისებულ** (მეხსიერებაში განლაგებულ) ნებისმიერ ინფორმაციასთან;

**2.** მასალას, რომელსაც ტვინი აღიქვამს, როგორც **უნიკალურს**;

**3.** გამორჩეული **მნიშვნელობის** მქონეს, **საინტერესოდ** წარმოდგენილ ინფორმაციას;

■ ინფორმაციის გაგებისა და დამახსოვრების დონეზე მნიშვნელოვან ზეგავლენას ახდენს მეცადინეობის **ხანგრძლივობა** (თანაც, გაგებასა და დამახსოვრებაზე – განსხვავებულად):

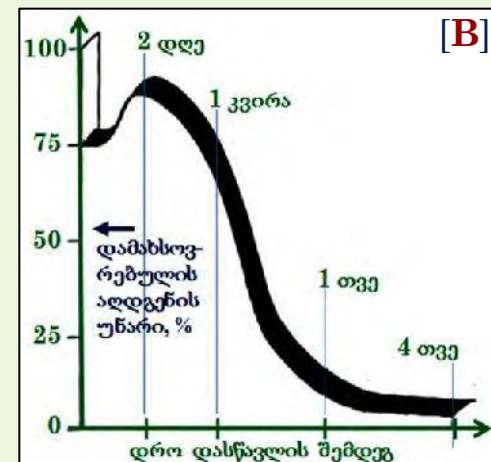
- აზროვნება და მეხსიერება **ჰარმონიულად მოქმედებენ** მეცადინეობის მე-20 და 50-ე წუთებს შორის;
- ~20 წთ სჭირდება აზროვნებას, რომ გაერკვეს შემომავალი მასალის რიტმში, ორგანიზაციაში;
- უწყვეტი მეცადინეობის 50 წუთის შემდეგ დამახსოვრების უნარი მნიშვნელოვნად **სუსტდება** და მით უფრო მეტად, რაც უფრო **ხანგრძლივია** უწყვეტი მეცადინეობა;
- დამახსოვრების საშუალო დონის შესანარჩუნებლად **აუცილებელია** მეცადინეობის პროცესში მცირე (8 - 10 წთ) **შესვენებების** გამოყენება;

■ შესვენებისას ხდება აღქმული ინფორმაციის **შეპირისპირება** და **შეჯერება** არსებულ ცოდნასთან (ინფორმაცია გადის **შიდა ინტეგრაციას**), რაც ხელს უწყობს მეხსიერებაში მის მყარ განთავსებას;

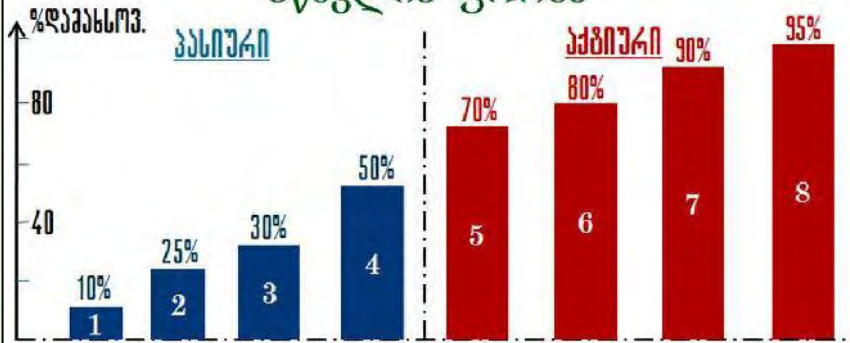
■ ზოგადად, ინფორმაციის ხასიათის მიხედვით, **შიდა ინტეგრაციაზე** დახარჯული დრო მერყეობს რამდენიმე წუთიდან რამდენიმე დღემდე [B];

■ მხოლოდ **დასრულებული** ინტეგრაცია იძლევა აღქმული ინფორმაციის **ყოველმხრივი** და ეფექტიანი გამოყენების საშუალებას;

■ ტვინი მუდმივად **იშორებს** “ზედმეტ” ცოდნას. ამიტომ, ერთი თვის განმავლობაში გამოუყენებელი ინფორმაციის მეხსიერებიდან **აღდგენის უნარი** და ალბათობაც საკმაოდ მცირეა;



## სწავლის ფორმა [C]



ინფოს დამახსოვრებულის წილის სწავლის ფორმაზე დამოკიდებულება: 1. კითხვა; 2. გახსენება; 3. სკეჩი; 4. გახსენება და სკეჩი; 5. განხილვა ვიდეოსთან; 6. უკუკითხვა კომპიუტერზე; 7. ნაკრძალი; 8. სწავლა.

✓ თქვენს ხელთ სწავლის პროცესის მრავალი მარეგულირებელი ინსტრუმენტი. უნდა გახსოვდეთ:

- ფუჭის დამახსოვრება არ ხდება;
- დამახსოვრებული, მაგრამ გამოუყენებელი ინფორმაცია აუცილებლად წაიშლება;
- ემოციური განწყობაა ის მექანიზმი, რომელიც კარნახობს ტვინს - რომელი ინფორმაცია უნდა იყოს აუცილებლად და კარგად (ე.ი. შედარებით ხანგრძლივად) დამახსოვრებული;
- შეარჩიეთ თქვენთვის მისაღები სწავლის ფორმა [C]. გაითვალისწინეთ, რომ დამახსოვრების ეფექტიანობით და გააზრების სიღრმითაც პასიურზე გაცილებით ხელსაყრელია მეცადინეობის აქტიური ფორმა;

✓ ტვინმა მეხსიერების დასუფთავება რომ არ დაიწყოს, მისი დარწმუნებაა საჭირო, რომ "გასაწირად" არჩეული ცოდნა თქვენთვის მეტად მნიშვნელოვანი და აუცილებელია. ეს მასალის პერიოდული გამოცდებით მიიღწევა;

მეცადინეობის ხანგრძლივობა 1 სთ			
მეცადინეობის დამთავრებიდან გასული დრო	10-30 წთ	10	გამეორების ხანგრძლივობა, წთ
	1 დღე	4	
	1 კვირა	2	
	1 თვე	2	

✓ თითოეული მეცადინეობა სწორად უნდა იყოს ორგანიზებული:

- შესვენებების განრიგის ზუსტი დაცვა: უწყვეტი მეცადინეობა 45-50 წთ, შესვენება 8-10 წუთი, თანაც საერთო სიმშვიდისა და მინიმალური გონებრივი დატვირთვის პირობებში;
- ტვინი სიახლის დიდი მოტრფიალეა, ე.ი. სასურველია მეცადინეობების ხანგრძლივობის ვარიაცია;
- ერთსა და იმავე გამაღიზიანებლებზე რეაგირების ნიველირების გამო, ცვალებადი მეცადინეობის დაწყების დროც;
- პერიოდული ფიზიკური დატვირთვა ზრდის მეცადინეობის ეფექტიანობას;



- რთული და წონიანი საკითხების შესწავლისას გამოიყენეთ **გახმოვანება** (ხმამაღალი);
- აკონტროლეთ ტვინის **წარმადობა**. თუ ამჩნევთ, რომ ვერ ახერხებთ ყურადღების კონცენტრირებას, ე.ი. ტვინს დასვენება სჭირდება. **დასვენებით** (და არა მძიმე ადგილის მრავალჯერადი გადახედვით) ტვინი საკმაოდ სწრაფად აღიდგენს “ჩვეულ ფორმას”;
- შეაჩვიეთ თქვენი თავი **ნებისმიერ**, უმნიშვნელო წარმატებაზე კი, ემოციურ რეაგირებას. მიღწეულით **აღფრთოვანება**, **აღმაფრენა** სწავლის ეფექტიანობის ზრდის მარტივი, მაგრამ **ქმედითი** საშუალებაა;
- ინტენსიური მეცადინეობისას, ძილის წინ **ნუ წაიკითხავთ სხვა წიგნს**. წონიან ინფორმაციას შიდა ინტეგრაციისთვის შედარებით **მეტი დრო** ესაჭიროება;

✓ **ინტენსიური მეცადინეობა**, გონებრივი და ემოციური დატვირთვა მოითხოვს სწორ, გარკვეულწილად მიმართული მოქმედების **კვებას**:

- საკვები **ნახშირწყლების** მნიშვნელოვან რაოდენობას უნდა შეიცავდეს, რათა სისხლი გამდიდრდეს **გლუკოზით**, რომელიც ტვინის ძირითად “საწვავს” წარმოადგენს;
- უნდა **გაიზარდოს სითხის** მოხმარება. მისი ნაკლებობა უარყოფითად, პირველ რიგში, სწორედ ტვინზე მოქმედებს;

✓ ტვინში მიმდინარე ასოციაციური აზროვნული პროცესის გრაფიკულ ასახვას ემსახურება ინსტრუმენტი **Mind Map (მენტალური რუკა)**, რომელიც ფართოდ, მრავალმხრივად და წარმატებულად გამოიყენება განათლებასა და ბიზნესში;

- გარკვეულ თემაზე მეხსიერებაში ინფორმაციის **დაგროვებასთან** ერთად, ტვინს სულ უფრო უმარტივდება ინფორმაციულ ერთეულებს შორის ასოციაციური კავშირების გამოძებნა. შედეგად, **იზრდება** ახალი ცოდნის “შთანთქმის” **უნარი** და **სიჩქარე** - **ნასწავლი სწავლის კატალიზატორია!**



## Appendix II. ინფორმაცია (ცხრილები), რომელიც გამოგადგებათ

### გამოყენებული ბერძნული სიმბოლოები

$\alpha$ ალფა	$\eta$ ეტა	$\nu$ ნიუ
$\beta$ ბეტა	$\theta$ თეტა	$\pi$ პი
$\gamma$ გამა	$\kappa$ კაპა	$\rho$ რო
$\Delta$ დელტა	$\lambda$ ლამბდა	$\tau$ ტაუ
$\varepsilon$ ეპსილონი	$\mu$ მიუ	$\varphi$ ფი

### ფიზიკურ სიდიდეთა ძირითადი ერთეულები

ს ი დ ი დ ე	განზოცილება	ერთეული	აღნიშვნა
სიგრძე	<b>L</b>	მეტრი	<b>მ</b>
დრო	<b>T</b>	წამი	<b>წმ</b>
მასა	<b>M</b>	კილოგრამი	<b>კგ</b>
ტემპერატურა	<b>Q</b>	კელვინი	<b>K</b>
ნივთიერებ. რაოდ.	<b>N</b>	მოლი	<b>მოლი</b>
დენის ძალა	<b>I</b>	ამპერი	<b>ა</b>
სინათლის ძალა	<b>J</b>	კანდელა	<b>კდ</b>

ძირითადი ფიზიკური მუდმივები		
მუდმივა	აღნიშ.	სიდიდე
ბორის რადიუსი	<b>a</b>	$5.292 \cdot 10^{-11}$ მ
სინათლის სიჩქარე	<b>c</b>	$2.998 \cdot 10^8$ მ / წმ
ელემენტარული მუხტი	<b>e</b>	$1.602 \cdot 10^{-19}$ კ
ელექტრული მუდმივა	<b><math>\epsilon_0</math></b>	$8.854 \cdot 10^{-12}$ ფ / მ
გრავიტაციული მუდმივა	<b>G</b>	$6.672 \cdot 10^{-11}$ ნ მ <sup>2</sup> / კგ <sup>2</sup>
თავის.ვარდნის აჩქარება	<b>g</b>	$9.807$ მ/წმ <sup>2</sup>
პლანკის მუდმივა	<b>h</b>	$6.626 \cdot 10^{-34}$ ჯ წმ
“_”	<b>ħ</b>	$1.055 \cdot 10^{-34}$ ჯ წმ
ბოლცმანის მუდმივა	<b>k</b>	$1.381 \cdot 10^{-23}$ ჯ / K
კულონის მუდმივა	<b><math>k_0</math></b>	$8.988 \cdot 10^9$ ნ მ <sup>2</sup> / კ <sup>2</sup>
მასის ატომური ერთეული	<b>მ.ა.ე.</b>	$1.661 \cdot 10^{-27}$ კგ
ელექტრონის მასა	<b><math>m_e</math></b>	$9.110 \cdot 10^{-31}$ კგ
ნეიტრონის მასა	<b><math>m_n</math></b>	$1.675 \cdot 10^{-27}$ კგ
პროტონის მასა	<b><math>m_p</math></b>	$1.673 \cdot 10^{-27}$ კგ
მაგნიტური მუდმივა	<b><math>\mu_0</math></b>	$4\pi \cdot 10^{-7}$ ჰე / მ
ავოგადროს რიცხვი	<b><math>N_A</math></b>	$6.022 \cdot 10^{23}$ მოლი <sup>-1</sup>
ნორმალური ატმოსფ.წნევა	<b><math>P_0</math></b>	$1.013 \cdot 10^5$ პა
აირის უნივერს.მუდმივა	<b>R</b>	$8.314$ ჯ / (K მოლი)
აბსოლუტური ნული	<b><math>T_K</math></b>	$-273.16$ °C

## ერთეულთა თავსართები

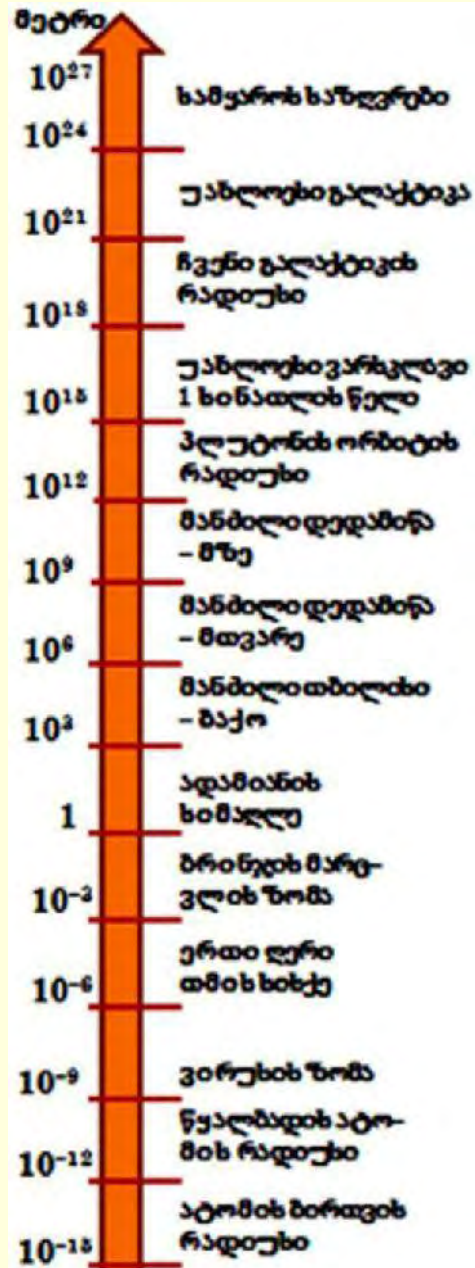
მეცნიერული თავსართი	სიმბოლო	სიმბოლო
$10^1$	დეკა	და
$10^2$	ჰექტო	ჰ
$10^3$	კილო	კ
$10^6$	მეგა	მგ
$10^9$	გიგა	გ
$10^{12}$	ტერა	ტ
$10^{15}$	პეტა	პ
$10^{18}$	ექსა	ე
$10^{-1}$	დეცი	დ
$10^{-2}$	სანტი	ს
$10^{-3}$	მილი	მ
$10^{-6}$	მიკრო	მკ
$10^{-9}$	ნანო	ნ
$10^{-12}$	პიკო	პ
$10^{-15}$	ფემტო	ფ
$10^{-18}$	ატო	ა

## ფიზიკურ სიდიდეთა ნაჩვენებელი ერთეულები

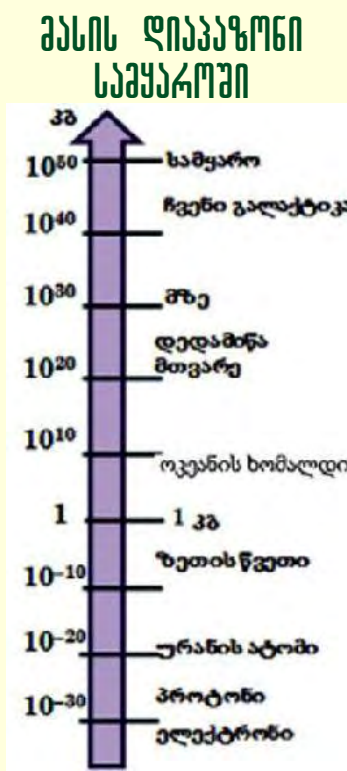
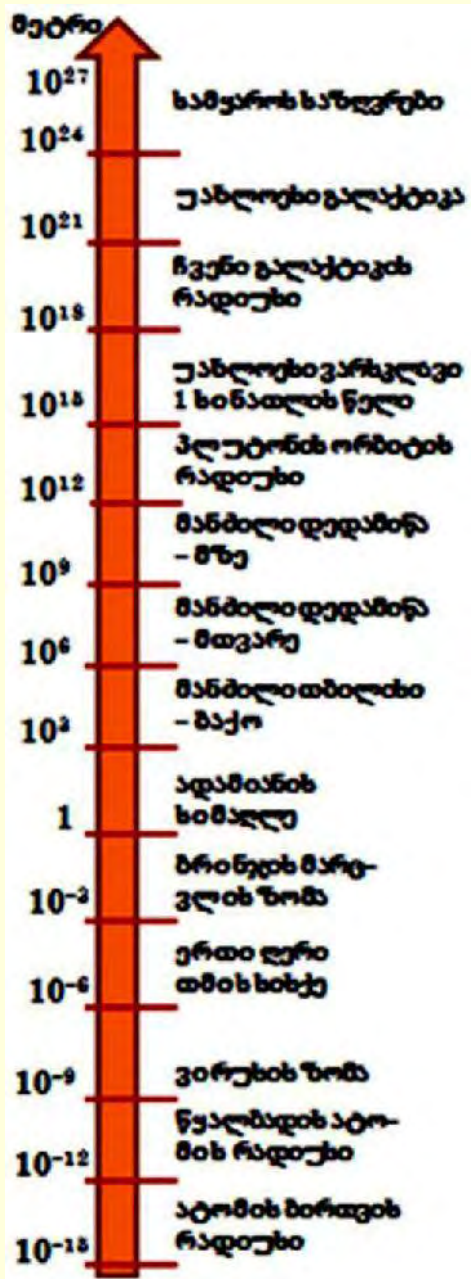
სიდიდე	სიმბოლო	ერთეული	სიმბოლო	სხვა ერთეულები
ფართობი	S	კვადრატული მეტრი	მ <sup>2</sup>	სმ <sup>2</sup> = 10 <sup>-4</sup> მ <sup>2</sup>
მოცულობა	V	კუბური მეტრი	მ <sup>3</sup>	ლ = 10 <sup>-3</sup> მ <sup>3</sup>
ბრტყელი კუთხე	φ	რადიანი	რად	გრად = 0.0175 რად
სივრცითი კუთხე	g	სტერადიანი	სტერ	
გადაადგილება, გზა	S, L	მეტრი	მ	კმ = 10 <sup>3</sup> მ
სიჩქარე	V	მეტრი წამთან	მ წმ <sup>-1</sup>	კმ სთ <sup>-1</sup> = 0.278 მ წმ <sup>-1</sup>
აჩქარება	a	მეტრი წამ კვადრატთან	მ წმ <sup>-2</sup>	
კუთხური სიჩქარე	ω	რადიანი წამთან	რად წმ <sup>-1</sup>	
სიხშირე	ν	ჰერცი	ჰც	წმ <sup>-1</sup> ≡ ჰც
სიმკვრივე	r	კილოგრამი კუბურ მეტრთან	კგ მ <sup>-3</sup>	გ სმ <sup>-3</sup> = 10 <sup>3</sup> კგ მ <sup>-3</sup>
ძალა	F	ნიუტონი	ნ	კგ.ძ = 9.8 ნ
იმპულსი	P	კილოგრამ-მეტრი წამთან	კგ მ წმ <sup>-1</sup>	
ძალის იმპულსი	F t	ნიუტონი წამი	ნ წმ	
ძალის მომენტი	M	ნიუტონი მეტრი	ნ მ	
მუშაობა, ენერჯია	A, E	ჯოული	ჯ	ჯ = 1.6 10 <sup>-19</sup> ევ
სიმძლავრე	N, P	ვატი	ვტ	ცხ.ძ = 735.5 ვტ
წნევა	P	პასკალი	პა	კს.გ.მმ = 133.3 პა
სითბოს რაოდენობა	Q	ჯოული	ჯ	კალორია = 4.187 ჯ



მანძილის ღიააზონი საყვაროვი



ფიზიკურ სიდიდეთა ნაკრძიული ერთეულები (გაგრიქლება)				
სიდიდე	აღნიშ.	ერთეული	აღნიშ.	სხვა ერთეულები
კუთრი სითბოტევადობა	c	ჯოული კილოგრამ-კელვინზე	$\text{ჯ კგ}^{-1} \text{K}^{-1}$	
მოლური მასა	M	კილოგრამი მოლთან	კგ მოლი <sup>-1</sup>	
კონცენტრაცია	n	1 კუბურ მეტრთან	$\text{მ}^{-3}$	$\text{სმ}^{-3} = 10^6 \text{მ}^{-3}$
ელექტრული მუხტი	q	კულონი	კ	
დენის სიმკვრივე	J	ამპერი ვვადრატულ-მეტრთან	$\text{ა მ}^{-2}$	
ძაბვა, ემმ	U, E	ვოლტი	ვ	
ელ. ველის დამაბულობა	E	ვოლტი მეტრთან	$\text{ვ მ}^{-1}$	
წინააღმდეგობა	R	ომი	ომი	
კუთრი წინააღმდეგობა	$\rho$	ომი მეტრი	ომი მ	ომი მ <sup>2</sup> მ <sup>-1</sup> = $10^{-6}$ ომი მ
ელექტრო ტევადობა	C	ფარადა	ფ	
მაგნიტური ინდუქცია	B	ტესლა	ტლ	
მაგნიტური ნაკადი	F	ვებერი	ვბ	
ინდუქტივობა	L	ჰენრი	ჰნ	
სინათლის ნაკადი	F	ლუმენი	ლმ	
განათებულობა	E	ლუქსი	ლქ	
ოპტიკური ძალა	D	დიოპტრი	დპტრ	$\text{მ}^{-1} \equiv \text{დპტრ}$



## ზოგიერთი ნივთიერების სიჩქარე, კმ·პ-3

ბირთვული ნივთიერება	$10^{17}$
მზის ცენტრალური ნაწილის ნივთიერება	$10^5$
დედამიწის ბირთვი	$12 \cdot 10^3$
ტყვია	$11.3 \cdot 10^3$
ალუმინი	$2.7 \cdot 10^3$
წყალი	$1 \cdot 10^3$
ჰაერი	1.3
ნივთიერება მაღალ (ლაბორატორიულ) ვაკუუმში	$10^{-15}$
ნივთიერება ვარსკლავთშორის სივრცეში	$10^{-21}$
ნივთიერება გალაქტიკათშორის სივრცეში	$10^{-27}$

## ზოგიერთი ვიწრო სიჩქარე, პ·წმ-1

თმა ადამიანის თავზე	$5 \cdot 10^{-9}$
სწრაფად მოძრავი მყინვარი	$3 \cdot 10^{-6}$
მაჯის საათის წამების ისრის ბოლო	$10^{-3}$
მორბენალი	10
სარბოლო ავტომანქანა	70
ბგერა ჰაერში	330
რეაქტიული თვითმფრინავი	$2 \cdot 10^3$
დედამიწა ორბიტაზე	$3 \cdot 10^4$
ელექტრონი წყალბადის ატომში	$2.2 \cdot 10^6$
სინათლე სივრცეში	$3 \cdot 10^8$



## Appendix III. გამოყენებული ლიტერატურა

1. ა.გიგინეიშვილი, გ.კუკულაძე ზოგადი ფიზიკა. I ტომი. “ტექნიკური უნივერსიტეტი”. 2011
2. ა.გიგინეიშვილი, გ.კუკულაძე ზოგადი ფიზიკა. II ტომი. “ტექნიკური უნივერსიტეტი”. 2012
3. ა.გიგინეიშვილი, გ.კუკულაძე ზოგადი ფიზიკის კურსი. II ტომი. “ტექნიკური უნივერსიტეტი”. 2009
4. **Duglas C. Giancoli General Physics.** Prentice-Hall. Inc. 1984
5. **Д.В.Сивухин Общий курс физики. Том I-V.** МФТИ. 2005
6. **Jay Orear Physics.** Cornell University Collier. Macmillan Publishing Co.Inc. N.Y. 1979
7. ლ.გლურჯიძე, ი.პაპავა ფიზიკა. ინტელექტი. 2014
8. **Werner Heisenberg Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science.** Harper Perennial Modern Classics. 2007
9. **Michio Kaku Parallel Words.** Anchor. 2006
10. **Steven Weinberg Dreams of a Final Theory.** Random House, Inc. 1993
11. **Edward de Bono Serious Creativity.** Harper Collins Publishers. 1997
12. **Tony Buzan with Barry Buzan The Mind Map Book.** BBC Books. 2000