

იმეფაობინე, იმჩაველე და მათარე!

ლევან გლუჩიძე, აკადემიკოსი გიორგი ნიჟარაძის

ფიზიკა

სტუ-ს ოთხ სივრცითი კონსტანტის ლეჟენდის კონსპირატი

ნაწილი II



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.

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. იდეალური აირი. მოლეკულურ-კინეტიკური თეორია (მკთ) | 006 |
| 2. მკთ-ს ძირითადი განტოლება | 007 |
| 3. იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება | 008 |
| | 010 |

ლექცია 2

- | | |
|--|-----|
| 1. იზოპროცესები {იდეალური აირის კანონები} | 012 |
| 2. მოლეკულათა განაწილება სიჩქარეთა მიხედვით | 013 |
| 3. იდეალური აირის შინაგანი ენერგია. თავისუფლების ხარისხთა რიცხვი | 015 |
| | 018 |

ლექცია 3

- | | |
|--|-----|
| 1. აირის სითბოტევადობა. მაიერის ფორმულა | 021 |
| 2. ბოლცმანის და მაქსველ-ბოლცმანის განაწილება | 022 |
| | 025 |

ლექცია 4

- | | |
|--|-----|
| 1. რეალური აირი. ვან-დერ-ვაალსის განტოლება. იზოთერმები. ენერგია | 027 |
| 2. თერმოდინამიკის I კანონი | 028 |
| 3. თერმოდინამიკის I კანონი იდეალური აირის იზო- და ადიაბატურ პროცესებში | 031 |
| | 033 |

ლექცია 5

- | | |
|---|-----|
| 1. სითბური ძრავა (ციკლი, მქკ). თერმოდინამიკის II კანონი | 034 |
| 2. შექცევადი და შეუქცევადი პროცესები. კარნოს ციკლი | 035 |
| 3. ენტროპია. თერმოდინამიკის III კანონი | 036 |
| | 038 |

ლექცია 6

- | | |
|---|-----|
| 1. კრისტალური და ამორფული მყარი სხეულები | 040 |
| 2. კრისტალური მესრის ბრავეს სისტემები და ქიმიური ბმის სახეები | 041 |
| | 044 |

ლექცია 7	048
1.მყარი სხეულის სითბური გაფართოება	049
2.მყარი სხეულის სითბოტევადობა	050
3.სითხის ფიზიკური თვისებები {მოკლე მიმოხილვა}	051
4.ზედაპირული დაჭიმულობა. კაპილარული მოვლენები	052
ლექცია 8	055
1.ორთქლადქცევა	056
2.კინეტიკური მოვლენები აირებში {დიფუზია, თბოგამტარობა, შინაგანი ხახუნი}	059
აირის & სითხის Mind Map	061
ლექცია 9	062
1.ელექტრული მუხტი. მუხტის თვისებები და მუდმივობის კანონი	063
2.ელექტროსტატიკა. კულონის კანონი	065
3.ელექტრული ველი. ელექტრული ველის დაძაბულობის ვექტორი	066
4.წერტილოვანი მუხტის ველის დაძაბულობა	067
ლექცია 10	068
1.ელექტრულ ველთა სუპერპოზიციის პრინციპი	069
2.ელექტრული ველის ძალწირები. ძალწირების ნაკადი	070
3.გაუსის {გაუს-ოსტროგრადსკის} თეორემა	072
4.თანაბრად დამუხტული უსასრულო სიბრტყის ველის დაძაბულობა	073
ლექცია 11	074
1.თანაბრად დამუხტული სფერული ზედაპირის და სფეროს ველის დაძაბულობები	075
2.გაუს-ოსტროგრადსკის თეორემის დიფერენციალური სახე	077
3.ელექტროსტატიკურ ველში მუხტის გადაადგილებაზე შესრულებული მუშაობა	078
ლექცია 12	080
1.პოტენციალი. პოტენციალთა სხვაობა	081

2.ეკვიპოტენციური ზედაპირები. პოტენციალის კავშირი ველის დამაბულობასთან	083
3.ელექტრული დიპოლი	085
4.დიპოლი გარე ელექტრულ ველში	086
ლექცია 13	087
1.დიელექტრიკების პოლარიზაცია. პოლარიზაციის ვექტორი	088
2.ელექტრული ველის დამაბულობა დიელექტრიკში	091
3.ელექტრული წანაცვლების ვექტორი. გაუსის თეორემა დიელექტრიკში	092
ლექცია 14	093
1.გამტარის და კონდენსატორის ტევადობა	094
2.კონდენსატორის (ელექტროსტატიკური ველის) ენერგია	097
ლექცია 15	098
ელექტროსტატიკის Mind Map	099
Appendix I	100
1.ინფორმაცია (ცხრილები), რომელიც გამოგადგებათ	100
Appendix II	104
1.გამოყენებული ლიტერატურა	104



“სიბნელის წყევლაზე გაცილებით მარტივი ერთი პატარა სანთლის ანთებაა!”
კონფუცი



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

551 - 479

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 1

თემა:

სემესტრი II

აირის კინეტიკური თეორია

ზვ.

007

1.იდეალური აირი. მოლეკულურ-კინეტიკური თეორია (მკთ)

008

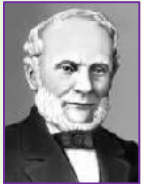
2.მკთ-ს ძირითადი განტოლება

010

3.იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება

1. იდეალური აირი. მოლეკულურ-კინეტიკური თეორია (მკთ)

✓ **ნივთიერების** აგებულების და თვისებების შესწავლას, მისი შემადგენელი უმცირესი ნაწილაკების - სტრუქტურული ელემენტების (სტრუქტურული ელემენტები - **სე**: ატომი, მოლეკულა, იონი) - “ქცევაზე” დაყრდნობით, მძლავრი ბიძგი **მკთ**-მ მისცა (ლ-I.15.1);



R. Clausius
1822-1888



J. Maxwell
1831-1879



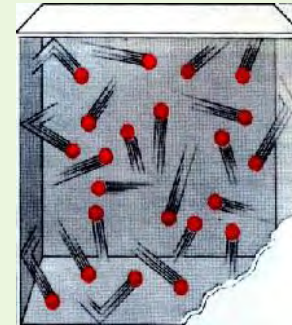
L. Boltzmann
1844-1906

▪ თეორიის შედარებით მარტივი სახით ჩამოყალიბება მოხერხდა იდეალური აირის ცნების შემოტანით;

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

▪ მკთ-ს 3 განმსაზღვრელი დებულება:

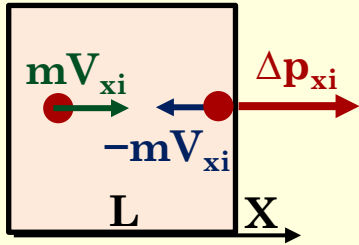
1. ყველა სხეული შედგება ძალიან დიდი რაოდენობის უმცირესი **სე**-სგან;
2. **სე** განუწყვეტლივ ქაოსურად მოძრაობენ;
3. **სე** ურთიერთქმედებენ {ელექტრული ბუნების} მიზიდვა-განზიდვის ძალებით;



▪ **სე**-ის ქაოსური (სითბური) მოძრაობა განაპირობებს:

- აირის შინაგანი კინეტიკური ენერჯის არსებობას;
 - აირის წნევას ჭურჭლის კედლებზე (კედლებთან **სე**-ის დაჯახებების გამო);
- იდეალური აირის მიერ ჭურჭლის კედელზე წარმოებულ წნევას განსაზღვრავს მკთ-ს ძირითადი განტოლება;

2.მკთ-ს ძირითადი განტოლება



✓ იდეალური აირის ერთი სე-ის ჭურჭლის კედელთან **აბსოლუტურად დრეკადი** და მართობული დაჯახების შედეგად კედელს **გადაეცემა** იმპულსი

$$\Delta p_{xi} = mV_{xi} - (-mV_{xi}) = 2mV_{xi} \quad (2.1)$$

✓ V_{xi} სიჩქარით მოძრაობს 1 სე t დროში 1 კედელს დაეჯახება Z-ჯერ {ყოველი შემდგომი დაჯახებისთვის სე-მა უნდა გაიაროს 2L მანძილი}

$$Z = V_{xi}t / 2L \quad (2.2)$$

▪ ცხადია, ამ t დროში იმპულსის ცვლილება **ძალის იმპულსის** ტოლია:

$$Z\Delta p_{xi} = F_i t \Rightarrow F_i = Z \cdot \Delta p_{xi} / t \quad (2.3)$$

{(2.2),(2.1) => (2.3)} →

$$F_i = (V_{xi}t / 2L) \cdot (\Delta p_{xi} / t) = (V_{xi} / 2L) \cdot (2mV_{xi}) = mV_{xi}^2 / L \quad (2.4)$$

▪ წნევის დასადგენად:

1. გავითვალისწინოთ (2.4)-ში, რომ ერთ კედელს დაეჯახება არსებული N რაოდენობის მოლეკულების 1/3;

2. (2.4) გავყოთ L^2 -ზე და გავითვალისწინოთ კავშირი მოლეკულების N რაოდენობასა და n კონცენტრაციას შორის $n = N/L^3$:

$$P = (N/3)F_i / L^2 = (N/3) \cdot (mV_i^2 / L^3) = (1/3)nmV_i^2 \quad (2.5)$$

▪ კედელზე აირის წნევა იქმნება ამ კედელზე მრავალი მოლეკულის მხრიდან მოქმედი ძალებით. თანაც, ზოგადად, მოლეკულებს განსხვავებული სიჩქარეები აქვთ. ამდენად, წნევა F_i ძალების საშუალო მნიშვნელობით უნდა იყოს განსაზღვრული. მაშინ, (2.4) →

$$\overline{F} = (N_i m / L) \cdot (V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_{N_i}^2) / N_i = (N_i m / L) \cdot \overline{V}^2 \quad (2.6)$$

▪ წნევის დასადგენად (2.6)-იც გავყოთ L^2 -ზე და აქაც გავითვალისწინოთ, რომ $N_i = N/3 \rightarrow$

$$P = (1/3) n m \overline{V}^2 \quad (2.7)$$

მკთ-ს ძირითადი განტოლება

✓ კვადრატულ ფესვს \overline{V}^2 სიჩქარეთა კვადრატების საშუალო მნიშვნელობიდან - V_q საშუალო კვადრატული სიჩქარე ეწოდება:

$$V_q = (\overline{V}^2)^{1/2} = \{(V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_{N_i}^2) / N_i\}^{1/2} \quad (2.8)$$

▪ მკთ-ს ძირითადი განტოლება შეიძლება $სე$ -ის გადატანითი მოძრაობის საშუალო კინეტიკური ენერგიითაც ჩაიწეროს:

$$(2.7) \rightarrow P = (1/3) n m \overline{V}^2 = 2(1/3) n m \overline{V}^2 / 2 = (2/3) n \overline{E}_k \quad (2.9)$$

3. იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება

მკთ: მიკროსკოპული მდგომა
{*სკ*-ის სიჩქარე, m_0 -მასა, რაოდენობა}



თერმოდინამიკა: მაკროსკოპული
მიდგომა (*აირის T-ტემპერატურა, P-წნევა, V-მოცულობა, m-მასა და n-კონცენტრაცია*)

$$P = (2/3)n\overline{E_k} \quad (3.1) \quad n = N/V \quad (3.2)$$

$$P\overline{V}/N = kT \quad (3.3) \quad \text{ანუ} \quad P = NkT/\overline{V} = nkT \quad (3.4)$$

$$(3.4) \Rightarrow (3.1) \quad nkT = (2/3)n\overline{E_k} \Rightarrow \overline{E_k} = (3/2)kT \quad (3.5)$$

$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ ჯ/კ} - \text{ბოლცმანის მუდმივა}$

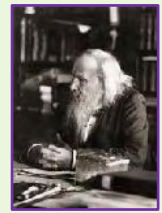
✓(3.5) \Rightarrow *სკ*-ის გადატანითი მოძრაობის საშუალო კინეტიკური ენერგია პირდაპირ-პროპორციულია აბსოლუტური ტემპერატურის;

▪(3.5)-ს საფუძველზე, V_q საშუალო კვადრატული სიჩქარისთვის ასევე ჩაიწერება:
 $V_q = (\overline{V^2})^{1/2} = (2\overline{E_k}/m_0)^{1/2} = (3kT/m_0)^{1/2} \quad (3.6)$

(ლ-I.15.1) $\Rightarrow N/N_A = m/\mu \Rightarrow N = (m/\mu)N_A \quad (3.7)$
 μ - მოლური მასა { $\mu = m_0 N_A \quad (3.8)$; N_A -ავოგადროს რიცხვი}
 $m/\mu \equiv \nu$ - ნივთიერების რაოდენობა {მოლების რიცხვი};
 {(3.3),(3.7)} $\Rightarrow P\overline{V} = NkT \Rightarrow P\overline{V} = (m/\mu)N_A kT \quad (3.9)$
 $N_A k \equiv R$ აირის უნივერსალური მუდმივა
 $R = 8.31 \text{ ჯ/(კ მოლი)}$
 (3.9) $\Rightarrow P\overline{V} = (m/\mu)RT \quad (3.10) \quad (\text{ანუ } P\overline{V} = \nu RT)$
იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება
 {კლავპირონ-მენდელეევის განტოლება}



E. Clapeyron
1799–1864



D. Mendeleev
1783–1847

▪(3.10) → მოცემული { უცვლელი } მასის აირისთვის
 $P\nu/T = \text{const}$ ანუ $P_1\nu_1/T_1 = P_2\nu_2/T_2$ (3.12)
კლაპეირონის განტოლება

▪ V_q გამოისახება R აირის უნივერსალური მუდმივითაც:
{(3.6) და $m_0 = \mu/N_A$ } → $V_q = (3kN_A T/\mu)^{1/2} = (3RT/\mu)^{1/2}$ (3.11)
{მაგ.: H_2 , $T=300K \Rightarrow V_q = 2 \cdot 10^3$ მ/წმ}

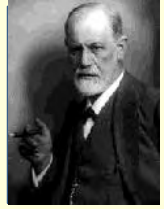


“ერთადერთი ადამიანი, ვისაც თქვენს თავს უნდა ადარებდეთ, ეს თქვენ ხართ წარსულში, და ერთადერთი ადამიანი, ვისზეც უკეთესი უნდა იყოთ, ის არის, ვინც თქვენ ხართ ახლა.”

Sigmund Freud

რამდენი უნდა იცოდეთ, რომ იცოდეთ რამე ?!

1856 - 1939



სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 2

თემა:

სემესტრი II

აირის კინეტიკური თეორია

88·

013

1. იზოპროცესები {იდეალური აირის კანონები}

015

2. მოლეკულათა განაწილება სიჩქარეთა მიხედვით

018

3. იდეალური აირის შინაგანი ენერგია. თავისუფლების ხარისხთა რიცხვი

1. იზოპროცესები {იდეალური აირის კანონები}

კლასიკური $P\mathcal{V}/T = \text{const}$ განტოლებაში მოცემული მასის იდეალური აირის ორი პარამეტრის ურთიერთდამოკიდებულება, მესამე პარამეტრის მუდმივობისას იზოპროცესს მიეკუთვნება {3 იზოპროცესი, ანუ აირის 3 კანონი არსებობს};

1. იზოთერმული ($T = \text{const}$) პროცესი
(ბოილ-მარიოტის კანონი)

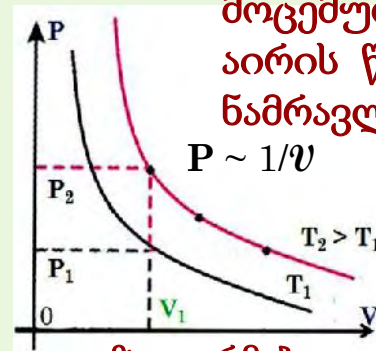
$$P\mathcal{V} = \text{const} \quad (1.1)$$

$$P_1\mathcal{V}_1 = P_2\mathcal{V}_2 \quad (1.2)$$

XVII ს. რ.ბოილმა და ე.მარიოტმა ცდებით;



R.Boyle
1627-1691



იზოთერმები

✓ მუდმივი ტემპერატურისას, მოცემული მასის იდეალური აირის წნევისა და მოცულობის ნამრავლი მუდმივი სიდიდეა;



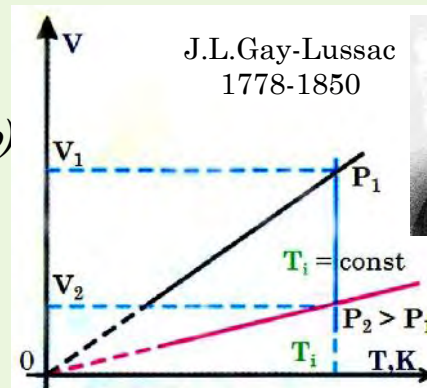
E.Mariotte
1620-1674

2. იზობარული ($P = \text{const}$)
პროცესი (გეი-ლუსაკის კანონი)

$$\mathcal{V}/T = \text{const} \quad (1.3)$$

$$\mathcal{V}_1/T_1 = \mathcal{V}_2/T_2 \quad (1.4)$$

XIX ს. ჟ.გეი-ლუსაკმა ცდით;



იზობარები

J.L.Gay-Lussac
1778-1850



✓ მუდმივი წნევისას, მოცემული მასის იდეალური აირის მოცულობა აბსოლუტური ტემპერატურის პროპორციულია;

• ბოილ-მარიოტის კანონით ($P_1\mathcal{V}_1 = P_2\mathcal{V}_2$) უფრო მაღალი (დიდი \mathcal{V} -ს) იზობარა შედარებით დაბალ წნევას შეესაბამება:
 $\mathcal{V}_1 > \mathcal{V}_2 \rightarrow P_1 < P_2$

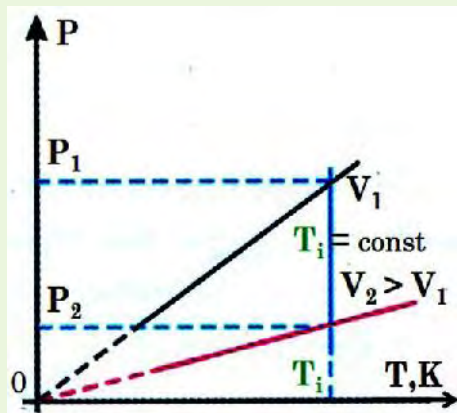
3. იზოქორული ($\nu = \text{const}$)
პროცესი (შარლის კანონი)

$$P/T = \text{const} \quad (1.5)$$

$$P_1/T_1 = P_2/T_2 \quad (1.6)$$

XVIII ს. ჟ. შარლმა ცდით;

J. Sharl
(1746-1823)



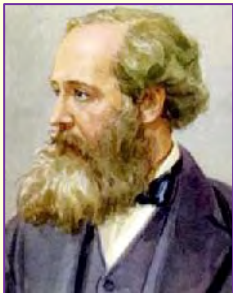
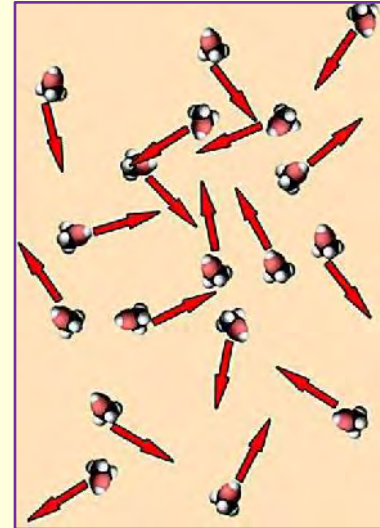
იზოქორები

✓ მუდმივი მოცულობისას, მოცემული მასის იდეალური აირის წნევა აბსოლუტური ტემპერატურის პროპორციულია.

• ბოილ-მარიოტის კანონით ($P_1 \nu_1 = P_2 \nu_2$) უფრო მაღალი იზოქორა შედარებით ნაკლებ მოცულობას შეესაბამება:
 $P_1 > P_2 \rightarrow \nu_1 < \nu_2$

2. მოლეკულათა განაწილება სიჩქარეთა მიხედვით

- აირის მცირე მოცულობაც კი, *მრავალი, ქაოსურად მოძრავი* {განუწყვეტელი *დაჯახებები*, სიჩქარის მიმართულების და სიდიდის *ცვლილება*} *სე-ის* ანსამბლს წარმოადგენს. ამდენად, მოძრაობის მახასიათებლები *სტატისტიკურ* პარამეტრებს მიეკუთვნებიან;
- ნებისმიერ ფიქსირებულ ტემპერატურაზე, ცალკეული *სე-ის* სიჩქარის მნიშვნელობათა სიმრავლე საკმაოდ ფართო ინტერვალს ქმნის, თანაც სიჩქარის მიხედვით გარკვეული, *ალბათური* განაწილებით;
- მაქსველმა შემოიტანა განაწილების $f(\mathbf{V})$ ფუნქციის ცნება, რომელიც განსაზღვრავს არსებული N რაოდენობის მოლეკულებიდან რა dN რაოდენობას ექნება სიჩქარე $\{V, V+dV\}$ სიდიდის ფარგლებში;



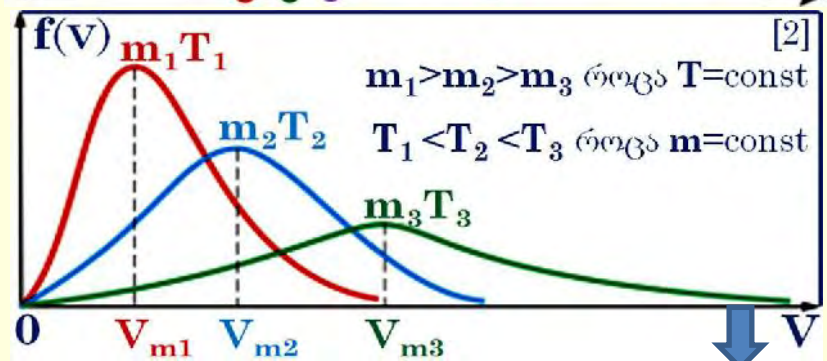
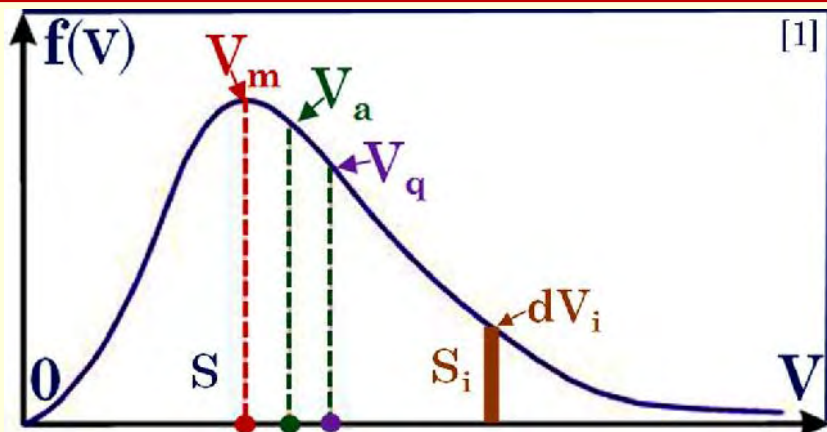
J. Maxwell
1831-1879

✓ dN იქნება მით მეტი რაც:

- მეტია N ;
- დიდია სიჩქარეთა ინტერვალი dV ;
- უფრო ალბათურია სიჩქარის კონკრეტული V მნიშვნელობა;
- მაშასადამე, $dN \sim NdV$ და $dN = Nf(\mathbf{V})dV$ (2.1)
- თუ $dV=1$, მაშინ (2.1) $\Rightarrow f(\mathbf{V}) = dN/N$;
- ე.ი., $f(\mathbf{V})$ გვიჩვენებს მოლეკულების რა ნაწილი მოძრაობს სიჩქარის ერთეულოვან $\{V, V+1\}$ შუალედში;

▪ მაქსველის განაწილების ფუნქცია

$$f(\mathbf{V}) = 4(\pi)^{-1/2} (m/2kT)^{3/2} V^2 e^{-mV^2/2kT} \quad (2.2)$$



✓ უალბათესი V_m სიჩქარე [1] განისაზღვრება აირის ტემპერატურით და სე-ის მასით:

$$V_m = (2kT/m)^{1/2} = (2RT/\mu)^{1/2} \quad (2.3)$$

✓ T-ს ზრდისას მრუდის მაქსიმუმი ინაცვლებს [2] დიდი სიჩქარეებისკენ ($V_{m3} > V_{m1}$), მაქსიმუმი კი დაბლდება ($N = \text{const}$ და S უნდა დარჩეს მუდმივი);

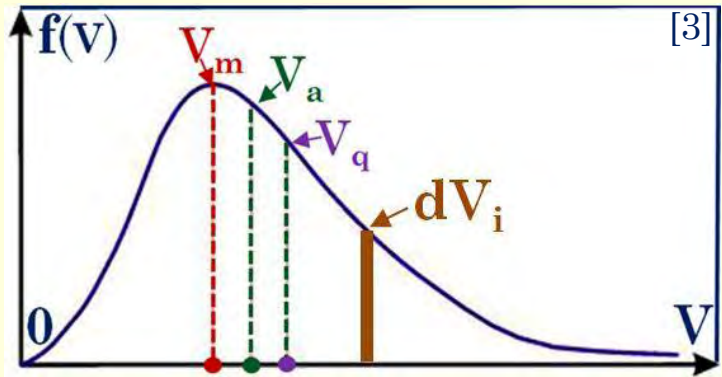
✓ საშუალო არითმეტიკული სიჩქარე:

$$V_a = (8kT/\pi m)^{1/2} = (8RT/\pi \mu)^{1/2} \quad (2.4)$$

✓ საშუალო კვადრატული სიჩქარე

$$V_q = 3kT/m = (3RT/\mu)^{1/2} \quad (2.5)$$

- ✓ გამოდინარე $f(V)$ გრაფიკიდან [1]:
 - $\{V=0\}$ -ს შეესაბამება $f(V)=0$, ანუ უძრავი მოლეკულა არ არსებობს;
 - $f(V)$ -ს მაქსიმუმი განსაზღვრავს V_m უალბათესი სიჩქარის მნიშვნელობას. ამ, ან მისი მახლობელი სიჩქარით მოძრაობს მოლეკულათა უმრავლესობა;
 - საშუალო არითმეტიკულ V_a და კვადრატულ V_q სიჩქარეთა არსებობის ალბათობები (ე.ი., ამ სიჩქარეებით მოძრავი მოლეკულების dN/N ფარდობითი რაოდენობაც) რამდენამდე უფრო მცირეა;
 - მეტად მცირე ძალიან ძალადი ან ძალიან დაბალი სიჩქარით მოძრავი მოლეკულების ფარდობითი წილი;
 - გამოყოფილ dV_i სიჩქარეთა ინტერვალში მოხვედრილი მოლეკულების ფარდობით რიცხვს ასახავს გრაფიკზე შესაბამისი მცირე ოთხკუთხედის S_i ფართობი;
 - გრაფიკით შემოსაზღვრული სრული ფართობი S კი, ცხადია, 1-ის ტოლია;



✓ მაქსველის განაწილების ფუნქციის საფუძველზე შეგვიძლია განვსაზღვროთ იმ მოლეკულების dN რაოდენობა, რომელთა სიჩქარე dV_i შუალედს მიეკუთვნება [3]:

$$dN = Nf(V)dV \quad (2.6)$$

•(2.2) =>(2.6) →

$$dN = 4(\pi)^{-1/2}(\frac{m}{2kT})^{3/2}NV^2\{\exp(-\frac{mV^2}{2kT})\}dV \quad (2.7)$$

3. იდეალური აირის შინაგანი ენერჯია. თავისუფლების ხარისხთა რიცხვი

- ✓ ზოგადად, სხეულის **შინაგანი ენერჯია** რამდენიმე სახის ენერჯიათა ერთობლიობაა:
1. სხეულის შემადგენელი *სე*-ის ქაოსური მოძრაობის კინეტიკური ენერჯიის (*T*-ს პროპორციულია);
 2. *სე*-ის ურთიერთქმედების პოტენციური ენერჯიის (დამოკიდებულია *სე*-ს შორის მანძილზე, ანუ *V* მოცულობაზე);
 3. შიდამოლეკულური ენერჯიის (მოლეკულის შემადგენელი ატომების, იონების, ბირთვების და ა.შ. მოძრაობის და ურთიერთქმედების ენერჯია);

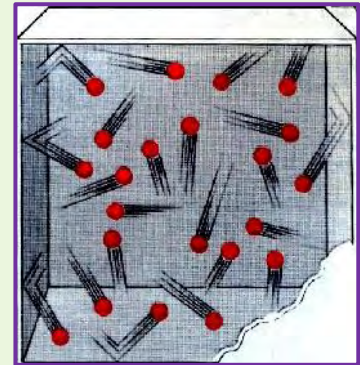
▪ {როგორც წესი} შიდამოლეკულურ მდგენელს უგულებელყოფენ;

▪ **იდეალური აირის** შემთხვევაში:

• {ასევე} უგულებელყოფენ *სე*-ს შორის ურთიერთქმედებას (დაჯახებების გარდა), ანუ **პოტენციური ენერჯია ნულს უტოლდება** ($E_p = 0$);

• *სე* **ნივთიერ წერტილად** განიხილება;

▪ ამდენად, {როგორც წესი} **შინაგანი ენერჯია** წარმოადგენს *სე*-ის **მხოლოდ** გადატანითი მოძრაობის **კინეტიკურ ენერჯიას** $E_k = (3/2)kT$ (3. 1)



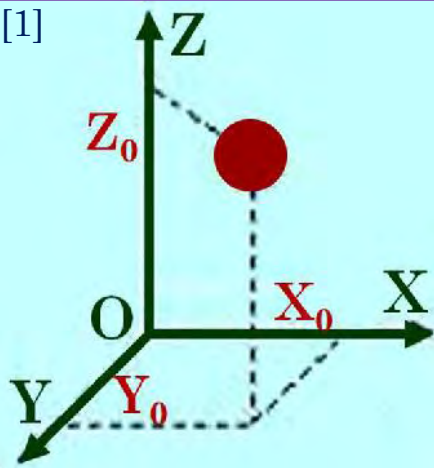
✓ მექანიკური სისტემის მოძრაობას სრულად ახასიათებენ (აღწერენ) დამოუკიდებელი პარამეტრების (განზოგადოებული კოორდინატების) მინიმალურად აუცილებელი რაოდენობით, რომელსაც **თავისუფლების ხარისხთა რიცხვს** (*i*) უწოდებენ;

▪ {განზოგადოებული კოორდინატების მაგალითი:

• ქაღალდზე დახაზული წრეწირის მდებარეობის სრული აღწერა მოითხოვს ცენტრის 2 (*x, y*) კოორდინატის და, ასევე, **R** რადიუსის ცოდნას;

• ამდენად, ამ მაგალითში გამოიყენება **3** განზოგადოებული კოორდინატი.)

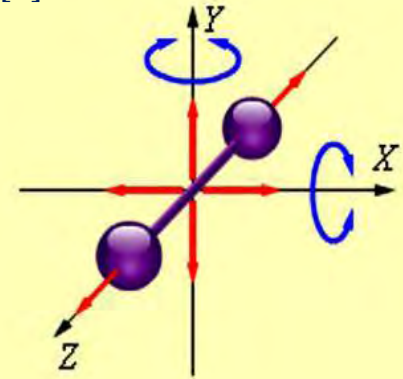
[1]



▪ ერთატომიანი აირის {და ნივთიერი *წერტილის* } თავისუფლების ხარისხთა რიცხვი $i=3$, მათ [1] მხოლოდ გადატანითი მოძრაობა შეუძლიათ;

▪ ბუნებაში აირთა უმრავლესობის მოლეკულა ორატომიანია. თუ მოლეკულა ხისტია (ატომებს შორის მანძილი არ იცვლება), მისი თავისუფლების ხარისხთა რიცხვი $i=5$ [2]. აქედან, 3 გადატანითი მოძრაობის და მხოლოდ 2 ბრუნვითის (ვინაიდან ატომების ცენტრზე გამავალი ღერძის ირგვლივ ბრუნვა არ ხდება);

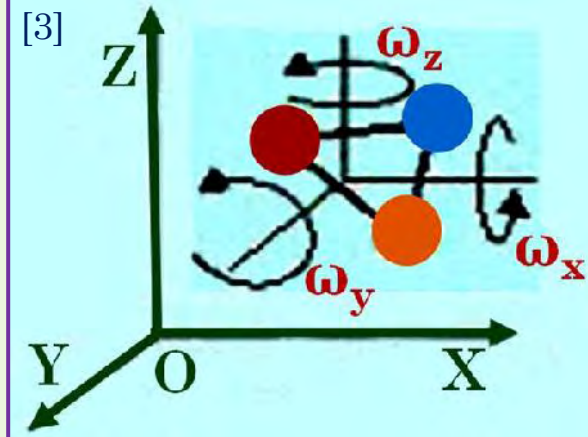
[2]



▪ სამატომიანი მოლეკულისთვის და აბსოლუტურად მყარი სხეულისთვის თავისუფლების ხარისხთა რიცხვი $i=6$ (3 გადატანითი და 3 ბრუნვითი მოძრაობა) [3];

▪ თუ საჭირო ხდება მოლეკულის შიგნით ატომების რხევითი მოძრაობის გათვალისწინება, შესაბამისად გაიზრდება თავისუფლების ხარისხთა რიცხვიც;

[3]



✓ თითოეულ თავისუფლების ხარისხზე განწესებულ ენერჯიის სიდიდეს განსაზღვრავს ბოლცმანის თეორემა:

▪ ტემპერატურაზე სითბურ წონასწორობაში მყოფი სისტემის მოლეკულის თითოეულ თავისუფლების ხარისხზე მოსული კინეტიკური ენერჯია ტოლია

$$E_i = (1/2)kT \quad (3.2)$$

▪ ზოგადად, თუ i თავისუფლების ხარისხთა რიცხვია, მაშინ მოლეკულის სრული კინეტიკური ენერჯია

$$E_k = (i/2)kT \quad (3.3)$$

იდეალური აირის მოლეკულის თავისუფლების ხარისხთა რიცხვი

	მოდრაობა	1-ატომიანი	2-ატომიანი	3-ატომიანი
	გადატანითი	3	3	3
i=	ბრუნვითი		2	3
	სულ	3	5	6

✓ მოლეკულის შემადგენელი ატომების რხევითი მოძრაობის შესაძლებლობისას, მოლეკულის ენერგია kT სიდიდით იზრდება, ვინაიდან ემატება:

$(1/2)kT$ რხევის კინეტიკური ენერგია და

$(1/2)kT$ რხევის პოტენციური ენერგია;

▪ რხევითი მოძრაობის გათვალისწინებით ორატომიანი აირის მოლეკულის სრული შინაგანი ენერგია იქნება

$$U = (7/2)kT \quad (3.4)$$

{ნაცვლად - $E_k = (5/2)kT$ };

▪ 1 მოლი იდეალური აირის შინაგანი ენერგია 1 მოლეკულის კინეტიკური ენერგიის (E_k) და 1 მოლში ატომების რიცხვის (N_A ავოგადროს რიცხვის) ნამრავლით განისაზღვრება:

$$U_\mu = N_A E_k = (i/2)kN_A T = (i/2)RT \quad (3.5)$$

✓ ზოგადად, ν მოლი აირისთვის

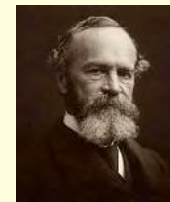
$$U = \nu(i/2)RT = (m/\mu)(i/2)RT \quad (3.6)$$



“ჩვენი გონების კუნჭულებში ჩვენ კარგად გვესმის რა უნდა ვაკეთოთ, მაგრამ ვერა და ვერ ვიწყებთ.” William James

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1842 - 1910



სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 3

თემა:

სემესტრი II

აირის კინეტიკური თეორია

88·

022

1. აირის სითბოტევადობა. მაიერის ფორმულა

025

2. ბოლცმანის და მაქსველ-ბოლცმანის განაწილება

1. აირის სითბოტევადობა. მაიერის ფორმულა

✓ m მასის სხეულის {აირის} ტემპერატურის ΔT -თი გასაზრდელად მას უნდა გადაეცეს ენერგია - სითბოს რაოდენობა $Q = cm\Delta T$ (1.1)

▪ **ნივთიერების** სითბურ თვისებებს ახასიათებს c **კუთრი სითბოტევადობა** - ერთეულოვანი მასის 1K-ით გასათბობად საჭირო სითბოს რაოდენობა;

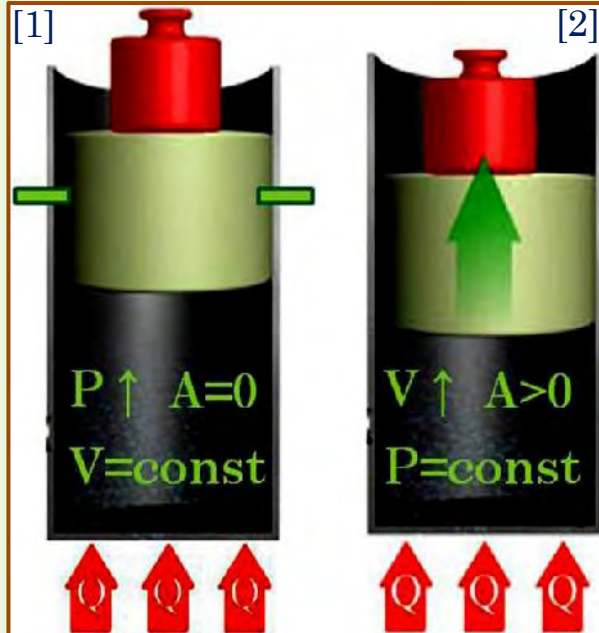
$$[c] = [Q]/[m][T] = 1\text{ჯ}/\text{კგK};$$

▪ $C = cm$ - **სითბოტევადობა**, ახასიათებს სხეულის სითბურ თვისებებს და ამ სხეულის 1K-ით გასათბობად საჭირო სითბოს რაოდენობას განსაზღვრავს.

$$[C] = [c][m] = 1\text{ჯ}/\text{K};$$

▪ $C_\mu = c\mu$ - **მოლური სითბოტევადობა**, რიცხობრივად ნივთიერების 1 მოლის 1K-ით გათბობას მოხმარებულ სითბოს რაოდენობას უტოლდება.

$$[C_\mu] = [c][\mu] = (1\text{ჯ}/\text{კგK}) (1\text{კგ}/\text{მოლი}) = 1\text{ჯ}/\text{მოლიK};$$



✓ აირის შემთხვევაში, წარმოდგენილი სითბური მახასიათებლების სიდიდე აირის მდგომარეობაზეც არის დამოკიდებული {გათბობა ხდება **მუდმივი მოცულობისას**, თუ **მუდმივი წნევისას**};

▪ ცილინდრში დეჟში დამაგრებულია [1], $V=\text{const}$. აირი თბება, წნევა იზრდება, მაგრამ აირი ვერ ფართოვდება, ანუ **მუშაობა არ სრულდება** ($A=0$). **მთელი** მიღებული სითბო აირის მხოლოდ შინაგანი ენერგიის {ტემპერატურის} ზრდას ხმარდება;

• ერთი მოლი ($m=\mu$) აირისას და $V=\text{const}$ პირობებში:

$$Q_{v\mu} = c\mu\Delta T = C_{v\mu}\Delta T \quad (1.2)$$

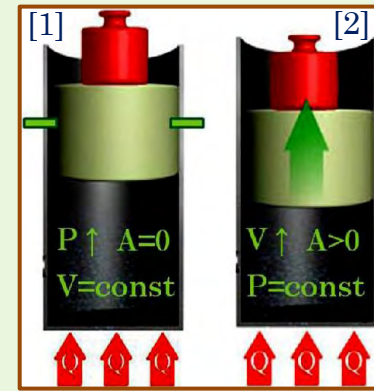
{(1.2), (2.3.5)} \rightarrow

$$C_{v\mu} = Q/\Delta T = \Delta U_{v\mu}/\Delta T = \{[(i/2)R(T+\Delta T)] - (i/2)RT\}/\Delta T = (i/2)R \quad (1.3)$$

- უწონო დგუში ცილინდრში დამაგრებული არ არის [2]. აირი თბება და ფართოვდება. დგუში იწევს ზემოთ (ხახუნის გარეშე) და წნევა რჩება უცვლელი $P = \text{const}$;
- გადაცემული სითბო

$$Q_{p\mu} = C_{p\mu} \Delta T \quad (1.4)$$

ხმარდება აირის გათბობას {შინაგანი ენერჯიის ზრდას} და დგუშის გადასადგილებლად მუშაობის შესრულებას, ე.ი. $Q_{p\mu} > Q_{v\mu}$ (1.5)



- იდეალური აირის *სე არ ურთიერთქმედებენ*, ე.ი. მოცულობის ცვლილება შინაგან ენერჯიაზე გავლენას არ ახდენს და სითბოს რაოდენობათა (1.5) განსხვავებას შესრულებული მუშაობა განსაზღვრავს

$$Q_{p\mu} - Q_{v\mu} = A \quad (1.6) \quad \rightarrow \quad (C_{p\mu} - C_{v\mu}) \Delta T = A \quad (1.7)$$

✓ იდეალური აირის (1.3.10) მდგომარეობის განტოლებიდან:

$$A = P \Delta V = (m/\mu) R \Delta T \quad (1.8) \quad \rightarrow \quad R = A / \{(m/\mu) \Delta T\} \quad (1.9)$$

▪ 1 მოლი ($m=\mu$) აირისას $A = R \Delta T$ (1.10) $\rightarrow R = A / \Delta T$ (1.11)

• აირის უნივერსალური მუდმივა R იმ მუშაობის ტოლია, რომელსაც ასრულებს 1 მოლი იდეალური აირი 1K-ით იზობარული გათბობისას;

▪ (1.10) \Rightarrow (1.7) \rightarrow

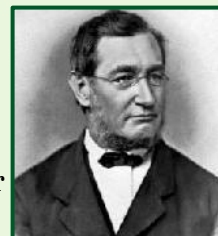
$$C_{p\mu} - C_{v\mu} = R \quad (1.12)$$

მაიერის თანაფარდობა

$$\text{და } C_{p\mu} = C_{v\mu} + R \quad (1.13)$$

$$\{(1.13) C_{v\mu} = (i/2) R\} \Rightarrow (1.13) \rightarrow$$

$$C_{p\mu} = (i/2) R + R = [(i+2)/2] R \quad (1.14)$$



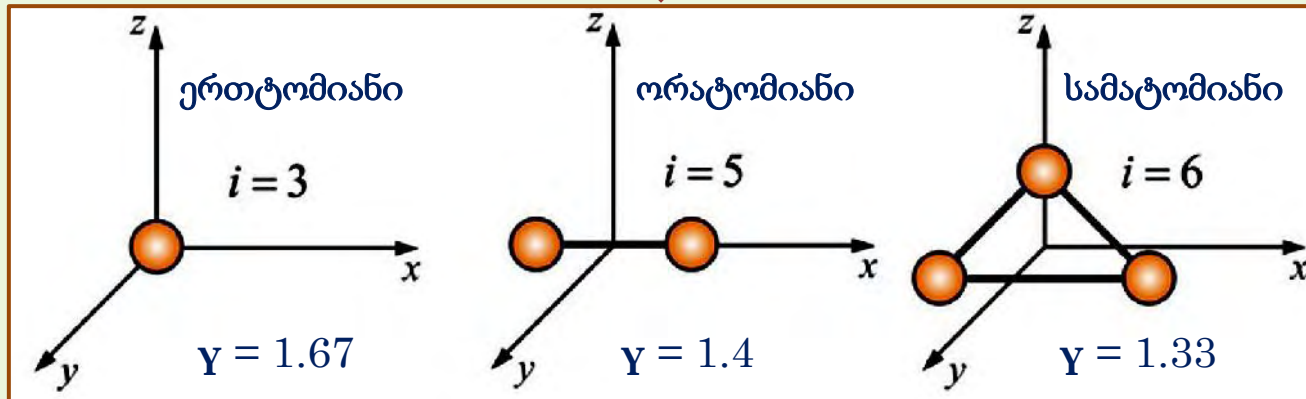
J. von Mayer
(1814-1878)

✓ აირის ერთერთი ძირითადი სითბური მახასიათებელია γ -სითბოტევადობათა ფარდობა და $\{(1.3), (1.14)\} \rightarrow$

$$\gamma = C_{p\mu} / C_{v\mu} = (i+2)/i \quad (1.15)$$

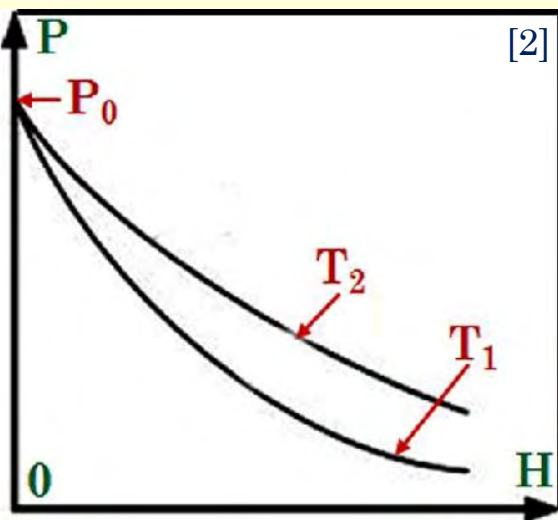
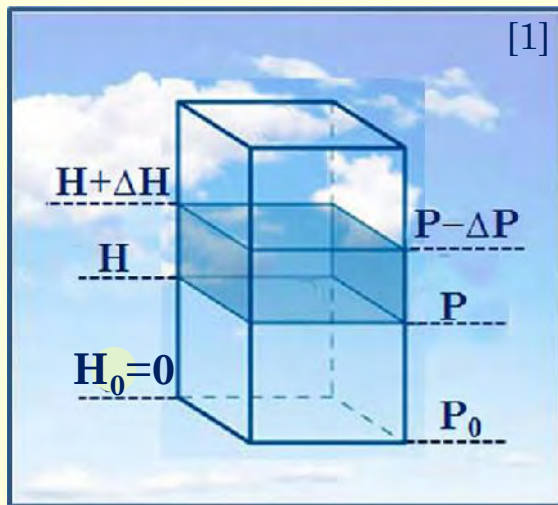
▪(1.15) $\rightarrow \gamma$ -ს რიცხვით მნიშვნელობას აირის მოლეკულის თავისუფლების ხარისხთა რიცხვი {მოლეკულის აღნაგობა} განსაზღვრავს:

- ერთატომიანი მოლეკულა - $i=3$, $\gamma= 1.67$;
- ორატომიანი მოლეკულა - $i=5$, $\gamma= 1.4$;
- სამი და მრავალატომიანი მოლეკულა - $i=6$, $\gamma= 1.33$;



2. ბოლცმანის და მაქსველ-ბოლცმანის განაწილება

✓ იდეალურ აირში, თუ ის გარეშე ველების ზემოქმედებას **არ** განიცდის და წონასწორულ პირობებშია ($T = \text{const}$), ყველგან ერთნაირია: 1. მოლეკულების კონცენტრაცია ($n = \text{const}$); 2. აირის წნევა (ის სიმაღლისგან დამოუკიდებელია);



✓ სიმძიმის ძალის **გათვალისწინებით** {რეალური} აირის:

- წნევა P ,
- სიმკვრივე ρ ,
- მოლეკულების კონცენტრაცია n

ხდება აირის სვეტის H სიმაღლეზე **დამოკიდებული**:

$$P = P_0 \exp\{-\mu g(H - H_0)/RT\} \quad (2.1)$$

$$\{\mu = m_0 N_A; R = k N_A\} \Rightarrow (2.1) \rightarrow P = P_0 \exp\{-m_0 g(H - H_0)/kT\} \quad (2.2)$$

$$\rho = \rho_0 \exp\{-\mu g(H - H_0)/RT\} \quad (2.3)$$

$$n = n_0 \exp\{-m_0 g(H - H_0)/kT\} \quad (2.4)$$

{(2.1)-(2.4)-ში: μ - აირის მოლური მასა; m_0 - აირის მოლეკულის მასა; n_0 - აირში H_0 სიმაღლეზე (ნულოვან დონეზე [1]) მოლეკულების კონცენტრაცია; R - აირის უნივერსალური მუდმივა; k - ბოლცმანის მუდმივა};

▪ (2.1)-(2.3) ფორმულებს უწოდებენ **ბარომეტრულ ფორმულებს**;

▪ რაც უფრო *მძიმეა* აირი და *დაბალია* ტემპერატურა მით უფრო სწრაფად [2] მცირდება წნევა P და სიმკვრივე ρ სიმაღლის მატებისას. სისწრაფეს კი განსაზღვრავს მოლეკულის პოტენციური $\{m_0 g H\}$ და კინეტიკური $\{k T\}$ ენერგიების ფარდობა (2.2);

▪ ამდენად, აირთა **ნარევი**ში სხვადასხვა მასის მოლეკულები სიმაღლის მიხედვით **განსხვავებული** განაწილებით ხასიათდებიან;

▪(2.4) წარმოადგენს **ბოლცმანის განაწილებას**, ანუ კონცენტრაციის განაწილებას $m_0gh=U_p$ მექანიკური პოტენციური ენერჯიის მიხედვით. თუმცა, ის სამართლიანია ნებისმიერ **პოტენციურ** ძალთა ველში:

$$n = n_0 \exp\{-U_p/kT\} \quad (2.5)$$

▪(2.5) $\Rightarrow n=n_0$, ანუ კონცენტრაცია ყველგან ერთნაირია, თუ $U_p=0$ (რაც იდეალური აირის ერთერთი მახასიათებელია);

▪კონცენტრაციისთვის მაქსველის განაწილების ფუნქციის საფუძველზე ადრე ჩაწერილ (2.2.7) ფორმულაში

$$dn = 4(\pi)^{-1/2}(m_0/2kT)^{3/2}n_0V^2\{\exp(-m_0V^2/2kT)\}dV \quad (2.6)$$

გამოვიყენოთ n -თვის (2.5) ბოლცმანის $n=n_0 \exp\{-U_p/kT\}$ განაწილება:

$$dn = 4(\pi)^{-1/2}(m_0/2kT)^{3/2}n_0\{\exp(-U_p/kT)\}V^2\{\exp(-m_0V^2/2kT)\}dV \quad (2.7)$$

•(2.7)-ში U_p პოტენციური და $m_0V^2/2$ კინეტიკური ენერჯიათა ჯამი მოლეკულის U სრული შინაგანი ენერჯია $U = U_p + m_0V^2/2$ (2.8)

•(2.8) \Rightarrow (2.7) $\Rightarrow dn = 4(\pi)^{-1/2}(m_0/2kT)^{3/2}n_0V^2\{\exp(-U/kT)\}dV$ (2.9)

✓(2.7) და (2.9) თანაფარდობები გამოსახავენ მაქსველ-ბოლცმანის განაწილების კანონს, რომელიც განსაზღვრავს იმ მოლეკულათა კონცენტრაციას, რომელთა პოტენციური ენერჯიაა U_p , ხოლო სიჩქარე ეკუთვნის $\{V, V+dV\}$ შუალედს;



“ცხოვრება არის ის, რაც შენს თავს ხდება, სანამ შენ სხვა გეგმებს აწყობ.” Jhon Lennon

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1940 - 1980



სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 4

თემა:

სემესტრი II

რეალური აირი. თერმოდინამიკის კანონები

ზზ.

028

1.რეალური აირი. ვან-დერ-ვაალსის განტოლება. იზოთერმები. ენერგია

031

2.თერმოდინამიკის I კანონი

033

3.თერმოდინამიკის I კანონი იდეალური აირის იზო- და ადიაბატურ პროცესებში

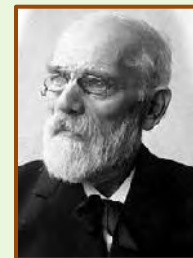
1.რეალური აირი. ვან-დერ-ვაალსის განტოლება. იზოთერმები. ენერგია

✓ იდეალურია აირი, რომლის ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედება უგულებელყოფილია, ნაწილაკები კი ნივთიერ წერტილებად განიხილება;

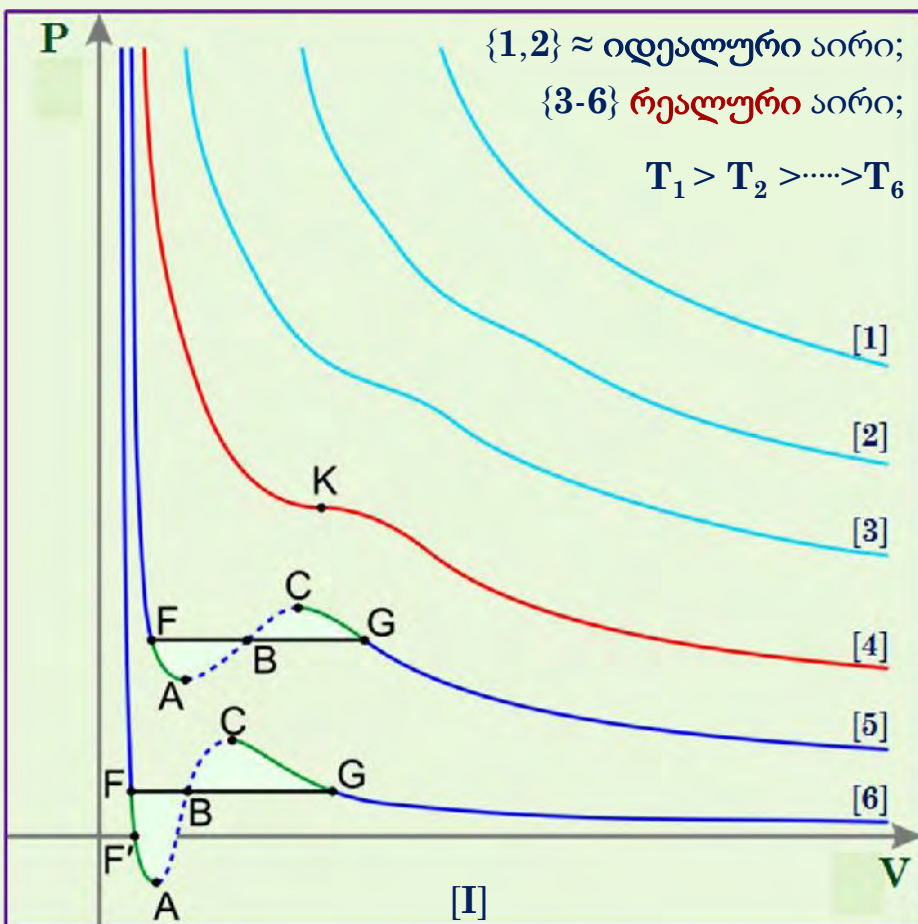
▪ მისი მდგომარეობა აიწერება კლასპეირონ-მენდელეევის განტოლებით $PV=(m/\mu)RT$ (1.1)

✓ რეალური აირის ნაწილაკები ურთიერთქმედებენ და გარკვეული მოცულობაც გააჩნიათ;

▪ ტემპერატურათა ფართო ინტერვალში რეალური აირის მდგომარეობა აღარ აიწერება კლასპეირონ-მენდელეევის განტოლებით [I];



J. van der Waals
(1837-1923)



✓ ვან-დერ-ვაალსმა კლასპეირონ-მენდელეევის განტოლებაში ჩაამატა **ორი** წევრი:

1. a/V^2 - ითვალისწინებს მოლეკულათა შორის მიზიდულობის შედეგად წნევის ნაზრდს;
2. b - ასახავს მოლეკულების მოცულობის არსებობასა და ურთიერთგანზიდვას მცირე მანძილებზე;

▪ $v=m/\mu$ ნივთიერების რაოდენობის აირისთვის:

$$\{P + v^2 a/V^2\} \cdot \{V - vb\} = vRT \quad (1.2)$$

▪ ერთი მოლი ($v=1$) აირისთვის:

$$\{P + a/V_\mu^2\} \cdot \{V_\mu - b\} = RT \quad (1.3)$$

• კონკრეტული აირის a და b კონსტანტები ცდების საფუძველზე შეირჩევა;

✓რეალური აირის ტემპერატურის ზრდასთან ერთად, იზოთერმების ჰიპერბოლური სახე მახინჯდება [II] და PV დამოკიდებულებაზე ჩნდება გადაღუნვის **K** (კრიტიკული) წერტილი. მასთან დაკავშირებული ცნებებია:

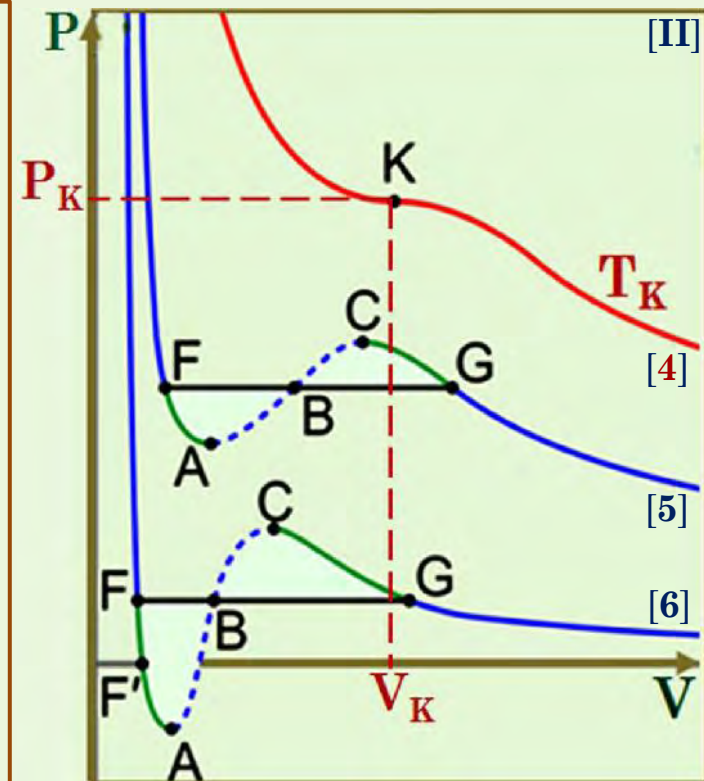
1. იზოთერმის შესაბამისი **T_k** კრიტიკული ტემპერატურა;

2. **V_k** კრიტიკული მოცულობა; 3. **P_k** კრიტიკული წნევა;

▪ **კრიტიკულია** ტემპერატურა: 1. რომელზეც P წნევის გაზრდით აირი მყისიერად **სითხედ** იქცევა; 2. რომლის ზემოთ $\{T > T_k\}$ წნევის **ზრდით** აირი **ადარ** გათხევადდება;

▪ **კრიტიკულია** ნივთიერების ისეთი მდგომარეობა (წერტილი **K** [II]), როდესაც ისპობა ყოველგვარი **განსხვავება** სითხესა და მის ორთქლს შორის $\{T_k$ -მდე გაცივებით და წნევის გაზრდით შესაძლებელია აირის გათხევადება};

▪ აირი: 1. უჯერია, თუ მისი წნევა **იზრდება** მოცულობის შემცირებით; 2. ნაჯერია, თუ P **დამოუკიდებელია** V-გან;



✓ გრაფიკის [II] მნიშვნელოვანი წერტილები და მონაკვეთებია:

▪ G-ს მარჯვნივ უჯერი აირია (G - **ნამის წერტილია**);

▪ CG - გადაცივებული აირი (მეტასტაბილური მდგომარეობა). **არ** კონდენსირდება:

• ვინაიდან **არ** არის სითხესთან შეხებაში;

• მაღალი **სისუფთავის** წყალობით;

▪ AC - ფიზიკურად **განუხორციელებელი** მდგომარეობა (**ანალიტიკური** შედეგი);

▪ F'A - “გაჭიმული” სითხე, ანუ სითხე **უარყოფითი** წნევით ($P < 0$). (მეტასტაბილური მდგომარეობა). მას განაპირობებენ **ვან-დერ-ვაალსის** მიზიდულობის ძალები, რომლებიც მოქმედებენ: 1. მოლეკულებს შორის; 2. მოლეკულებსა და ჭურჭლის კედლებს შორის {მაგალითები: ტორიჩელის ცდა, თერმომეტრი სიციხის გაზომვისას};

- FA - გადახურებული, ანუ დუდილის ტემპერატურაზე მეტი ტემპერატურის სითხე (მეტასტაბილური მდგომარეობა). მიზეზი - დუდილის სასტარტო პირობების შეუსრულებლობა (ვთქვათ - არ არსებობენ აირის ბუშტუკები);
- F - დუდილის წერტილი. F-ს მარცხნივ “ნორმალური” სითხეა;

✓ იდეალური აირის მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედება უგულებელყოფილია, ე.ი. თითოეულ მოლეკულას და მთლიანად აირს გააჩნიათ მხოლოდ {შინაგანი} კინეტიკური ენერჯია:

$$E_k = (i/2)kT \quad (1.4);$$

$$\{1 \text{ მოლი}\} U_{\mu k} = N_A(i/2)kT = (i/2)RT \quad (1.5)$$

$$\{v \text{ მოლი}\} U_k = v(i/2)RT \quad (1.6)$$

▪ იზოლირებულ პირობებში შინაგანი ენერჯია არ იცვლება: $\Delta U = 0 \Rightarrow \Delta T = 0$;

✓ რეალური აირის მოლეკულები ურთიერთქმედებენ, ანუ აირს გააჩნია {მოცულობაზე დამოკიდებული} შინაგანი პოტენციური U_p ენერჯია;

▪ რეალური აირის {1 მოლის} სრული შინაგანი ენერჯია: $U_{\mu} = (i/2)RT + U_{\mu p} \quad (1.7)$

▪ იზოლირებულ პირობებში $\{U_{\mu} = \text{const}, \Delta U = 0\}$:

$$(1.7) \Rightarrow (i/2)RT + U_{\mu p} = 0 \quad (1.8)$$

• ე.ი. U_p -ს შეცვლა უნდა იწვევდეს T-ს ცვლილებას (ცდით დამტკიცებული ჯოულ-ტომსონის ეფექტი);

✓ T-ს ცვლილების ნიშანი დამოკიდებულია {კონკრეტული ცდის პირობებში} მიზიდვა-განზიდვის პრიორიტეტზე;

▪ პროცესს ახასიათებენ η_{JT} - ჯოულ-ტომსონის კოეფიციენტით:

$$\eta_{JT} = (C_p)^{-1} [T(\partial V / \partial T)_P - V] \quad (1.9)$$

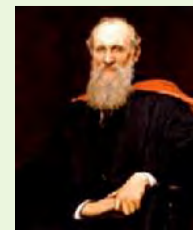
▪ $\eta_{JT} = 0$ - იდეალური აირი;

▪ $\eta_{JT} < 0$ - უარყოფითი ეფექტი. აირის “დროსელირებისას” {ნელი გაფართოება წნევის ნელი შემცირებისას, სპეციალურ ტიხარში მისი სუსტი გაჟონვით} T იზრდება;

▪ $\eta_{JT} > 0$ - დადებითი ეფექტი. აირის “დროსელირებისას” T მცირდება {მაშინვე ჰჰოვა გამოყენება დაბალი ტემპერატურების მისაღებად};



J. Joule
1818-1889



W. Thomson
(Kelvin)
1824-1907

2. თერმოდინამიკის I კანონი

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

▪ ოპერირებს წონასწორობი მდგომარეობის მახასიათებლი რამდენიმე პარამეტრით:

• **T** ტემპერატურით, რომლის მნიშვნელობათა ტოლობა სისტემის ყველა ნაწილისთვის თერმოდინამიკური წონასწორობის აუცილებელი პირობაა;

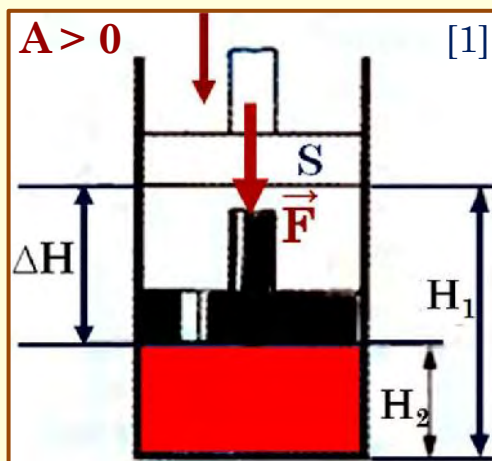
• **V** მოცულობით, **P** წნევით, **U** შინაგანი ენერჯით;

▪ ეფუძნება 3 კანონს (თერმოდინამიკის **I**, **II**, **III** კანონებს);

✓ **იზოლირებულ** თერმოდინამიკურ სისტემაში {სისტემის სხეულები არ ურთიერთქმედებენ სისტემის გარეთ მყოფ სხეულებთან} დროთა განმავლობაში, თავისთავად და აუცილებლად მყარდება თერმოდინამიკური წონასწორობა;

▪ იზოლირებული სისტემის შეგნით მიმდინარე ნებისმიერი პროცესებისას, სისტემის შინაგანი ენერჯია, რჩება მუდმივი $U = \text{const}$, $\Delta U = 0$ (ენერჯიის მუდმივობის კანონი თერმოდინამიკაში);

▪ თერმოდინამიკა შინაგან ენერჯიას 2 მაკროსკოპული პარამეტრის $U(T, V)$ ფუნქციით აღწერს;

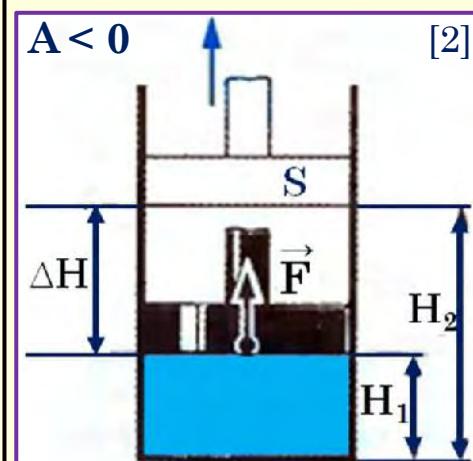


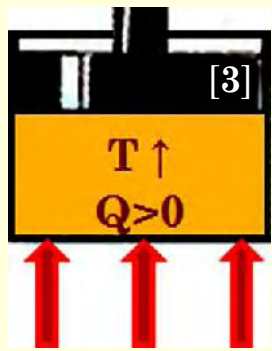
▪ $U(T, V)$ ფუნქციის {არგუმენტების} შესაბამისად, შინაგანი ენერჯიის ცვლილება ორი ტიპის ზემოქმედებითაა შესაძლებელი:

1. მუშაობის შესრულებით სხეულის (აირის) შეკუმშვით [1] ან გაფართოებით [2]

$$\Delta U = A \quad (2.1)$$

იკვლება მოცულობა (ნაწილაკებს შორის მანძილი) და, შედეგად, შინაგანი **პოტენციური ენერჯია**;

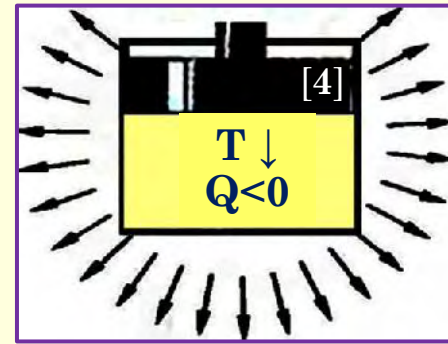




2. სითბოგადაცემით {სითბოგადაცემა - სხეულებს შორის შინაგანი ენერგიის ურთიერთგაცვლა მუშაობის შესრულების გარეშე} ე.ი., გათბობით [3] ან გაცივებით [4];

▪ **სითბოგადაცემისას** შინაგანი ენერგიის ცვლილების (მატების, თუ შემცირების) ზომად მიჩნეულია სითბოს რაოდენობა Q

$$\Delta U = Q \quad (2.2)$$



▪ **ორივე** პროცესის (*მუშაობა, სითბოგადაცემა*) გათვალისწინებით {(2.1),(2.2)} $\Rightarrow \Delta U = (\pm)Q + (\pm)A \quad (2.3)$

• **თერმოდინამიკის I კანონი:**

სისტემის შინაგანი ენერგიის ნაზრდი მასზე {მის მიერ} შესრულებული მუშაობისა და მისთვის გადაცემული {მის მიერ გაცემული} სითბოს რაოდენობის ჯამის ტოლია;

▪ თუ $Q > 0$, ის შეიძლება მოხმარდეს *სხეულის* მიერ მუშაობის შესრულებასაც, (1.3) $\Rightarrow Q = \Delta U + A \quad (2.4)$
სისტემისთვის მიწოდებული სითბოს რაოდენობა ხმარდება შინაგანი ენერგიის ზრდას და სისტემის მიერ მუშაობის შესრულებას;

▪ **სითბოგადაცემის** სამი სახე:
1. თბოგამტარობა - სითბოს ისეთი გადაცემა, რომელიც არ არის დაკავშირებული სხეულში *ნაწილაკების* გადაადგილებასთან;

2. კონვექცია - სითბოს გადაცემას ცხელი ფენების ნაკადი უზრუნველყოფს;

3. გამოსხივება - სითბოს გადაცემა ელექტრომაგნიტური ტალღების მეშვეობით;

▪ თუ სისტემას სითბო არ მიეწოდება { $Q=0$ }, სისტემა კი მუშაობას ასრულებს, მაშინ:

$$(2.4) \Rightarrow 0 = \Delta U + A \Rightarrow A = -\Delta U \quad (2.5)$$

მუშაობა სრულდება შინაგანი ენერგიის შემცირების ხარჯზე !!!

პროცესი *შეწყდება*, რადგან $\Delta U \rightarrow 0$;

▪ **არ არსებობს** ძრავა, რომელიც იმუშავეს ენერგეტიკული დანახარჯის გარეშე, I გვარის “მუდმივი” ძრავა {perpetuum mobile} **არ არსებობს !**

3. თერმოდინამიკის I კანონი იდეალური აირის იზო- და ადიაბატურ პროცესებში

$$Q = \Delta U + A$$

$$\checkmark \text{ იზოთერმული - } T = \text{const, ე.ო. } U = \text{const, } \Delta U = 0 \rightarrow Q = A \quad (3.1)$$

$$\checkmark \text{ იზოქორული - } V = \text{const, ე.ო. } \Delta V = 0, A = 0 \rightarrow Q = \Delta U \quad (3.2)$$

$$\checkmark \text{ იზობარული - } P = \text{const, ე.ო. } A = P\Delta V \rightarrow Q = \Delta U + P\Delta V \quad (3.3)$$

$$\checkmark \text{ ადიაბატური - } Q = \text{const} = 0 \text{ (თბოიზოლირებული სისტემა, სითბოცვლა არ ხდება), (2.5) } \rightarrow A = -\Delta U$$

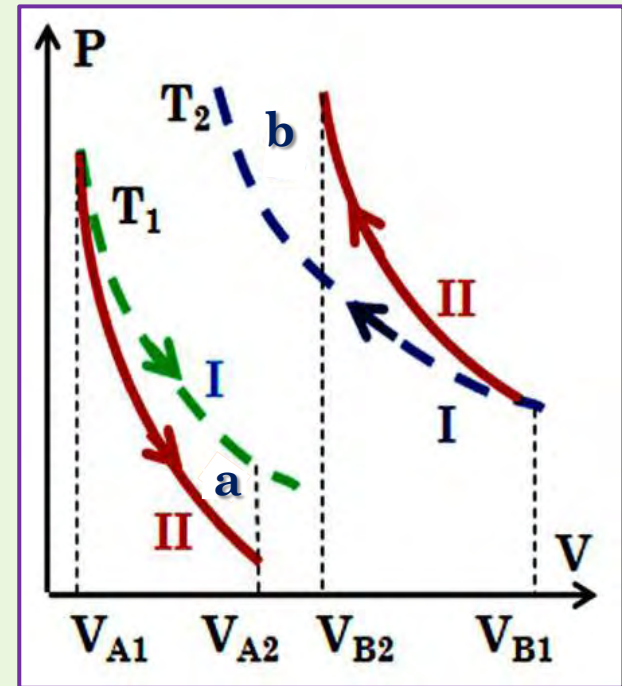
- მალიან სწრაფი პროცესები - ადიაბატური პროცესებია;
- ადიაბატური გაფართოებისას [a] აირის ტემპერატურა მცირდება, ამიტომ წნევა იზოთერმულ [I] პროცესთან შედარებით უფრო სწრაფად მცირდება [II];
- ადიაბატური შეკუმშვისას [b] აირის ტემპერატურა იზრდება, ამიტომ წნევა იზოთერმულ [I] პროცესთან შედარებით უფრო სწრაფად იზრდება [II];
- იზოთერმული პროცესის (ბოილ-მარიოტის) $PV = \text{const}$ კანონი იცვლება ადიაბატურისთვის პუასონის განტოლებით:

$$PV^\gamma = \text{const} \quad (3.4)$$

$$\gamma \text{ -სითბოტევადობათა ფარდობაა } \gamma = C_{p\mu} / C_{v\mu} = (i+2)/i$$

- მსგავსია კავშირი ტემპერატურასა და მოცულობას შორის:

$$TV^{\gamma-1} = \text{const} \quad (3.5);$$





“როდესაც არწივები დუმან, ლაყბობენ თუთიყუშები.” Winston Churchill



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1874 - 1965

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 5

თემა:

სემესტრი II

თერმოდინამიკის კანონები

88·

035

1.სითბური ძრავა (ციკლი, მქკ). თერმოდინამიკის II კანონი

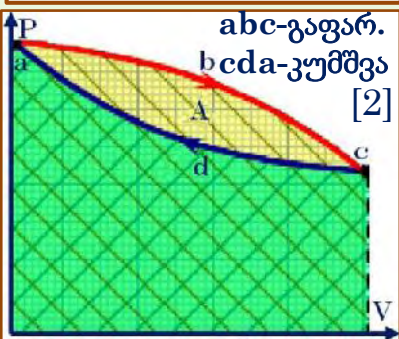
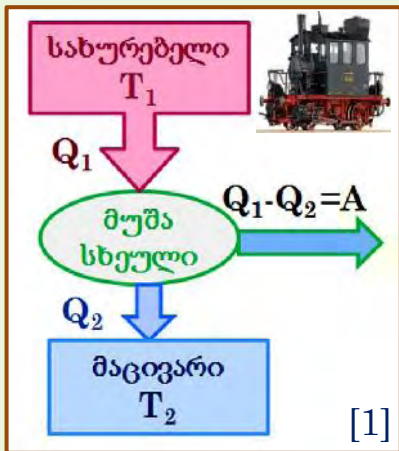
036

2.შექცევადი და შეუქცევადი პროცესები. კარნოს ციკლი

038

3.ენტროპია. თერმოდინამიკის III კანონი

1.სითბური ძრავა (ციკლი, მქკ). თერმოდინამიკის II კანონი



✓სითბური ძრავა საწვავის შინაგან ენერგიას გარდაქმნის **მექანიკურ ენერგიად** [1];

▪სითბურ ძრავას ახასიათებს მოქმედების პერიოდულობა. მიმდინარე პროცესი ციკლურად მეორდება [2]. პროცესის ნებისმიერი ერთი ციკლი მოიცავს შემდეგ ეტაპებს:

▪ T_1 - ტემპერატურის სახურებლიდან Q_1 სითბოს რაოდენობა მიეწოდება “მუშა სხეულს” – აირს, ორთქლს;

▪აირის ტემპერატურა იზრდება, ის ფართოვდება [2 abc] და ასრულებს **A მუშაობას**, რომელსაც ხმარდება მიღებული სითბოს **ნაწილი** ($Q_1 - Q_2$);

▪მუშა სხეული, მუშაობის შესრულების უნარის აღსადგენად, უნდა დაბრუნდეს [2 cda] საწყის მდგომარეობაში (გაცივდეს). ამისთვის არსებობს დაბალი T_2 ტემპერატურის “მაცივარი”, რომელსაც გადაეცემა აირის **ნარჩენი** (ჭარბი) შინაგანი ენერგია (Q_2 სითბოს სახით);

✓სითბური ძრავის **მქკ** (η) განისაზღვრება ძრავის მიერ შესრულებული **მუშაობის** ფარდობით სახურებლიდან მიღებულ Q_1 სითბოს რაოდენობასთან:

$$\eta = A/Q_1 = (Q_1 - Q_2)/Q_1 = 1 - Q_2/Q_1 \quad (1.1)$$

▪ η მქკ ერთზე ნაკლებია **ყოველთვის**. რეალური სითბური ძრავის $\eta = 0.2-0.4$;

▪სითბური ძრავის მოქმედება სრულ შესაბამისობაშია **თერმოდინამიკის II კანონთან**:

•**არ არსებობს** სითბური ძრავა, რომელიც სახურებლიდან მიღებულ **მთელ** სითბოს რაოდენობას **მუშაობად** გარდაქმნის (კელვინის პრინციპი);

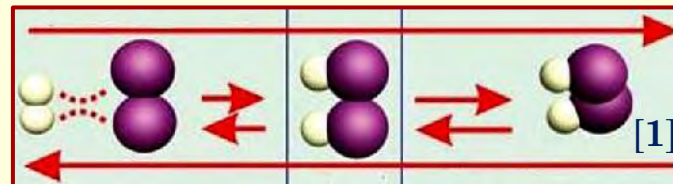
•შეუძლებელია სითბო **თავისთავად** გადაეცეს **ცივი** სხეულიდან **ცხელ** სხეულს (კლაუზიუსის პრინციპი);

2. შექცევადი და შეუქცევადი პროცესები. კარნოს ციკლი

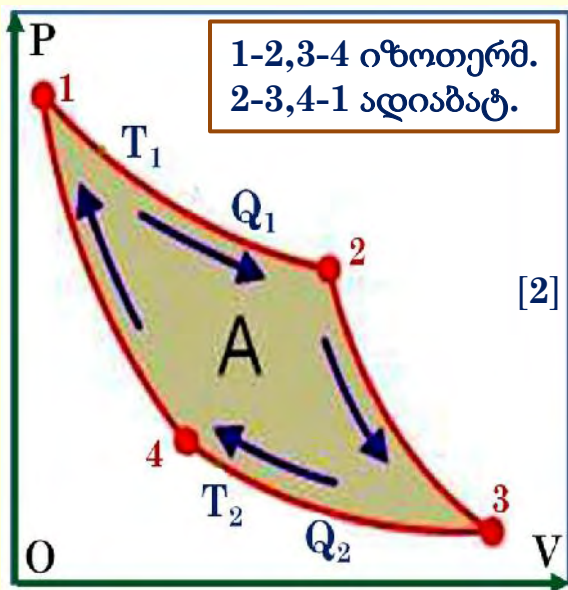
✓ შექცევადი ეწოდება პროცესს, რომელიც შესაძლებელია მიმდინარეობდეს როგორც პირდაპირი, ასევე შებრუნებულ მიმართულებით. თანაც:

▪ შებრუნებული პროცესისას სისტემა თანმიმდევრულად გადის ყველა იმ შუალედურ მდგომარეობას, რომელიც გაიარა პირდაპირი პროცესის დროს [1];

▪ სისტემა უბრუნდება საწყის მდგომარეობას ისე, რომ გარემომცველ სხეულებში არავითარი ცვლილება არ ხდება;



✓ პროცესი შეუქცევადია, თუ პროცესის შექცევადობის პირობები არ სრულდება (მაგ. ხახუნის არსებობისას);



1-2,3-4 იზოთერმ.
2-3,4-1 ადიაბატ.

✓ შექცევადი სითბური ძრავა თეორიულად შეისწავლა კარნომ (კარნოს ციკლი);

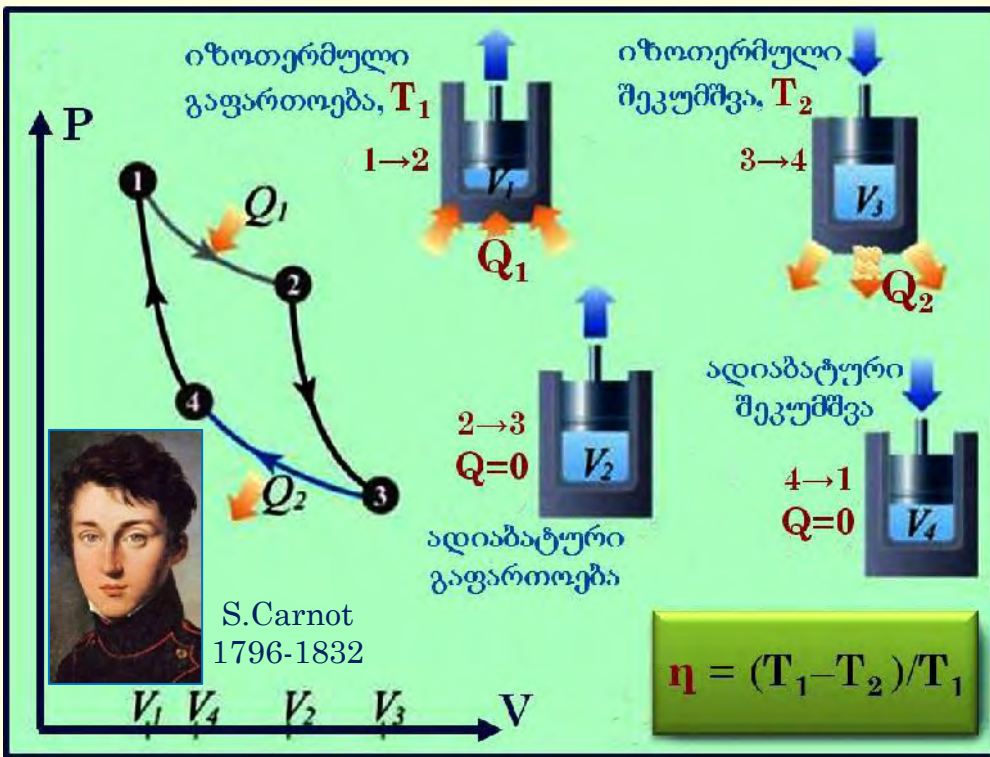
▪ კარნოს ციკლი შეიცავს 2 იზოთერმულ და 2 ადიაბატურ პროცესს [2];

▪ მუშაობა სრულდება ორივე - იზოთერმული და ადიაბატური პროცესებისას;

▪ მაგრამ, ადიაბატურ უბნებზე სრულდება ტოლი და საპირისპირო ნიშნის მუშაობა. ე.ი., მუშაობა ამ უბნებზე პროცესის საბოლოო ენერგეტიკულ ბალანსში არ აისახება;

▪ კარნოს ციკლით მომუშავე {იდეალური} სითბური მანქანის მქვ არაა დამოკიდებული გამოყენებული მუშა სხეულის ნივთიერებაზე და განისაზღვრება მხოლოდ სახურებლისა T_1 და მაცივრის T_2 ტემპერატურებით:

$$\eta = (Q_1 - Q_2)/Q_1 = (T_1 - T_2)/T_1 \quad (2.1)$$

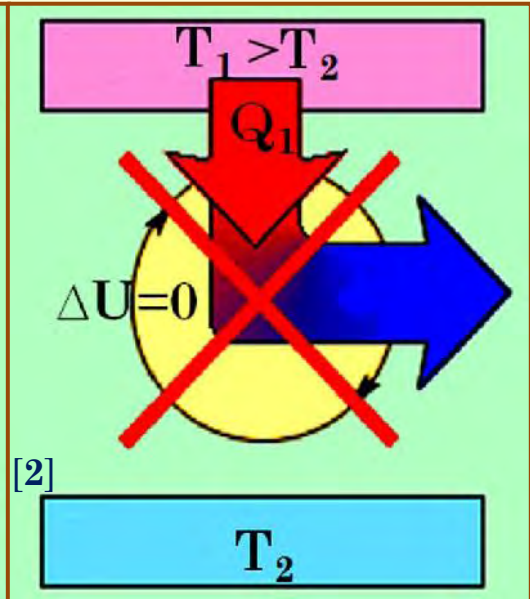
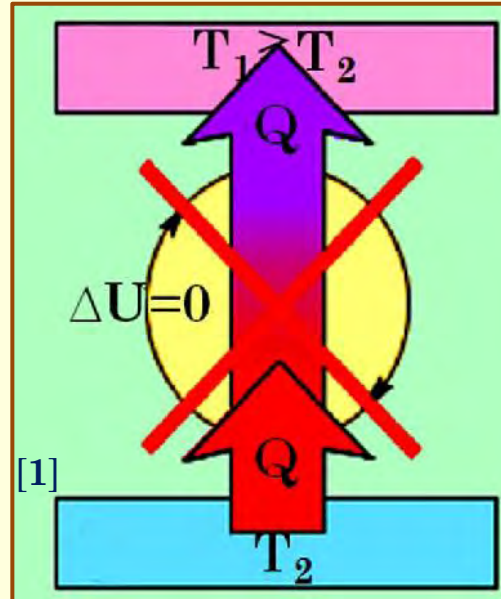


✓ თავისთავად მიმდინარე სითბური პროცესები შეუქცევადი პროცესებია, რადგან:

- შეუძლებელია:
 - სითბო ცივი სხეულიდან ცხელს გადაეცეს [1];
 - ისეთი სითბური მანქანის აგება, სადაც სითბოს ნაწილი არ მიაქვს მაცივარს [2];

✓ ამრიგად, შეუძლებელია ისეთი პერიოდულად მოქმედი მანქანის არსებობა, რომლის ერთადერთი შედეგი იქნებოდა მუშაობის შესრულება სითბოს ერთი წყაროს გაცივების ხარჯზე {თერმოდინამიკის II კანონის პლანკის და კელვინის ფორმულირება}

II გვარის მუდმივი ძრავა არ არსებობს!



3.ენტროპია. თერმოდინამიკის III კანონი



R. Clausius
1822-1888

✓ თერმოდინამიკური სისტემის სითბოცვლის პროცესების მიმდინარეობის მიმართულების მახასიათებლად {იზოლირებულ სისტემაში, თუ გარეშე ჩართულობით} კლაუზიუსმა შემოიტანა **ენტროპიის** ცნება;

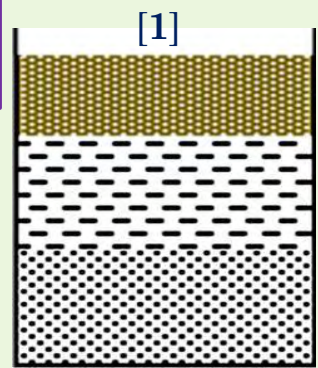
- ენტროპია S (ბერძნ. მობრუნება, გარდაქმნა) სისტემის მდგომარეობის მახასიათებელი ფუნქციაა, ასახავს **ენერჯიის შეუქცევადი გაბნევის ზომას** (რეალური პროცესის იდეალურისგან გადახრის **ზომას**);

✓ მათემატიკურად, თერმოდინამიკური {ფუნქცია} **ენტროპია** განსაზღვრავს სისტემაზე გადაცემული (ან სისტემიდან მოცილებული) სითბოს δQ რაოდენობის ფარდობას T ტემპერატურასთან:

$$dS = \delta Q / T \quad (3.1) \quad [S] = 1\text{ჯ} / \text{K}$$

- დღეს ენტროპიის ცნება მრავალმხივ პროცესებს უკავშირდება. **ენტროპია** - ინფორმაციული; დიფერენციალური; მართვის სისტემის; დინამიური სისტემის...
- თუმცა ყველგან ის შეიძლება მივიჩნიოთ სისტემაში მოუწესრიგებლობის რაოდენობრივ ზომად;
- თერმოდინამიკის II კანონის ფორმულირება ენტროპიის საფუძველზე: **ბუნებრივი პროცესები ცდილობენ გადაიყვანონ სისტემა მეტი მოუწესრიგებლობის მდგომარეობაში.**
- ეს დებულება სწორად აღწერს პროცესებს თერმოდინამიკის ფარგლებს გარეთაც;

• ვთქვათ, ჭიქაში სხვადასხვა ფხვნილის რამდენიმე განცალკევებული ფენაა მოთავსებული [1]. ყოველი შენჯღრევისას ფენების ერთმანეთში შერევის ხარისხი მხოლოდ **იზრდება** და საწყის მდგომარეობას ის **არასდროს** აღარ დაუბრუნდება;



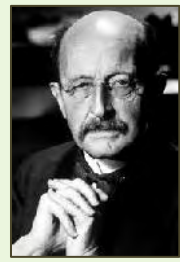
▪ ცდების შედეგების განზოგადოებით ნერნსტმა 1906 წ. ჩამოაყალიბა პრინციპი (თეორემა), რომელსაც, პლანკის დაზუსტების გათვალისწინებით, თერმოდინამიკის III კანონი ეწოდა:

• თერმოდინამიკური წონასწორობის პირობებში მყარი თუ თხევადი სხეულის ენტროპია მიისწრაფვის ნულისკენ, თუ ნულისკენ მიისწრაფვის თერმოდინამიკური ტემპერატურა

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0 \quad (3.2)$$



W.Nernst
1864-1941



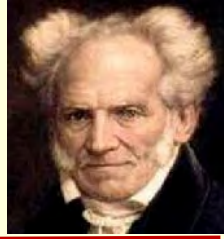
M.Planck
1858-1947

▪ თერმოდინამიკის III კანონიდან გამომდინარეობს, რომ, როდესაც $T \rightarrow 0$, ნულს ასევე გაუტოლდება:

- სითბური გაფართოების კოეფიციენტი β ;
- წნევის იზოქორული კოეფიციენტი $(\partial P / \partial T)_V$;
- კუთრი სიტბოტევადობები c_p , c_v ;



“ახალგაზრდობის აზრით სიცოცხლე უსასრულო მომავალია; სიბერის აზრით - მეტად ხანმოკლე წარსული.” Arthur Schopenhauer



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1788-1860

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 6

თემა:

სემესტრი II

მყარი სხეულის & სითხის თვისებები

88·

1.კრისტალური და ამორფული მყარი სხეულები

041

044

2.კრისტალური მესრის ბრავეს სისტემები და ქიმიური ბმის სახეები

1. კრისტალური და ამორფული მყარი სხეულები

✓ *სე* -ს {ატომებს, მოლეკულებს, იონებს} ქაოსური მოძრაობის E_k კინეტიკური და ერთმანეთთან ურთიერთქმედების E_p პოტენციური ენერგიები გააჩნიათ. ამ ორი ენერგიის $\{E_k / E_p\}$ თანაფარდობის მიხედვით ნივთიერება იქნება:

აირად ან **კონდენსირებულ** (თხევად, მყარ) მდგომარეობაში [1];

1. $E_k \gg E_p$, ურთიერთქმედება სუსტია. *სე* ერთმანეთს ნებისმიერად დიდ მანძილზე შორდებიან. ნივთიერება **აირად** მდგომარეობაშია.

•ის ფორმას და მოცულობას **ვერ** ინარჩუნებს;



2. $E_k \sim E_p$, ნივთიერება **კონდენსირებულ** (თხევად ან მყარ) მდგომარეობაშია. *სე*-ის განლაგება მჭიდროა. თხევადსა და მყარს შორის განსხვავებას ნაწილაკთა **მოძრაობის ხასიათი** განსაზღვრავს;

▪სითხეში *სე* -

- ირხევიან წონასწორული მდგომარეობის მახლობლად;
- დროდადრო, **ნახტომისებურად** იცვლიან მდებარეობას და მეზობელ წონასწორულ მდგომარეობაში გადადიან;
- შედეგად, სითხე **დენადია** და ფორმასაც **იცვლის**;
- სითხე ინარჩუნებს მოცულობას;

▪მყარ სხეულებში -

- სე*-ის {ძირითადად - ატომები} მოძრაობა **იზღუდება**;
- სე* ჩაბმულნი არიან მხოლოდ მოუწესრიგებელ **რხევით** მოძრაობაში წონასწორული მდგომარეობის მახლობლად;
- სე*-ს შორის ძლიერი ურთიერთქმედება **უნარჩუნებს** მყარ სხეულს ფორმას და მოცულობას;
- სე*-ის განლაგების **მოწესრიგების ხარისხის** მიხედვით, მყარი სხეულები მიეკუთვნებიან კრისტალურ ან ამორფულ სხეულთა კლასს [1];

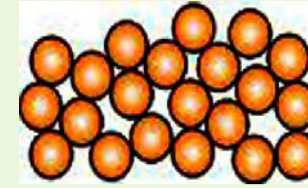
✓ **ამორფულ** მყარ სხეულებში *სე*, ქაოსური განლაგების ფონზე, {ხშირად} ქმნიან კანონზომიერი განლაგების მცირე ლოკალურ ჯგუფებს {*სე*-ის **ახლო მოწესრიგება**}. ასეთი ლოკალური ჯგუფი შეიძლება “გადაცივებულ სითხედ” (მაგ.: *მინა, ფისი, პლასტმასა*) წარმოვადგინოთ [2];

▪ **ამორფულ** სხეულს -

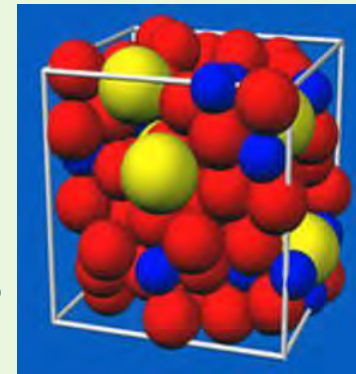
• ახასიათებს ფიზიკური თვისებების **იზოტროპულობა** (*მიმართულებისგან დამოუკიდებლობა*);

• **არ** გააჩნია **დნობის ტემპერატურა** (თანდათან ლღვება);

[2] ამორფული

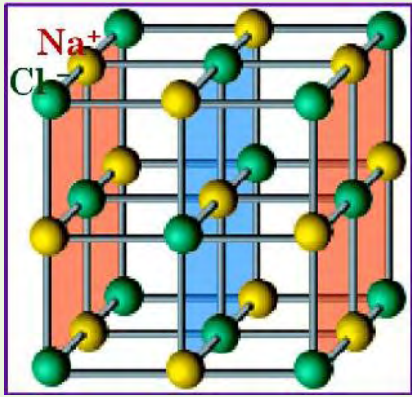
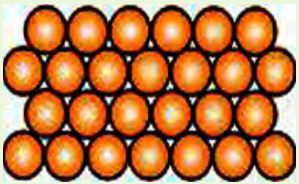


სტრუქტურულად *სითხის* ანალოგი



[3]

კრისტალური



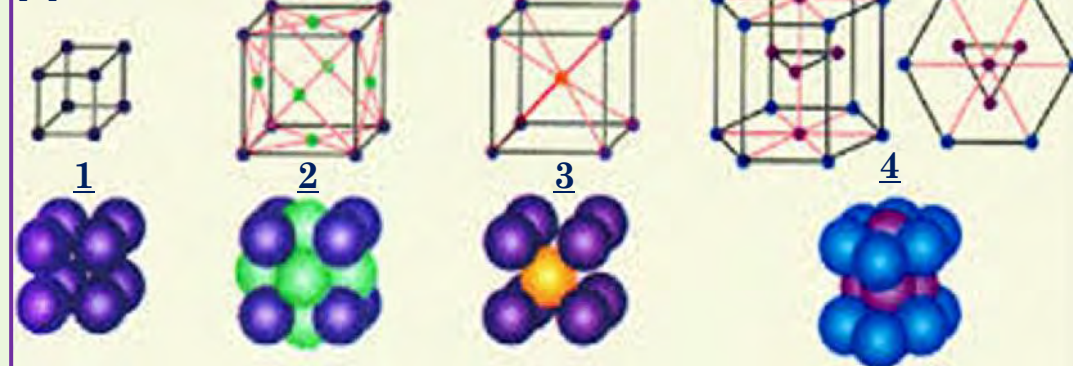
✓ **კრისტალურ** სხეულებში *სე*-ის {ატომების, იონების} განლაგება მკაცრად მოწესრიგებულია {**შორი მოწესრიგება**}, კონკრეტული კანონზომიერებით გამოირჩევა და “ქმნის” სამგანზომილებიან, სივრცულად განმეორებად წყობას - **კრისტალურ მესერს** [3];

▪ მესრის **კვანძების სისტემა** ასახავს *სე*-ის **ცენტრების ადგილმდებარეობათა** ერთობლიობას;

▪ [4] *სე* -ის ცენტრების ადგილმდებარეობა {კრისტალური მესრის მაგალითები} და ატომების რეალური, მჭიდრო განლაგება:

- 1. მარტივი კუბური (Po);
- 2. წახნაგცენტრირებული კუბური (Ge, Si, GaAs, GaN, InSb...);
- 3. მოცულობაცენტრირებული კუბური (Fe, Ba, Cr, CsCl...);
- 4. ჰექსაგონალური (C, Mg, Cd, Zn...);

[4]

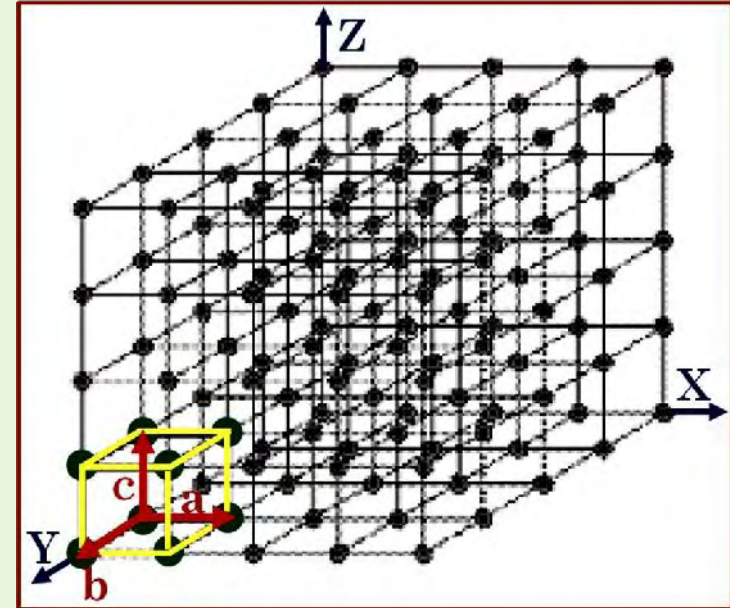


✓ კრისტალური მესრის მნიშვნელოვან მახასიათებელს მისი **ელემენტარული უჯრედი** წარმოადგენს;

▪ **ელემენტარული უჯრედის** თანმიმდევრული *განმეორებით*, პარალელური გადატანების - **ტრანსლაციის** - გზით იქმნება კრისტალის *სტრუქტურა*;

▪ **ელემენტარული უჯრედი** განისაზღვრება **3 ბაზისური** არაკომპლანარული ვექტორით $\{\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}\}$ და *ღერძებს* შორის **3 კუთხით** $\{\alpha, \beta, \gamma\}$;

▪ კრისტალებში **ტრანსლაციური** სიმეტრია დაცულია (მესერი უთავსდება თავის თავს), თუ $\{\alpha, \beta, \gamma\} = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ$;



✓ ნებისმიერი კვანძის მდებარეობას კრისტალურ მესერში განსაზღვრავს **ტრანსლაციის ვექტორი**

$$\vec{T} = m\vec{a} + n\vec{b} + p\vec{c} \quad (1.1) \quad \{m, n, p\} = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

▪ **ბაზისური** პარამეტრების კონკრეტული მნიშვნელობები აყალიბებენ კრისტალური მესრის **სიმეტრიას**, რომელიც, თავის მხრივ, *ზღუდავს* კრისტალური მესრის *შესაძლო* ვარიანტების რაოდენობას;



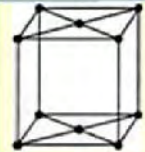


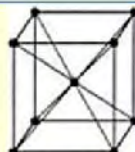

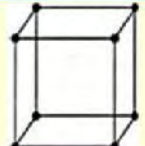
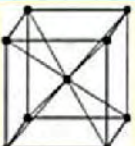
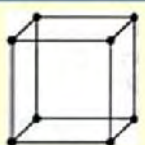
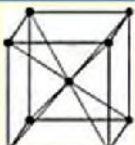

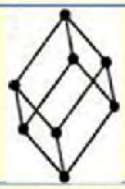
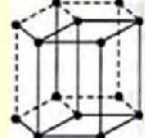
▪ ყველა შესაძლო კრისტალური სტრუქტურა სრულად აიწერება **14 ტრანსლაციური ჯგუფით**, ანუ შესაბამისობაშია **ბრავეს 14 მესერთან**;

▪ ეს 14 მესერი *განაწილებულია* (დაჯგუფებულია) **7 სინგონიაში**. *ერთ სინგონიაში* აერთიანებენ კრისტალებს, რომელთა ელემენტარული უჯრედი (სიმეტრია) ყალიბდება **მსგავსი** კუთხეებით და ღერძებით (წიბოთი);



A. Bravais
1811-1863

2. კრისტალური მესრის ბრავეს სისტემები და ქიმიური ბმის სახეები

სინგონია:	პრიმიტიული	ფუბეცენტ.	მოცულობაცენტ.	წახნაგცენტ.
1. ტრიკლინური $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$				
2. მონოკლინური $a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$				
3. რომბული $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
4. ტეტრაგონალური $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
5. კუბური $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
6. ტრიგონალური $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma < 120^\circ \neq 90^\circ$				
7. ჰექსაგონალური $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$				

• სიბრტყე, ღერძი, ცენტრი ის **სიმეტრიის ელემენტებია**, რომელთა მეშვეობით ხორციელდება კრისტალის **სიმეტრიული გარდაქმნა** - *ოპერაცია*, რომლის შედეგად კრისტალი უთავსდება თავის თავს;

• კრისტალის **სიმეტრიის ელემენტების ერთობლიობა** ქმნის **სიმეტრიის კლასს**;

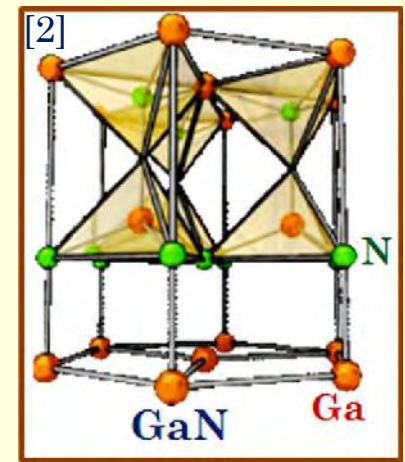
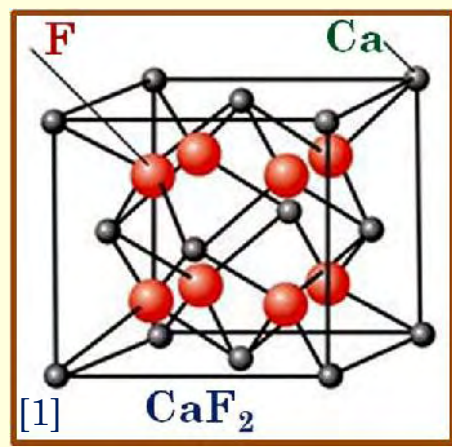
• ბუნებაში არსებობს მხოლოდ **32 სიმეტრიის კლასი**, რომლებიც აყალიბებენ **14 ტრანსლაციურ ჯგუფს**, ანუ **14 ბრავეს მესერს**;

• 14 ბრავეს მესერი განაწილებულია **7 კრისტალოგრაფიულ სისტემად** - **სინგონიად** {ბერძ. - “მსგავსი კუთხეებით”}

✓ ნებისმიერი კრისტალი (განურჩევლად კრისტალოგრაფიული წარმომავლობისა) წარმოადგენს მდგრად სისტემას მის შემადგენელ *სე* -ს შორის არსებული ქიმიური ბმის, ანუ ამ ბმის უზრუნველმყოფი ფიზიკური ურთიერთქმედების წყალობით;

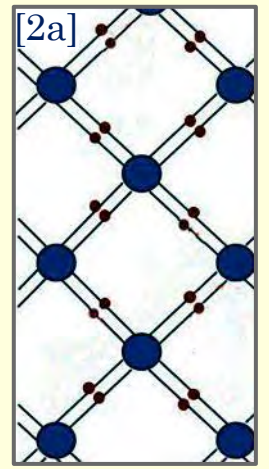
▪ *სე*-ის გვარობის და მათ შორის მოქმედ ძალთა ბუნების მიხედვით ანსხვავებენ {[1] იონურ (ჰეტეროპოლარულ), [2] ატომურ (ჰომოპოლარულ, ანუ კოვალენტურ), [3] ლითონურ, [4] მოლეკულურ} კრისტალებს და ბმას;

• აღსანიშნავია, რომ ატომებს შორის ბმა პრაქტიკულად არასდროს არ შეესაბამება სრულად (სუფთად) ბმის რომელიმე ერთ ტიპს {მაგალითად, იონურ ბმაში ყოველთვის არსებობს კოვალენტური ბმის კომპონენტი};



▪ 1.იონური ბმა ხორციელდება საპირისპირო ნიშნით დამუხტულ იონებს შორის მოქმედი კულონური (ელექტროსტატიკური) მიზიდულობის ძალებით. თუ ტემპერატურა არაა მაღალი, იონური კრისტალები დიელექტრიკებს წარმოადგენენ (NaCl, CsCl...);

▪ 2.ატომურ კრისტალებში ელექტრონეიტრალურ ატომებს შორის კავშირი (კოვალენტური ბმა) იქმნება მეზობელ წყვილ ატომთა თითოთი-თო განზოგადოებული (ანუ, უკვე საერთო ორი) ელექტრონების ენერგეტიკული მდგომარეობის (ურთიერთქმედების) ცვლილების შედეგად;
 • კოვალენტური ბმა ხორციელდება მრავალ “პოპულარულ” ნახევრად გამტარში: Ge, Si, GaAs, GaSb, InP, GaN, ...



▪ **3. ლითონების** გამორჩეულ ფიზიკურ თვისებებს (მაგ.: საუკეთესო ელექტრო- და თბოგამტარობას) ამ კრისტალების ქიმიური ბმის (**ლითონური** ბმის) **განსაკუთრებულობა** განსაზღვრავს:

▪ ჯერ კიდევ მყარი ფაზის **ჩამოყალიბების** სტადიაზე ადგილი აქვს ლითონის **ატომების იონიზაციას**;

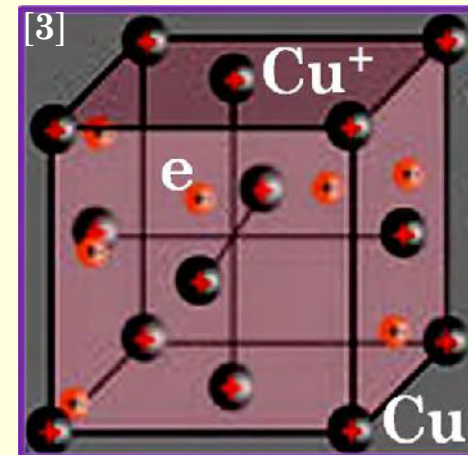
• კრისტალურ მესერს **დადებითი იონები** ქმნიან;

• ატომებს **მოწყვეტილი** (თავისუფალი) სავალენტო **ელექტრონები**, ელექტრონული “**აირის**” სახით, **ქაოსურად** მოძრაობენ იონებს შორის **მესერში**;

▪ **საპირისპირო** ნიშნით **დამუხტული** ნაწილაკების ასეთი **ორი სიმრავლის** არსებობა განსაზღვრავს ლითონური ბმის **სტაბილურობას** (“**ცემენტირებას**”):

• თავისუფალი **ელექტრონების** მოქმედება **აკომპენსირებს** დადებით იონებს შორის არსებული **განზიდვის** ძალების “**დამანგრეველ**” ზეგავლენას;

• დადებითი **იონებით** შექმნილი **ელექტრული** ველი ელექტრონებისთვის “**უხილავ გალიას**” ქმნის და **არ აძლევს** მათ კრისტალური მესერის **მიტოვების** საშუალებას;



▪ **4. მოლეკულური** ბმა ხორციელდება კრისტალურ მესერში, რომლის კვანძებში მოლეკულებია განთავსებული (მაგ. ნაფტალინი). **მოლეკულურ** კრისტალებს ასევე ქმნის მყარ ფაზაში გადაყვანილი სითხე (H_2O ყინული) და აირი - CO_2 , O_2 , N_2 ;

• ბმას **მოლეკულებს** შორის განაპირობებენ **ვან-დერ-ვაალსის მიზიდულობის** ძალები (ანუ, იმ ბუნების ძალები, რომლებიც იწვევენ აირის იდეალურობიდან გადახრას);

✓ **C ნახშირბადი** დედამიწაზე და მზეზე მეტად გავრცელებული ელემენტია. ის არსებობს რამდენიმე კრისტალურ მოდულიკაციაში, რომელთაგან 2 ფიზიკური თვისებებით პოლარულად განსხვავებულია:

• **ალმასი** - ძალიან მტკიცე კრისტალი, წახნაგცენტრირებული კუბური სიმეტრიით [5];

• **გრაფიტი** - რბილი, ფშვნიანი მასალა, **ჰექსაგონალური** კრისტალური სტრუქტურით [6];

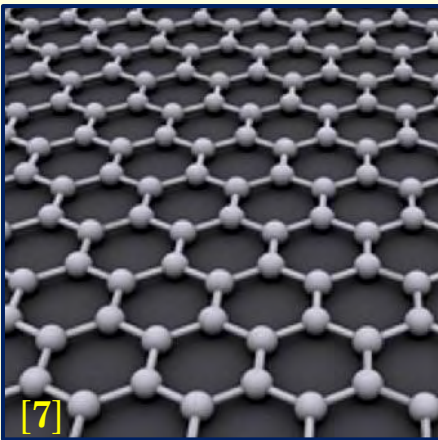
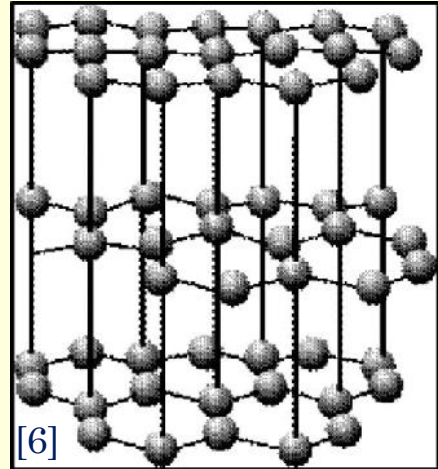
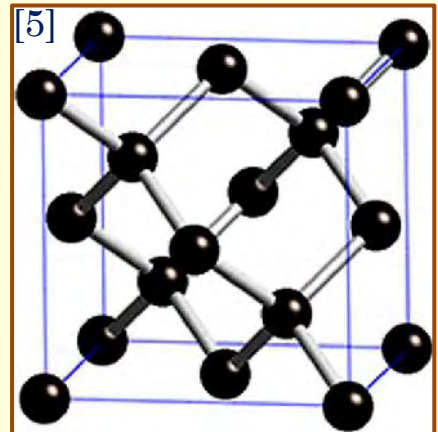
▪ ორივე მესერი ატომების მაქსიმალურად მჭიდრო წყობით გამოირჩევა;

▪ გრაფიტის მესერი წარმოადგენს პერიოდულად განმეორებადი, ბრტყელი, პარალელური ფენების ერთობლიობას [6]. 2004 წელს მოხერხდა პირველი ჭეშმარიტად **ორგანოზომილებიანი** {1 ატომის სისქის} კრისტალის გრაფენის [7] “გამოყოფა” გრაფიტიდან {გრაფენი, ფაქტიურად, გრაფიტის ერთ სიბრტყეს - **მონო ფენას** წარმოადგენს};

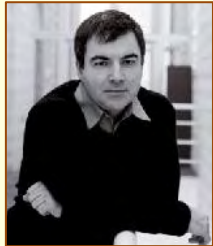
▪ **გრაფენი** გამოირჩევა მაღალი მექანიკური სიმტკიცით და რეკორდული: 1. თბოგამტარობით, 2. მუხტის გადამტანების ძვრადობით;

▪ **გრაფენი** დღეს განიხილება ნანოელექტრონიკის ფუძე მასალად და Si-ის შემცვლელად ინტეგრალურ სქემებში;

▪ ამ აღმოჩენისთვის, 2010 წლის ნობელის პრემია მიენიჭათ ა.გეიმს და კ.ნოვოსიოლოვს;



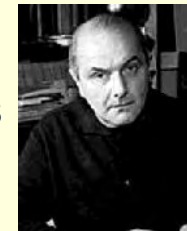
ა.გეიმი
1958
მანჩესტერის
უნივერს.
ნობელი 2010



კ.ნოვოსიოლოვი
1974
მანჩესტერის
უნივერს.
ნობელი 2010



“ადამიანებს გამოადგებოდა ხანდახან ცხოვრებისგან “თავისუფალი დღე.””
Stanislaw J. Lec



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1909 - 1966

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 7

თემა:

სემესტრი II

მყარი სხეულის & სითხის თვისებები

88·

049

1.მყარი სხეულის სითბური გაფართოება

050

2.მყარი სხეულის სითბოტევადობა

051

3.სითხის ფიზიკური თვისებები {მოკლე მიმოხილვა}

052

4.ზედაპირული დაჭიმულობა. კაპილარული მოვლენები

1.მყარი სხეულის სითბური გაფართოება

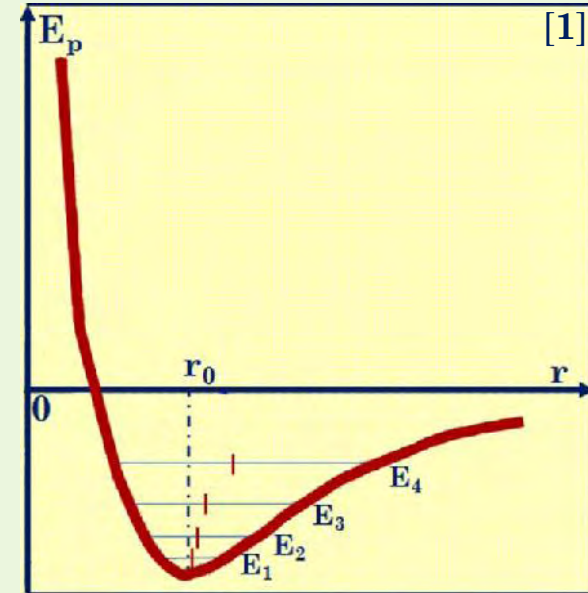
✓ მყარი სხეულის ატომები განუწყვეტლივ ირხევიან წონასწორული მდგომარეობის მახლობლად;

▪ ტემპერატურის მატებას მოჰყვება რხევის E_k კინეტიკური ენერჯიის ზრდა;

▪ E_p პოტენციური ენერჯიის ცვლილება უკავშირდება ატომების ურთიერთ წანაცვლებას [1];

▪ $E_p(r)$ გრაფიკზე ასევე წარმოდგენილია სრული ($E_k + E_p$) ენერჯიის დონეთა სისტემა (E_1, E_2, E_3, E_4) ტემპერატურასთან [1] შესაბამისობაში ($T_1 < T_2 < T_3 < T_4$);

▪ პოტენციური E_p ენერჯია არ არის [1] ატომებს შორის r მანძილთან სიმეტრიულ დამოკიდებულებაში [1];


 L_0
 T_0
 L_0
 $T_0 + \Delta T$
 L
 ΔL

• $\Delta L / L_0 = \alpha \Delta T$ (1.1) სხეულის ფარდობითი წაგრძელება მისი ტემპერატურის ცვლილების პროპორციულია;

$$(1.1) \Rightarrow \Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad (1.2) \Rightarrow$$

$$L = L_0(1 + \alpha \Delta T) \quad (1.3)$$

• (1.1) \Rightarrow წირითი გაფართოების კოეფიციენტი $\{\alpha = \Delta L / L_0 \Delta T$ (1.4) $\}$ ტოლია სხეულის ფარდობითი წაგრძელებისა მისი 1K-ით გათბობისას. $[\alpha] = 1/K$;

• ენერჯიის ზრდისას (T -ს მატებისას) ატომებს შორის საშუალო მანძილი იზრდება, ანუ იზრდება მყარი სხეულის ხაზოვანი ზომები და მოცულობა;

• სითბური გაფართოება მჭიდრო კავშირშია პოტენციური ენერჯიის ასიმეტრიულობასთან;

• E_p -ს მრუდი სიმეტრიული რომ ყოფილიყო, სითბურ გაფართოებას ადგილი არ ექნებოდა;

▪ (1.1)-ის ანალოგიურად, სხეულის მოცულობის ფარდობითი ცვლილება $\Delta V / V_0 = \beta \Delta T$ (1.5)

• იზოტროპული კრისტალისას, მოცულობითი გაფართოების კოეფიციენტი $\beta = 3\alpha$ (1.6)

{მაგ. - Al: $\alpha = 25 \cdot 10^{-6} K^{-1}$; $\beta = 75 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ };

2.მყარი სხეულის სითბოტეკვალობა

✓მყარი სხეულის სითბური გაფართოების სიმცირის (აირებთან შედარებით) გათვალისწინებით:

▪სითბოცვლის პროცესი ერთი C სითბოტეკვალობით აიწერება (აირებში საჭირო იყო ორი - C_p , C_v სითბოტეკვალობების გათვალისწინება);

▪ Q სითბოს რაოდენობა ფაქტიურად მთლიანად ხმარდება ΔU შინაგანი ენერჯიის ცვლილებას ($A \approx 0$)

$$C = Q/\Delta T = \Delta U/\Delta T \quad (2.1)$$



P.Dulong
1785-1838



A-T.Petit
1791-1820

▪სითბოტეკვალობის განხილვისას კეთდება დაშვება, რომ მყარი სხეულის შემადგენელი *სე* (ატომები, იონები):

•ჰარმონიულად ირხვეიან **ერთი** სიხშირით *სამივე*, ერთმანეთისგან *დამოუკიდებელი* მიმართულებით;

•თითოეულ *სე*-ს აქვს $i=3$ თავისუფლების ხარისხი;

•*ერთ* თავისუფლების ხარისხზე მოდის kT ენერჯია ($0.5 kT$ პოტენციური და $0.5 kT$ კინეტიკური);

▪ამდენად, *ერთი ატომის* ენერჯია $U_1 = ikT = 3kT$;

▪ასეთი მყარი სხეულის *ერთი მოლის* შინაგანი ენერჯია

$$U_\mu = 3N_A kT = 3RT \quad \text{და} \quad \Delta U_\mu = 3R\Delta T \quad (2.2)$$

▪მაშინ, $C_\mu = 3R\Delta T/\Delta T = 3R$ (2.3), ანუ **ერთნაირია ყველა** ქიმიურად მარტივი მყარი სხეულისთვის (**ნივთიერების გვარობის მიუხედავად**) და $C_\mu = 24.9$ ჯ/მოლიK;

▪ეს სიდიდე, ცდების საფუძველზე, 1819 წ. დაადგინეს დიულონგმა და პტიმ;

3. სითხის ფიზიკური თვისებები {მოკლე მიმოხილვა}

✓ **სითხე** - ნივთიერების კონდენსირებული მდგომარეობა აირსა და მყარს შორის, გადახრით მყარისკენ;

▪ მისი არსებობის ტემპერატურული შუალედი შემოსაზღვრულია ქვემოდან გამყარების, ზემოდან დუღილის ტემპერატურებით;

▪ მოლეკულებს **არ** გააჩნიათ მკაცრად **ფიქსირებული** მდგომარეობა. თუმცა, მნიშვნელოვანი ურთიერთქმედების (მიზიდვის) გამო ნაწილაკებისთვის მიუწვდომელია გადაადგილების სრული თავისუფლება;

▪ ადგილმდებარეობის ხშირი და მრავალრიცხოვანი ნახტომისებური ცვლილება განაპირობებს ნაწილაკების თვითდიფუზიას და სითხის ძირითად თვისებას - **დენადობას** {მოქმედი, უმეტესად - სიმძიმის, ძალის მიმართულებით};

▪ მოლეკულის ბინადარ მდგომარეობაში **სიცოცხლის დრო** განისაზღვრება ფრენკელის ფორმულით

$$\tau = \tau_0 \exp(W/kT) \quad (3.1)$$

• τ_0 - რხევის პერიოდი { $\tau_0 \sim 10^{-12}$ წმ, $\tau > \tau_0$ };

• W - ნაწილაკის **აქტივაციის** ენერგია;

• T - ტემპერატურა;

▪ ინარჩუნებს მოცულობას {გარე პირობების უცვლელობისას} და **მცირედ** კუმშვადია;

▪ ახასიათებს **სიბლანტე** (შინაგანი ხახუნი), რომელიც ვლინდება ფენების ერთმანეთის მიმართ გადაადგილებისას;

▪ ქმნის თავისუფალ **ზედაპირს** {მოცულობის შენარჩუნების შედეგი}, რომელიც გამოყოფს თხევად ფაზას აირადისგან;

• ზედაპირი ემსგავსება დრეკად მემბრანას;

• გამოყოფ ზედაპირში ჩნდება ძალა (**ზედაპირული დაჭიმულობის ძალა**), რომელიც ზედაპირის მოჭიმვას ცდილობს;

▪ ახასიათებს ორთქლადქცევა {აორთქლებით და დუღილით} და შებრუნებული პროცესი - კონდენსაცია;

▪ ავლენს {გარკვეულ პირობებში} **დასველების** - მყარი სხეულის ზედაპირთან "შეწებების" და მასზე გაშლის - უნარს;

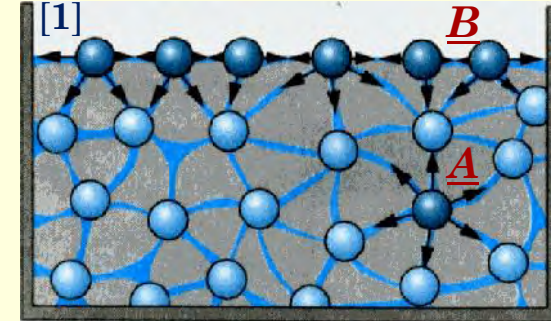
▪ სხვა სითხესთან გამოავლენს ან შერევადობას, ან შეურევლობას;



ი. ფრენკელი
1894-1952

4. ზედაპირული დაჭიმულობა. კაპილარული მოვლენები

✓ სითხის ღია ზედაპირის მსგავსება დრეკად მემბრანასთან არის შედეგი ძალური და ენერგეტიკული მახასიათებლების განსხვავებისა სითხის შიგნით (A) და ზედაპირზე (B) არსებული მოლეკულებისთვის [1];



▪ სითხის შიგნით ნებისმიერი მოლეკულა წონასწორობაშია, ვინაიდან ყველა მხრიდან მეზობელი მოლეკულის მოქმედება (მიზიდვის ძალებით) აკომპენსირებს ერთმანეთს;

▪ სითხის თხელ ზედაპირულ ფენაში არსებული მოლეკულები ძლიერ მიზიდვას მხოლოდ სითხის მოლეკულებისგან გრძნობენ {ჰაერის ან (და) ორთქლის ზემოქმედება უმცირესია}. შედეგად, ჩნდება:

- სითხის სიღრმისკენ მიმართული {ზედაპირული მოლეკულების შემწოვი} ტოლქმედი ძალა - ზედაპირული დაჭიმულობის ძალა;
- ის კომპენსირდება ზედაპირულ მოლეკულებს შორის მანძილის შემცირების შედეგად აღძრული მცირე განზიდვის ძალით და მყარდება წონასწორობა ზედაპირული მოლეკულებისთვისაც;

▪ ზედაპირული დაჭიმულობის ძალური მახასიათებელია კოეფიციენტი σ

$$\sigma = F/L \quad (4.1) \quad [\sigma] = [F]/[L] = 16/მ$$

• σ ასახავს ზედაპირის შემომსაზღვრელი კონტურის ერთეულოვან სიგრძეზე მოქმედ ზედაპირული დაჭიმულობის ძალის მოდულს;

• ზედაპირული დაჭიმულობის ძალა განაპირობებს სითხეზე დამატებით წნევას. სითხის წვეთის (R რადიუსის სფეროს) შემთხვევაში $\Delta p = 2\sigma/R$ (4.2)



▪ **ზედაპირული დაჭიმულობის** ძალის გავლენით სითხე (თუ არ არის გარედან ზემოქმედება) ისწრაფვის ზედაპირის **მინიმალური S** ფართობის, ანუ $E_F = \sigma S$ თავისუფალი ენერჯიის **მინიმუმის** შესაბამისი მდგომარეობისკენ (ე.ი., **სფერული** ფორმისკენ [2],[3]);

• თავისუფალი ენერჯია $E_F = U - T\mathcal{S}$ (4.3) {**U** - შინაგანი ენერჯია, **T** - ტემპერატურა, **Ⴎ** - ენტროპია};

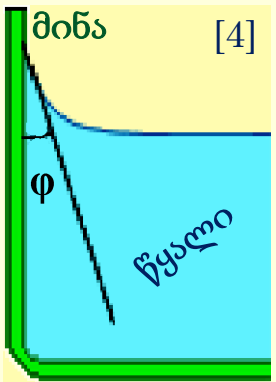


▪ ზედაპირის ფართობის გასაზრდელად {მოლეკულის სიღრმიდან ზედაპირზე გადასატანად} გარე ძალამ უნდა შეასრულოს **მუშაობა**

$\Delta A = F \Delta x = \sigma L \Delta x = \sigma \Delta S$ (4.4) $\Rightarrow \sigma = \Delta A / \Delta S$ (4.5)

▪ (4.5) $\Rightarrow \sigma$ უტოლდება მუშაობას, რომელიც უნდა შეასრულოს **გარე** ძალამ სითხის ზედაპირის ფართობის ერთი ერთეულით გასაზრდელად. $[\sigma] = [A]/[S] = 1 \text{ჯ}/\text{მ}^2$;

• აქ კოეფიციენტი σ **ზედაპირული დაჭიმულობის** ენერგეტიკული მახასიათებელია;

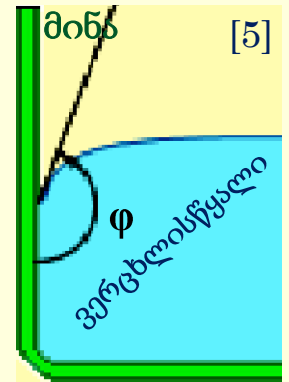


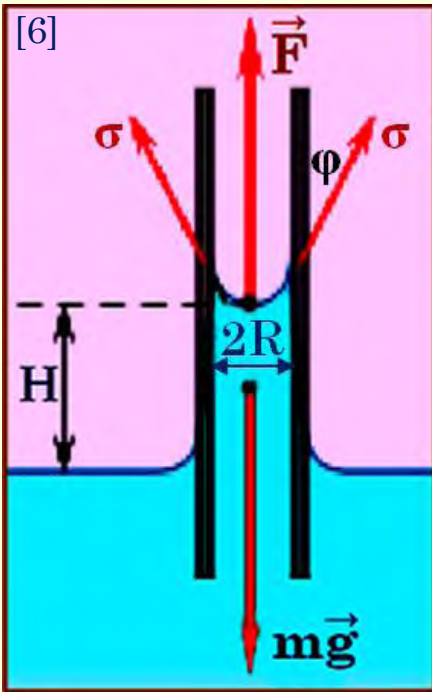
✓ მცირე დიამეტრის მილებში (კაპილარებში) მოთავსებული ღია ზედაპირის მქონე სითხე, ჭურჭლის კედლებთან {მყარ სხეულთან} ურთიერთქმედების შედეგად **იცვლის** ზედაპირის მდგომარეობას (**კაპილარული მოვლენები**);

▪ სითხის და მყარი ნივთიერებების გვარობის მიხედვით, სითხე კედლის გასწვრივ იწევს

• ზევით (კიდური კუთხე $\phi < 90^\circ$) - **დამსველებელი** სითხე [4];

• ქვევით ($\phi > 90^\circ$) - **არადამსველებელი** სითხე [5];





▪ **R** რადიუსიან მილში [6] სითხე დამსველებელია, ე.ი. **ადჰეზია** ჭრთიერთქმედება *სითხის* მოლეკულებსა და *მყარის* მოლეკულებს შორის აჭარბებს **კოჰეზიას** ჭრთიერთქმედება *სითხის* მოლეკულებს შორის;

- სითხის აწევის (დაწევის) **H** სიმაღლეს განსაზღვრავს:
 - **ზედაპირული დაჭიმულობა σ** {უზრუნველყოფს ღია ზედაპირის უწყვეტობას};
 - **კიდური კუთხე ϕ** ;
 - **კაპილარის (მილის) რადიუსი **R****;
- წონასწორობა მყარდება {სითხის აწევა-დაწევა წყდება}, როდესაც *სიმძიმის* ძალას გააწონასწორებს ზედაპირული დაჭიმულობის ძალის **ვერტიკალური** მდგენელი $F=mg$ (4.6);

- ზედაპირული დაჭიმულობა σ მოქმედებს **R** რადიუსიანი წრეწირის მთელ სიგრძეზე: $\{(4.1) \sigma = F/L\} \Rightarrow F = (\sigma \cos \phi)(L) = 2\pi R \sigma \cos \phi$ (4.7);
- სიმძიმის ძალას განსაზღვრავს **H** სიმაღლის და πR^2 ფართობის სითხის ცილინდრი: $mg = \rho Vg = \rho \pi R^2 Hg$ (4.8);

▪ $\{(4.7), (4.8)\} \Rightarrow (4.6) \Rightarrow 2\pi R \sigma \cos \phi = \rho \pi R^2 Hg \Rightarrow$ აწევის სიმაღლე

$H = (2\sigma \cos \phi) / \rho Rg$ (4.9) *ჟურენის* ფორმულა



J.Jurin
1684-1750



“ზოგჯერ წამია საკმარისი, რომ ცხოვრება დაივიწყო, ზოგჯერ კი ცხოვრება არ გყოფნის, რომ დაივიწყო წამი.” ?

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 8

თემა:

სემესტრი II

სითხის & აირის თვისებები

88·

056

1.ორთქლადქცევა

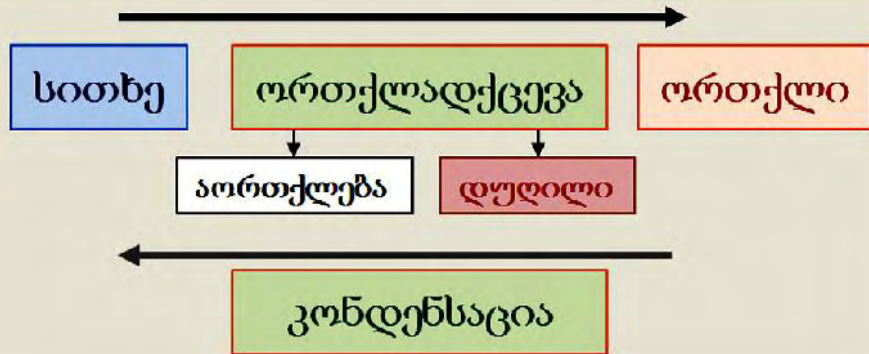
059

2.კინეტიკური მოვლენები აირებში {დიფუზია, თბოგამტარობა, შინაგანი ხახუნი}

061

აირის & სითხის Mind Map

1. ორთქლაღქვევა



✓ ორთქლაღქვევა – სითხის გადასვლა აირად ფაზაში;

- აორთქლება – ორთქლაღქვევა სითხის **ღია ზედაპირიდან**;
- დუღილი – ორთქლაღქვევა სითხის **მთელი მოცულობიდან**;

▪ კონდენსაცია – ორთქლაღქვევის შებრუნებულ **ლი** ფაზურ **გადასვლა** (აირი => სითხე)

• **აორთქლება** ნებისმიერ ტემპერატურაზე მიმდინარეობს (სითხის ზოგიერთ მოლეკულას ნებისმიერ T -ზე ექნება საკმარისი E_k ენერგია აირად ფაზაში გადასასვლელად). აორთქლების ინტენსივობა **დამოკიდებულია**:

• სითხეს, პირველ რიგში, შედარებით **დიდი** E_k ენერგიის (**სწრაფი**) მოლეკულები ტოვებენ, ამიტომ აორთქლებისას სითხე **ცივდება**;

• **დაკარგული ენერგიის შესავსებად** (T -ს შესაწარმუნებლად) სითხეს უნდა გადაეცეს $Q=Lm$ სითბოს რაოდენობა;

• $L=Q/m$ **ორთქლაღქვევის კუთრი სითბო** – სითბოს ის რაოდენობაა, რომელიც საჭიროა 1კგ სითხის იმავე ტემპერატურის ორთქლად გადასაქცევად. $[L]=[Q]/[m]=1ჯ/კგ$.

1. სითხის ღია ზედაპირის ფართობზე – რაც უფრო დიდია ეს ფართობი, მით მეტი მოლეკულა აღმოჩნდება ზედაპირთან და მეტს ექნება სითხის დატოვების შესაძლებლობა;

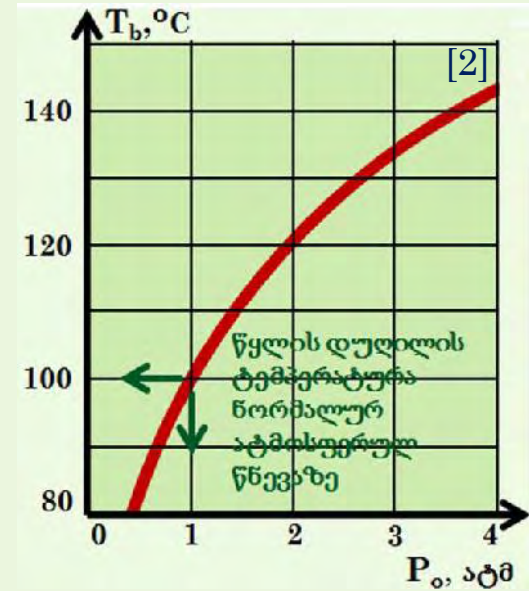
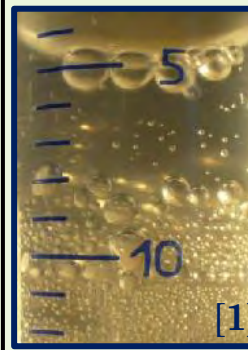
2. სითხის ტემპერატურაზე – გათბობისას ძრ - დება მოლეკულების E_k და მეტს შესწევს უნარი დამლოს სხვა მოლეკულებთან მიზიდულობის და გარეშე წნევის ძალები;

3. ჰაერის ნაკადზე – ნაკადი (ქარი) წაიტაცებს სითხის ზედაპირთან მყოფ აორთქლებულ მოლეკულებს. შედეგად: ა) შემცირდება სითხეში დაბრუნებული მოლეკულების რიცხვი; ბ) ახალ მოლეკულებს გაუადვილდებათ სითხიდან ამოსვლა;

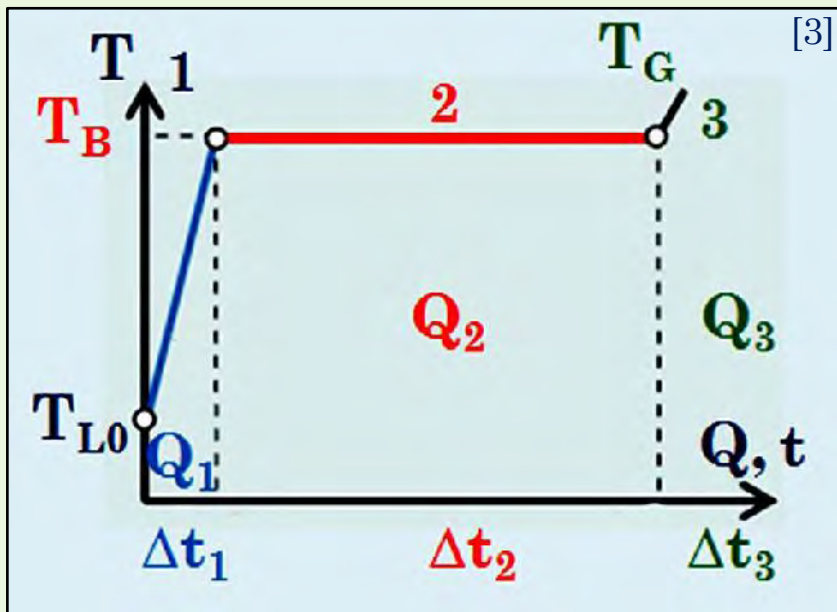
4. სითხის გვარობაზე – ზოგიერთ სითხეში (ეთერი, სპირტი) მოლეკულებს შორის მიზიდვა ტიპურზე **სუსტია** და მათ აორთქლება უადვილდებათ;

✓ **დულილი**, ანუ ორთქლადქცევა სითხის მთელი მოცულობიდან შემდეგ პროცესებთანაა დაკავშირებული:

- სითხეში არსებობენ ჰაერის შემცველი ბუშტუკები [1];
- **აორთქლება** სითხიდან უშუალოდ **ბუშტუკშიც** ხდება და **T-ს** მატებით ამ აორთქლების **ინტენსივობა იზრდება**;
- ბუშტუკში მატულობს წყლის ნაჯერი **ორთქლის წილი**, **წნევა იზრდება** და ბუშტუკი **ფართოვდება**;
- გაფართოებულ ბუშტუკებზე იმოქმედებს სიდიდით გაზრდილი **ამომგდები ძალა** და მათ სითხის **ზედა ფენებში** გადანაცვლებას უწყობს ხელს;
- თუ ეს ფენები ჯერ საკმარისად არაა გამთბარი, იქ მოხვედრილ ბუშტუკებში ნაჯერი **ორთქლი ცივდება** და **კონდენსირდება**. ბუშტუკები **იკუმშება**, **სკდება** და **ქრება**;
- ბუშტუკები შესძლებენ სითხის **ზედაპირის მიღწევას** და **ორთქლის გარეთ** გამოტყორცნას მხოლოდ მაშინ, როდესაც სითხის მთელი მოცულობა გათბება **ერთ - ამ სითხის მახასიათებელ T_B დუდილის ტემპერატურამდე**;



- დუდილის ტემპერატურა დამოკიდებულია ატმოსფერულ წნევაზე [2];
- მაღალი ატმოსფერული წნევისას დუდილის მისაღწევად სითხე **მეტ ტემპერატურამდე** გაცხელებას მოითხოვს;
- დაბალ წნევაზე T_b მკვეთრად **ეცემა**. {მთაში, სიმაღლის ყოველი 300 მეტრით მატებას თან ახლავს დუდილის ტემპერატურის 1°C -ით შემცირება};



▪ადულების სრული პროცესის 3 ეტაპი სითბოგადაცემის დანიშნულების მიხედვით [3]:

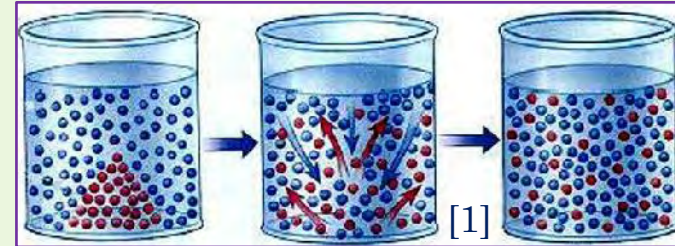
1. Δt_1 დროის განმავლობაში სითბე შთანთქავს Q_1 სითბოს და თბება საწყისი T_{L0} -დან დუდილის T_B ტემპერატურამდე. გათბობას ხმარდება სითბო $Q_1 = c_1 m (T_B - T_{L0})$;

2. Δt_2 დროის განმავლობაში სითბოს მიწოდება გრძელდება, მაგრამ სითბის ტემპერატურა უცვლელია ($T_B = \text{const}$), შთანთქმული $Q_2 = Lm$ სითბო უშუალოდ დუდილს {მოლეკულებს შორის ბმის შესუსტებას და ატმოსფეროს ზეწოლის დაძლევას} ხმარდება. სითბოს უწყვეტად მიწოდების შემთხვევაში მთელი სითბე ორთქლად იქცევა;

3. დროის Δt_3 ინტერვალში შთანთქმული $Q_3 = c_3 m (T_G - T_B)$ სითბო ზრდის მიღებული ორთქლის ტემპერატურას რაღაც T_G მნიშვნელობამდე;

2. კინეტიკური მოვლენები აირებში {დიფუზია, თბოგამტარობა, შინაგანი ხახუნი}

კინეტიკურ მოვლენებს მიეკუთვნება პროცესები (აირში, სითხეში, მყარ სხეულში), რომელთა არსებობა განპირობებულია სისტემის არაწონასწორული მდგომარეობით და უკავშირდება რომელიმე ფიზიკური მახასიათებლის სისტემის ფარგლებში გადანაწილებას {გადატანას};



A.Fick, 1829-1901

✓ დიფუზია (diffusio ლათ.)- გავრცელება {განღვრა, გაბნევა სითბური მოძრაობის გამო} ერთი ნივთიერების მოლეკულებისა მეორე ნივთიერების მოლეკულებს შორის და, შედეგად, მათი კონცენტრაციების გათანაბრება მთელ დაკავებულ მოცულობაში [1];

ორი მოცულობის გამყოფ S დიაფრაგმაში [2] ნივთიერების ნაკადის სიმკვრივე J [მ⁻².წმ⁻¹] კონცენტრაციის გრადიენტის პროპორციულია {ფიკის განტოლება};

$$J = -D \left(\frac{dn}{dx} \right) \quad (2.1)$$

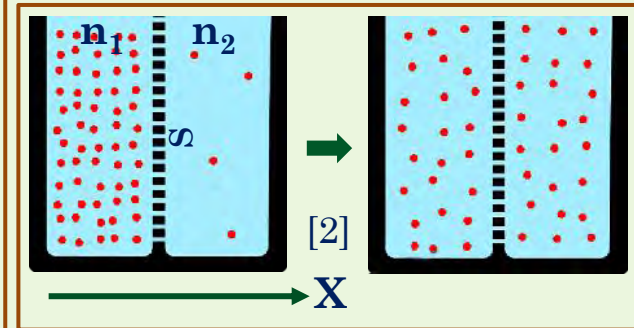
•“–“ ასახავს ნაკადის და კონცენტრაციის გრადიენტის საპირისპირო მიმართულებებს;

• D [მ².წმ⁻¹] - დიფუზიის კოეფიციენტია:

$$D = (1/3) \bar{V} \bar{\lambda} \quad (2.2)$$

\bar{V} - მოლეკულის საშუალო სიჩქარე;

$\bar{\lambda}$ - მოლეკულის საშუალო თავისუფალი განარბენის სიგრძე {საშუალო მანძილი 2 მომდევნო დაჯახებას შორის};



✓ **სითბოგამტარობა** {სითბოგადაცემის - სითბოგამტარობა, კონვექცია, გამოსხივება - ერთერთი სახე} - *სხეულის ქაოსურად მოძრავი ნაწილაკების მეშვეობით შინაგანი ენერჯიის გადაცემა არსებული ტემპერატურული გრადიენტის საპირისპირო მიმართულებით;*

▪ **სითბოგამტარობის კოეფიციენტი** $\chi = (1/3)n\bar{V}\bar{\lambda}(i/2)k$ (2.4)

ანუ, $\chi = (1/3)\rho\bar{V}\bar{\lambda}c_v$ (2.5)

\bar{n} - მოლეკულების კონცენტრაციაა;

\bar{V} , $\bar{\lambda}$ - მოლეკულის *საშუალო* სიჩქარე და თავისუფალი განარბენის სიგრძე;

ρ - ნივთიერების სიმკვრივე;

c_v - **კუთრი** სითბოტევადობა მუდმივი მოცულობისას;

▪ **სითბოგამტარობა** შეიძლება q სითბოს ნაკადის სიმკვრივით დახასიათდეს $q[\text{ჯ}\cdot\text{მ}^{-2}\cdot\text{წმ}^{-1}] \equiv Q/St$;

• სითბოს ნაკადის სიმკვრივე **ტემპერატურის გრადიენტის** პროპორციულია {ფურიეს განტოლება}:

$$q = -\chi(dT/dx) \quad (2.3)$$

სადაც χ - სითბოგამტარობის კოეფიციენტი, $[\chi] = \text{ჯ}/(\text{მ}\cdot\text{წმ}\cdot\text{K})$;

✓ აირის (ისევე, როგორც უკვე განხილული *სითხის*) ფენების V_L *სიჩქარე-თა სხვადასხვაობა* წარმოშობს ფენებისადმი მხებად მიმართულ **შინაგანი ხახუნის** ძალებს {ნიუტონის შინაგანის ხახუნის (2.6) განტოლებაში S ფენების შეხების ფართობია, η - სიბლანტის კოეფიციენტი}:

$$F = \eta S dV_L/dX \quad (2.6)$$

▪ შინაგანი ხახუნის მოვლენა სითხისა და აირისთვის *განსხვავდება* მხოლოდ განხორციელების **მექანიზმით**:

• **სითხეში** შინაგანი ხახუნის ძალას განაპირობებს *მეზობელი ფენების* მოლეკულებს შორის მიზიდვა;

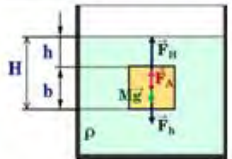
• **აირში** - *მეზობელ ფენებს* შორის მოლეკულების გაცვლა {რასაც მათი ქაოსური მოძრაობის მდგენელი უწყობს ხელს}. გადმოსული სწრაფი მოლეკულები **ზრდიან** - *ნელის* და ამცირებენ *სწრაფი* ფენის სიჩქარეს;

სიზის & სობის Mind Map

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

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

$$F_A = \rho V g; \quad \rho_b > \rho; \quad \rho_b = \rho; \quad \rho_b < \rho;$$



$$P = (1/3) n m \overline{V^2} = (2/3) n E_k$$

$$P \nu = (m/\mu) R T = \nu N_A k T$$

$$P \nu = \text{const}$$

$$\nu/T = \text{const}$$

$$P/T = \text{const}$$

$$E_k = (i/2) k T$$

$$U = (7/2) k T$$

$$Q = c m \Delta T; \quad C = c m$$

$$C_{\mu} = c_{\mu}; \quad Q_{\nu\mu} = C_{\nu\mu} \Delta T$$

$$C_{\nu\mu} = (i/2) R; \quad Q_{p\mu} > Q_{\nu\mu}$$

$$Q_{p\mu} = C_{p\mu} \Delta T;$$

$$C_{p\mu} - C_{\nu\mu} = R$$

$$Y = C_{p\mu} / C_{\nu\mu} = (i+2)/2$$



$$P = P_0 \exp\{-\mu g(H - H_0)/RT\}$$

$$f(V) = 4(\pi)^{-1/2} (m/2kT)^{3/2} V^2 e^{-mV^2/2kT}$$

$$n = n_0 \exp\{-m_0 g(H - H_0)/kT\}$$

$$dn = 4(\pi)^{-1/2} (m_0/2kT)^{3/2} n_0 V^2 \{ \exp(-U/kT) \} dV$$

$$S_1 V_1 = S_2 V_2; \quad 0.5 \rho V^2 + \rho g H + P = \text{const}$$

$$F = \eta S dV/dX; \quad [\eta] = \text{პა} \cdot \text{წმ}$$

$$Re = \rho V_a d/\eta; \quad Re^* = \rho V L/\eta$$

$$F_f = 6\pi \eta r V; \quad F_p = 0.5 C V^2 S$$

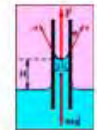
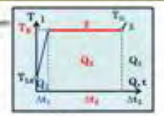
$$dV/dr = -(P_1 - P_2) \cdot r/2\eta L$$

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

$$\sigma = F/L; \quad \sigma = \Delta A/\Delta S$$

$$H = (2\sigma \cos \varphi)/\rho R g$$

$$L = Q/m$$



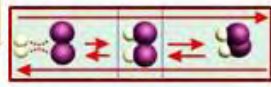
$$\vec{T} = m\vec{a} + n\vec{b} + p\vec{c}$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T$$

$$C = \Delta U/\Delta T$$

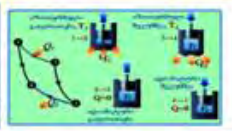
$$C_{\mu} = 3R$$



$$\Delta U = (\pm) Q + (\pm) A; \quad Q = \Delta U + A$$

$$\eta = 1 - Q_2/Q_1; \quad \eta = 1 - T_2/T_1$$

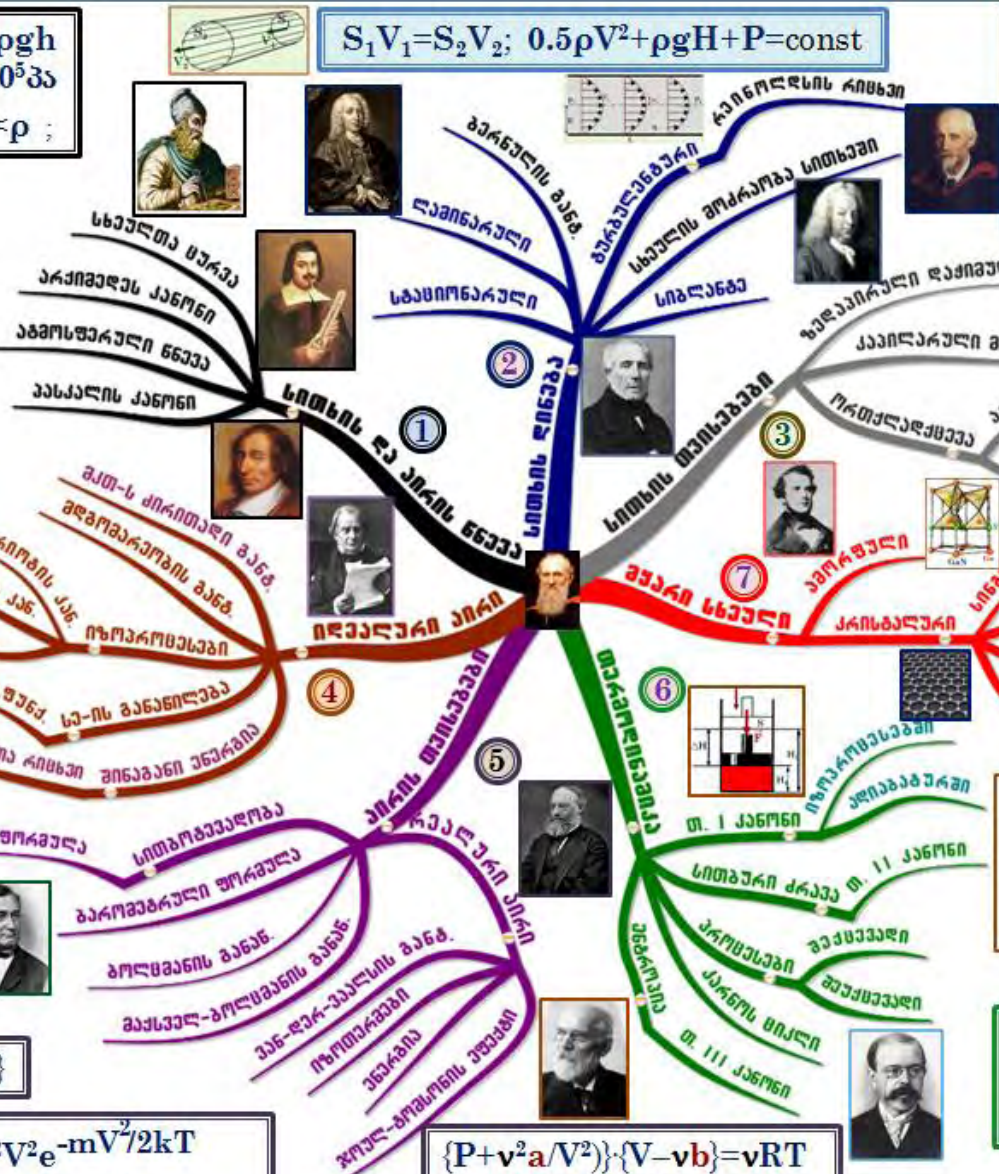
$$P \nu^\gamma = \text{const}; \quad T \nu^{\gamma-1} = \text{const}$$



$$\{P + \nu^2 a/V^2\} \cdot \{V - \nu b\} = \nu R T$$

$$U_{\mu} = (i/2) R T + U_{\text{up}}$$

$$\eta_{JT} = (C_p)^{-1} [T(\partial V/\partial T)_P - V]$$





“ბედნიერება ამჟვეყნად ყველაზე გაურკვეველი და ძვირადღირებული ნივთია.”
Erich Maria Remarque



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1898 - 1970

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 9

თემა:

სემესტრი II

ელექტროსტატიკა

გვ.

063

1. ელექტრული მუხტი. მუხტის თვისებები და მუდმივობის კანონი

065

2. ელექტროსტატიკა. კულონის კანონი

066

3. ელექტრული ველი. ელექტრული ველის დამახულობის ვექტორი

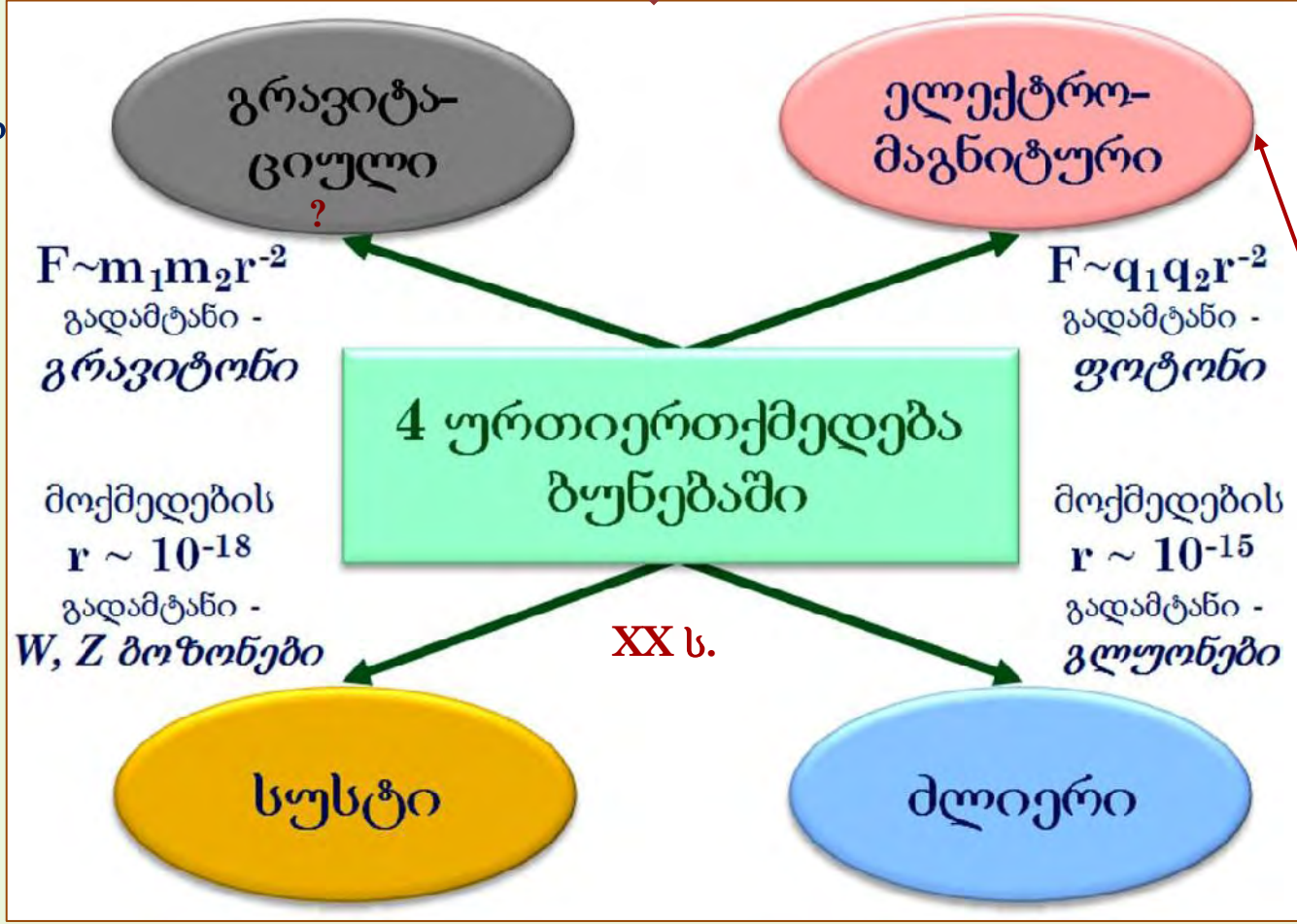
067

4. წერტილოვანი მუხტის ველის დამახულობა

1. ელექტრული მუხტი. მუხტის თვისებები და მუდმივობის კანონი

✓ ბუნებაში მიმდინარე პროცესების განხილვა-შესწავლისას, ფიზიკა ეყრდნობა დღეისთვის მის მიერ გამოვლენილ **ოთხი სახის ურთიერთქმედებას**:

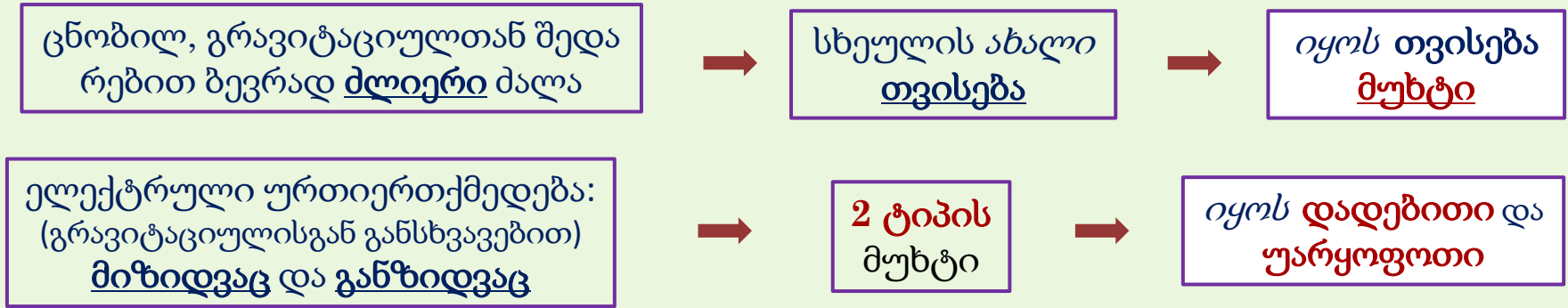
XVII ს.
გრავიტაციული
ველი



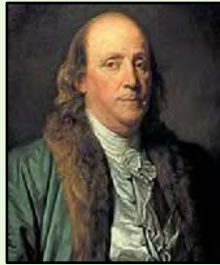
XVIII ს.
ელექტრული
ველი
XIX ს.
მაგნიტური
ველი

I მოვლენა, რომელიც **ელექტრულად** “მონათლეს” იყო ხახუნით ქარვის “დაელექტროვება” {ქარვა - ἤλεκτρον – ელექტრონ ბერძნული (დღეს ქარვა - «κεχρυσπάρ» - ყვითელი)} და შედეგად მსუბუქი სხეულების მიზიდვის უნარი;

გამოვლინდა:



•სხეული **დამუხტულია** ნიშნავს, რომ მასში “-” მუხტი (ელექტრონების) არაა ტოლი “+” მუხტის (პროტონების);



B. Franklin
(1706–1790)

•სხეული მუხტს იძენს **ელექტრონების**, ან გარედან მიერთებით (e-ის სიჭარბე), ან მათი დაკარგვით (e-ის ნაკლებობა);

✓ მუხტის შენახვის კანონი (ბ.ფრანკლინი, 1747 წ.):
ჩაკეტილ სისტემაში ელექტრული მუხტების ალგებრული ჯამი (სრული ელექტრული მუხტი) რჩება მუდმივი (ბუნებაში არასდროს და არსად არ ჩნდება და არ ქრება მხოლოდ ერთი ნიშნის მუხტი):

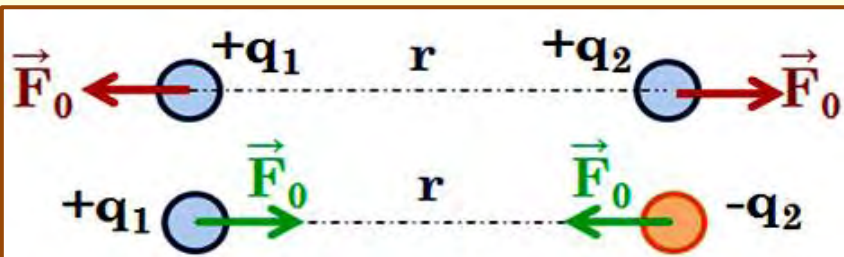
$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const} \quad (1.1)$$

- ელექტრულ მუხტს ახასიათებს:
 - **ორნიშნაობა**;
 - **მუდმივობა**;
 - **დისკრეტულობა** {შეიცავს ელემენტარული მუხტების გარკვეულ რიცხვს};

2. ელექტროსტატიკა. კულონის კანონი

✓ უძრავი მუხტების ურთიერთქმედებას განიხილავს **ელექტროსტატიკა**;

▪ ძირითადი კანონი - კულონის კანონი;

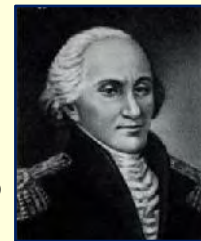


▪ ელექტროსტატიკის ძირითადი კანონი განსაზღვრავს ვაკუუმში, უძრავ, წერტილოვან მუხტებს შორის მოქმედი ძალის სიდიდეს;

▪ კულონის ძალა ასახავს მუხტების **უშუალო შეხების გარეშე ქმედების** (მიზიდვის ან განზიდვის) უნარს;

▪ კულონის ძალა მოქმედებს მუხტების შემაერთებელი წრფის გასწვრივ;

▪ ორ წერტილოვან, უძრავ მუხტს შორის ურთიერთქმედების ძალა ვაკუუმში პროპორციულია ამ მუხტების მოდულების ნამრავლისა, უკუპროპორციულია მათ შორის მანძილის კვადრატისა და მათი შემაერთებელი წრფის გასწვრივაა მიმართული;



Ch. Coulomb
1736–1806

• წერტილოვანია მუხტი, თუ მისი ზომები გაცილებით ნაკლებია იმ მანძილთან შედარებით, რომლითაც ის სხვა დამუხტული სხეულებიდან არის **დამორეზული**;

$$F_0 = k_0 q_1 q_2 / r^2 \quad (2.1)$$

▪ ერთეულები

$$[q] = [I][t] = 1 \text{ ა წმ} = 1 \text{ კ}$$

• 1 კ არის მუხტი, რომელიც გადის გამტარის განიკვეთში 1 წმ-ში 1 ა მუდმივი დენისას. ელემენტარული მუხტი: $|e| = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ კ}$;

▪ კულონის კოეფიციენტი:

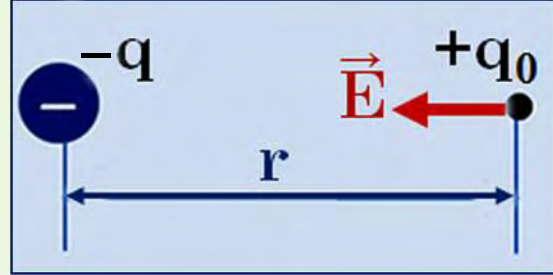
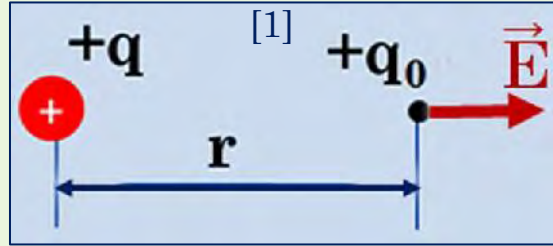
$$\bullet k_0 = (4\pi\epsilon_0)^{-1} = 9 \cdot 10^9 \text{ ნმ}^2 / \text{კ}^2;$$

• ϵ_0 - ელექტრული მუდმივა, $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ ფ/მ}$ (ფ - ფარადა, ელექტროტევადობის ერთეული);

3. ელექტრული ველი. ელექტრული ველის დამაბულობის ვექტორი



M. Faraday
1791–1867



✓ ახლოქმედების პრინციპზე (ველის ცნებაზე) დაფუძნებული ურთიერთქმედებათა თეორია განავითარა *ფარადეიმ*. ნებისმიერი ველის (გრავიტაციულის, ელექტრულის, მაგნიტურის) ქვეშ იგულისხმება:

▪ მატერიის ერთ-ერთი ფორმა, რომელიც უწყვეტად განჭოლავს სივრცეს მისი წარმომქმნელი ობიექტის ირგვლივ და ვლინდება სხვა, ასეთივე სახის ველის წარმოქმნელ ობიექტზე ზემოქმედებით;

ფარადეის მიხედვით:

- ყოველი დამუხტული სხეული თავის ირგვლივ ქმნის ელექტრულ ველს;
- ელექტრული ველი გარკვეული ძალით მოქმედებს ამ ველში არსებულ ნებისმიერ სხვა მუხტზე;
- მუხტზე ძალით მოქმედება ველის ძირითადი {მახასიათებელი} თვისებაა;

▪ ელექტრული ველის ძალური მახასიათებელია ელექტრული ველის დამაბულობა

$$\vec{E} = \vec{F} / q_0 \quad (3.1)$$

• სივრცის მოცემულ წერტილში ელექტრული ველის დამაბულობა ტოლია ამ წერტილში მოთავსებულ დადებით წერტილოვან მუხტზე მოქმედი ძალის შეფარდებისა ამ მუხტის სიდიდესთან;

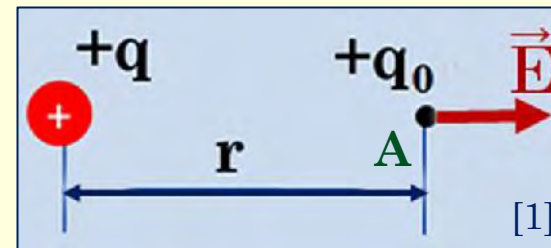
• \vec{E} ვექტორის მიმართულებად მიჩნეულია {პირობითად} ველის მოცემულ წერტილში საცდელ დადებით მუხტზე ველის მხრიდან მოქმედი ძალის მიმართულება;

- ველს ქმნის \oplus მუხტი - დამაბულობის ვექტორი მიმართულია ველის წარმომქმნელი მუხტიდან [1];
- ველს ქმნის \ominus მუხტი - დამაბულობის ვექტორი მიმართულია ველის წარმომქმნელი მუხტისკენ [2];

4.წერტილოვანი მუხტის ველის დაძაბულობა

✓ **+q წერტილოვანი** მუხტი ქმნის ელექტრულ ველს. ველის A წერტილში [1] **E** დაძაბულობის სიდიდის დასადგენად A-ში შეტანილია **+q₀** სასინჯი მუხტი;

▪ ველი **q₀** მუხტზე იმოქმედებს განზიდვის ძალით:

$$\mathbf{F} = k_0 q q_0 / r^2 \quad (4.1)$$


▪ ელექტრული ველის დაძაბულობა

$$\mathbf{E} = \mathbf{F}/q_0 \quad (4.2)$$

(4.1) => (4.2) →

$$\mathbf{E} = k_0 q / r^2 = (4\pi\epsilon_0)^{-1} q / r^2 \quad (4.3)$$

• (4.3) - წერტილოვანი მუხტის ველის დაძაბულობა ვაკუუმში;

▪ ნებისმიერი გარემო ასუსტებს ელექტრულ ველს (ამცირებს კულონურ ძალას) ϵ -ჯერ:

$$\mathbf{E} = (4\pi\epsilon_0)^{-1} q / \epsilon r^2 \quad (4.4)$$

$$\mathbf{F} = (4\pi\epsilon_0)^{-1} q q_0 / \epsilon r^2 \quad (4.5)$$

✓ ϵ - ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობა განსაზღვრავს რამდენჯერ შეამცირა გარემო ელექტრული ველის დაძაბულობა {კულონის ძალა}

$$\epsilon = E_v / E = F_v / F \quad (4.6)$$

• $\epsilon =$:

ჰაერი_1.0006; პარაფინი_2-3; ქალაღი_2-3.5; კვარცი_3.5-4.5; ბეტონი_4.5; მინა_3.7-10; კერამიკა_10-20; Si_11.7; სპირტი_27; გლიცერინი_41; წყალი_81; BaTiO₃ $\approx 10^4$; პოლიმერები $\approx 10^4$;



“შეიძლება შეუნდოთ მტერს? ღმერთი შეუნდობს!
ჩვენი ამოცანაა მათი შეხვედრის ორგანიზება.” Al Capone



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1899 - 1947

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 10

თემა:

სემესტრი II

ელექტროსტატიკა

88

1. ელექტრულ ველთა სუპერპოზიციის პრინციპი

069

2. ელექტრული ველის ძალწირები. ძალწირების ნაკადი

070

3. გაუსის {გაუს-ოსტროგრადსკის} თეორემა

072

4. თანაბრად დამუხტული უსასრულო სიბრტყის ველის დამაბულობა

073

1. ელექტრულ ველთა სუპერპოზიციის პრინციპი

✓ სივრცის გარკვეულ წერტილში ელექტრულ ველს შეიძლება *რამდენიმე* მუხტი ქმნიდეს. მაშინ, ამ წერტილში **სრული ველის დაძაბულობა** ცალკეული ველების \vec{E}_i დაძაბულობათა **ვექტორული** ჯამის ტოლია (სუპერპოზიციის პრინციპი);

▪ ადგილი აქვს ველების **ზედდებას**, *მაგრამ* თითოეული ველი დამოუკიდებლად მოქმედებს;

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n \quad (1.1)$$

ანუ:

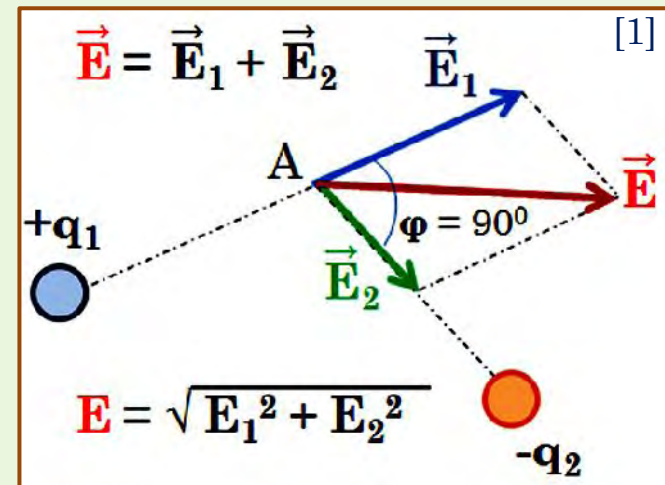
$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i \quad (1.2)$$

▪ {ვთქვათ,} სივრცის A წერტილში ელექტრულ ველს ქმნის ორი მუხტი [1]:

+q₁ მუხტი, დაძაბულობით \vec{E}_1 ,

-q₂ მუხტი, დაძაბულობით \vec{E}_2 ;

• {ვთქვათ,} ველთა დაძაბულობის ვექტორები ერთმანეთთან *მართ* კუთხეს ადგენენ. მაშინ, A წერტილში ელექტრული ველის **სრული დაძაბულობა** პითაგორას თეორემით დგინდება;



▪ ზოგადად, *ნებისმიერი* კუთხისას, დაძაბულობის გამოთვლა ეყრდნობა *კოსინუსების* თეორემას:

$$E = (E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2\cos\phi)^{1/2} \quad (1.3)$$

2. ელექტრული ველის ძალწირები. ძალწირების ნაკადი

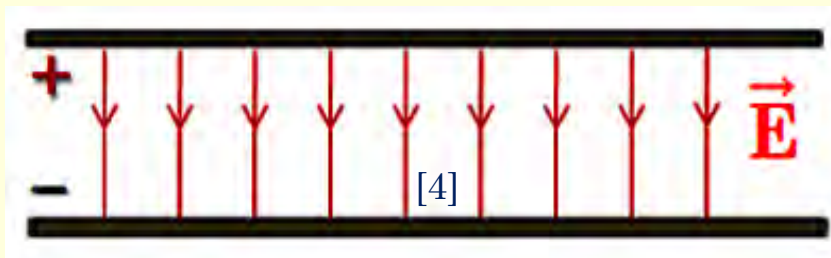
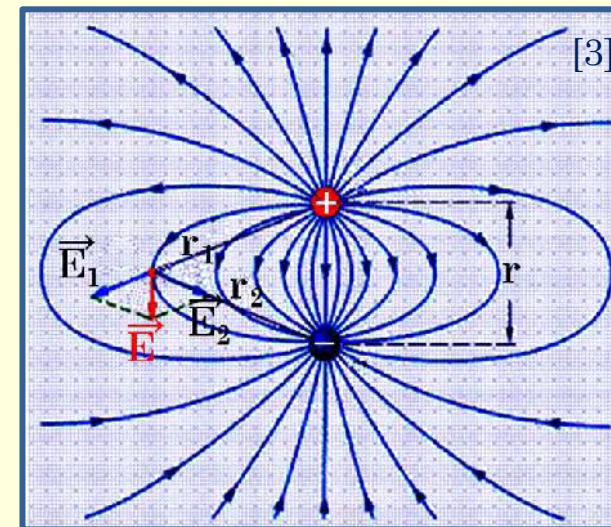
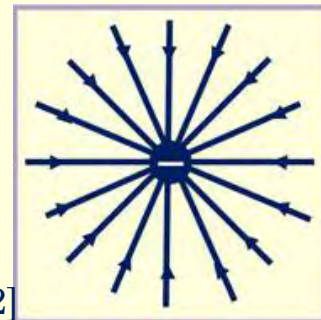
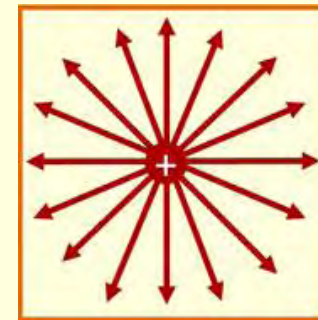
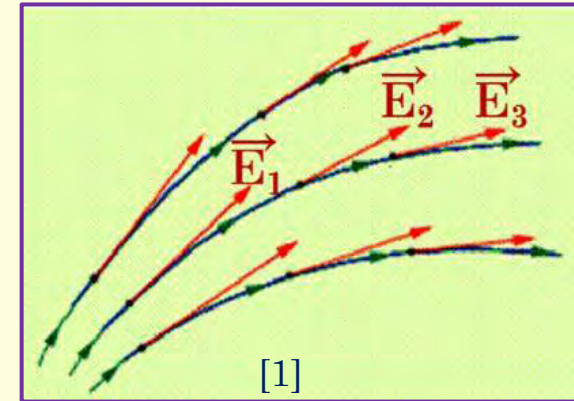
✓ ელექტრული ველის ვიზუალიზაციისთვის გამოიყენება ელექტრული ველის ძალწირის (დაძაბულობის წირის) ცნება;

▪ ელექტრული ველის ძალწირი არის უწყვეტი წირი, რომლის მხებიც მის ყოველ წერტილში გვიჩვენებს ამ წერტილში ველის დაძაბულობის მიმართულებას [1];

▪ ძალწირების სიხშირე ასახავს ველის სიდიდესაც. რაც უფრო დიდია ველის დაძაბულობა, მით მეტია ძალწირთა სიხშირეც [2,3];

▪ ერთგვაროვანია ველი, რომლის სიდიდე და მიმართულება უცვლელია ამ ველის ყველა წერტილში;

▪ {მაგალითად,} ერთგვაროვანი ველი იქმნება ორ პარალელურ, ტოლი და საპირისპირო ნიშნით დამუხტულ ფირფიტას შორის, თუ ფირფიტების ზომები ბევრად აღემატება მათ შორის მანძილს (ფირფიტებს შორის ძალწირების მიმართულება და სიხშირე ერთნაირია) [4];



✓ {მაღწირების სიხშირეზე დაყრდნობით} ელექტრული ველის ზემოქმედება ხასიათდება დაძაბულობის Φ_E ნაკადით;

▪ ზედაპირის ფართის dS ელემენტში ნაკადის $d\Phi_E$ სიდიდე ამ ფართობზე, ველის E დაძაბულობაზე და მათ ურთიერთორიენტაციაზე (φ) დამოკიდებული [5];

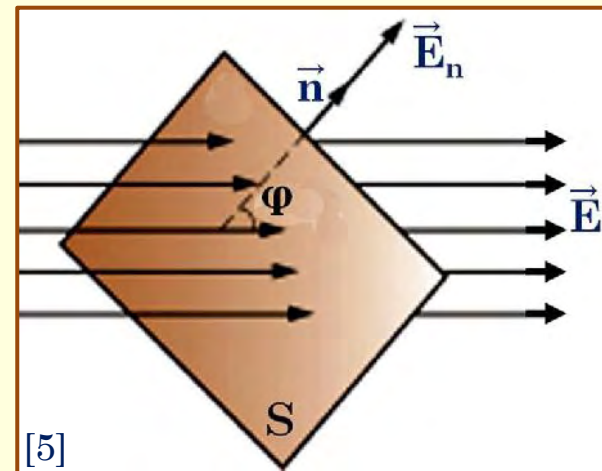
$$d\Phi_E = E dS \cos\varphi = E_n dS \quad (2.1)$$

▪ მთელი ზედაპირის გამჭოლი ნაკადისთვის:

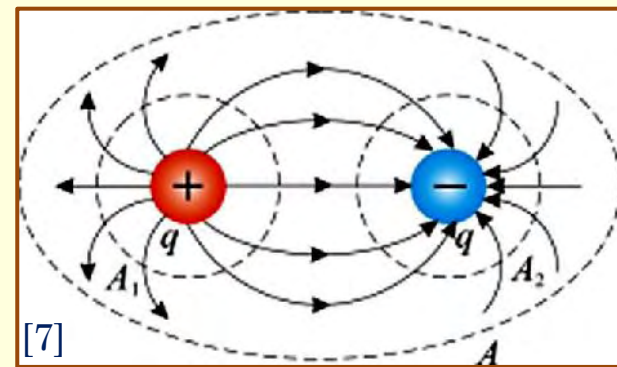
$$\Phi_E = \int_S d\Phi_E = \int_S E_n dS \quad (2.2)$$

▪ ჩაკეტილი ზედაპირისათვის [6]:

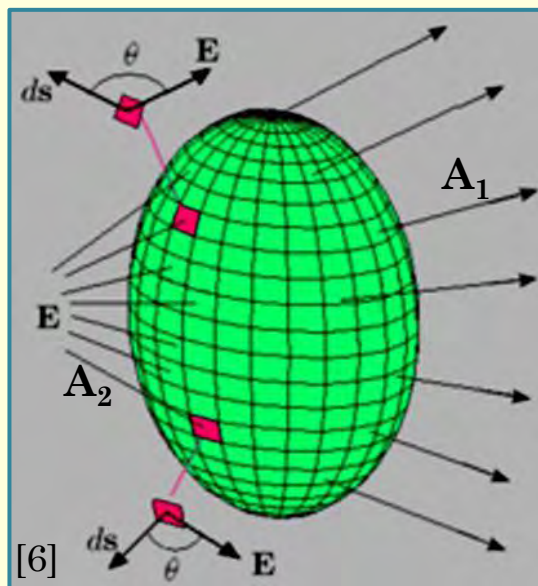
$$\Phi_E = \oint_S E_n dS \quad (2.3)$$



[5]



[7]



[6]

▪ ზედაპირიდან გამომავალი A_1 ნაკადისას [6], [7]

$$\Phi_E > 0;$$

▪ ზედაპირში შემავალი A_2 ნაკადისას [6], [7]

$$\Phi_E < 0;$$

▪ თუ ზედაპირის შიგნით მუხტი არ არის {ანუ, გარედან გამჭოლი ნაკადია და რამდენი მაღწირი შევა, იმდენივე გამოვა} ნაკადი

$$\Phi_E = 0;$$

3. გაუსის {გაუს-ოსტროგრადსკის} თეორემა

✓ ელექტრული ველი მასში მოთავსებულ ზედაპირს განჭოლავს \mathbf{E} დაძაბულობის Φ_E ნაკადით:

1. Φ -ს სიდიდე \mathbf{E} -ზე და S ფართობზეა დამოკიდებულია

$$\Phi_E = \oint_S \mathbf{E}_n dS \quad (3.1);$$

2. Q მუხტის ველით შექნილი Φ_E ნაკადის განსაზღვრის განსხვავებული {მარტივი} მიდგომა ჩამოაყალიბა გაუსმა:

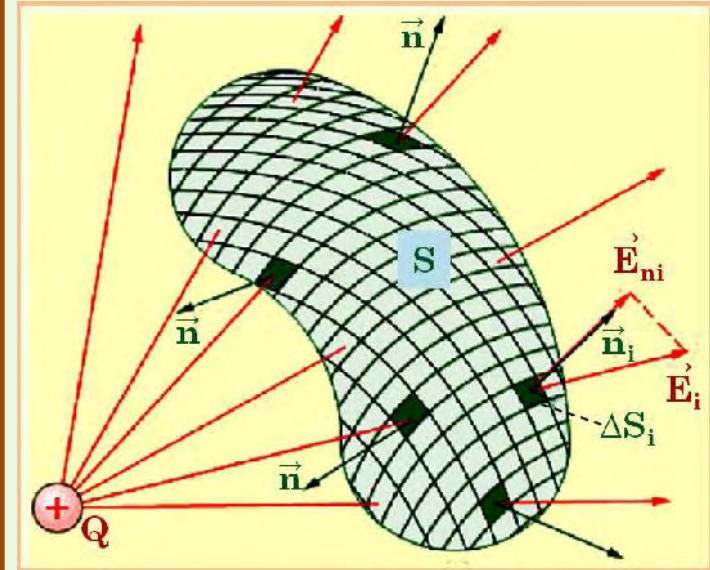
▪ ელექტრული ველის დაძაბულობის \mathbf{E} ვექტორის ნაკადი ნებისმიერი ჩაკეტილი ზედაპირის მიმართ ტოლია ამ ზედაპირის შიგნით მოთავსებული Q მუხტის ϵ_0 ელექტრულ მუდმივაზე ფარდობისა

$$\Phi_E = Q/\epsilon_0 \quad (3.2)$$

• Q – S ფართობით შემოსაზღვრულ მოცულობაში არსებული სრული მუხტია

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i \quad (3.3)$$

▪ ორივე მიდგომის {(3.1),(3.2)} გაერთიანებით ხერხდება კონკრეტული ზედაპირისთვის ველის \mathbf{E} დაძაბულობის სიდიდის დადგენა {მუხტის σ ზედაპირული და ρ მოცულობითი სიკვრევეთა ცნებების გამოყენებით}; →



C. Gauss
1777-1855

• მუხტის თანაბარი განაწილებისას:

$$\sigma = \Delta Q / \Delta S \quad (3.4)$$

$$\rho = \Delta Q / \Delta V \quad (3.5)$$

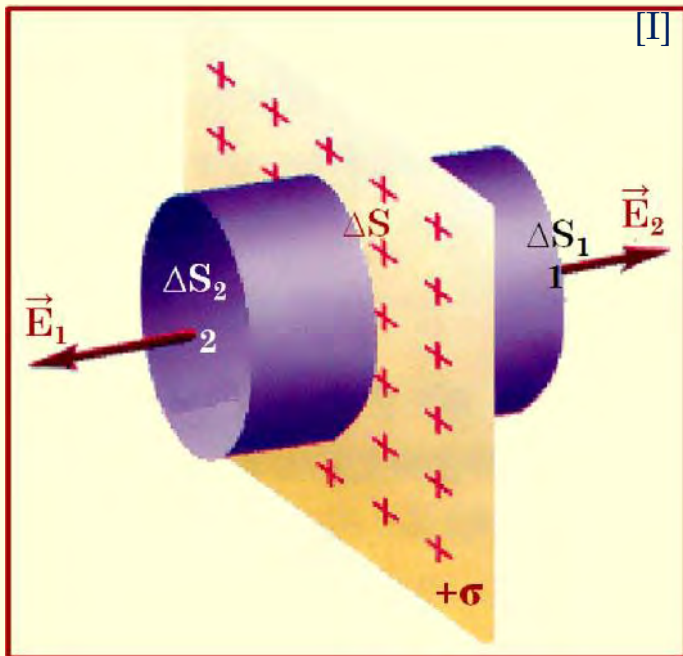
• მუხტის არათანაბარი განაწილებისას, მოცემულ წერტილში:

$$\sigma = dQ / dS \quad (3.6)$$

$$\rho = dQ / dV \quad (3.7)$$

✓ გაუსის თეორემის გამოყენება მარტივდება, თუ დამუხტული სხეულის ირგვლივ წარმოდგენით ავაგებთ ჩაკეტილ ზედაპირს {გაუსის ზედაპირი}, რომელშიც თავსდება სივრცის ჩვენთვის საინტერესო არე და რომელზეც ხდება ინტეგრება;

4. თანაბრად დამუხტული უსასრულო სიბრტყის ველის დაძაბულობა



I. თანაბრად დამუხტული (+σ) უსასრულო **სიბრტყის** ველი:

- მოსახერხებელი გაუსის ზედაპირია **ცილინდრი** ;
- ნებისმიერი {მაგ. 1} წერტილისთვის არსებობს მეორე მხარეს სიმეტრიულად განლაგებული წერტილი {2};
- (3.1) => სრული ნაკადი **ორივე** ფუძეში გამავალი ნაკადების **ჯამია** {გვერდით ზედაპირს ძალწირები არ კვეთენ და მისთვის $\Phi=0$ }:

$$\Phi_E = \oint_S \mathbf{E}_n dS = \Phi_1 + \Phi_2 = E_1 \Delta S_1 + E_2 \Delta S_2 = 2E \Delta S \quad (4.1)$$

$$\cdot \{(3.2), (3.4)\} \Rightarrow \Phi_E = \epsilon_0^{-1} \Delta Q = \epsilon_0^{-1} \sigma \Delta S \quad (4.2)$$

$$! (4.1) = (4.2) \Rightarrow 2E \Delta S = \epsilon_0^{-1} \sigma \Delta S \Rightarrow \boxed{E = \sigma / 2\epsilon_0} \quad (4.3)$$

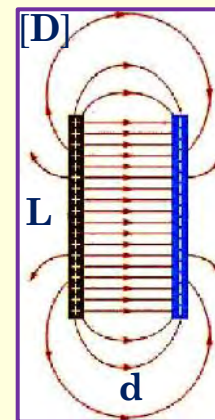
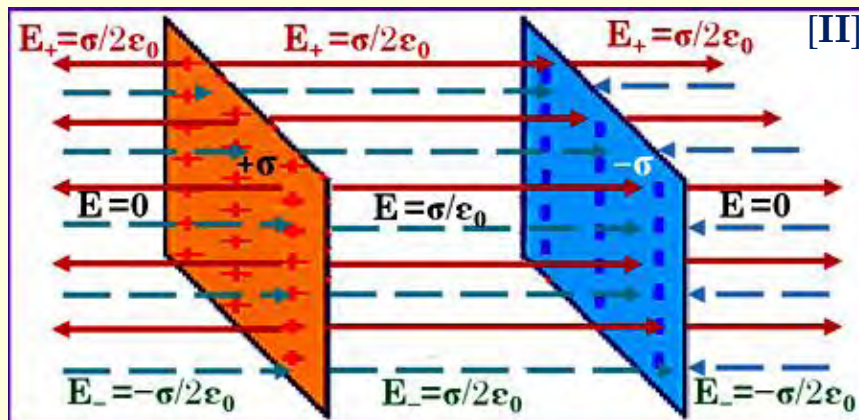
II. ორი უსასრულო $\{L \gg d\}$ სიგრძის, საპირისპირო ნიშნის, ტოლი მუხტის სიმკვრივის მქონე **სიბრტყეთა** ველი:

• სიბრტყეებს შორის სივრცეში ველი **ორმაგდება**:

$$E = E_+ + E_- = 2 |\sigma / 2\epsilon_0| = \sigma / \epsilon_0 \quad (4.4)$$

• სიბრტყეებს გარეთ **ჯამური** ველი **ნულის** ტოლია $E = E_+ - E_- = 0$;

• სასრულო ზომის სიბრტყეთა კიდევებზე ველი მახინჯდება და არაა ერთგვაროვანი [D];





“იყავით დაკავებული . ეს ყველაზე კარგი სულიერი წამალია დედამიწაზე და ერთერთი ყველაზე ეფექტური.” Dale Carnegie

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1888 - 1955



სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 11

თემა:

სემესტრი II

ელექტროსტატიკა

88

1. თანაბრად დამუხტული სფერული ზედაპირის და სფეროს ველის დამახლოებები

075

2. გაუს-ოსტროგრადსკის თეორემის დიფერენციალური სახე

077

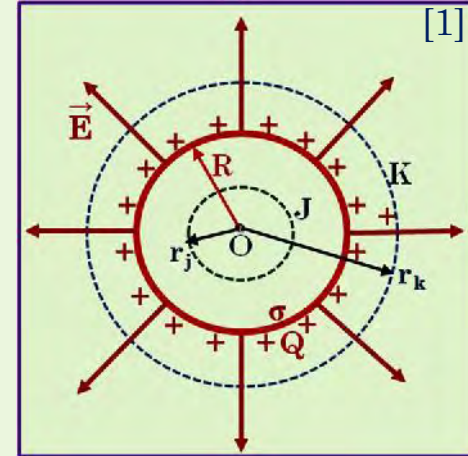
3. ელექტროსტატიკურ ველში მუხტის გადაადგილებაზე შესრულებული მუშაობა

078

1. თანაბრად დამუხტული სფერული ზედაპირის და სფეროს ველის დამახულობები

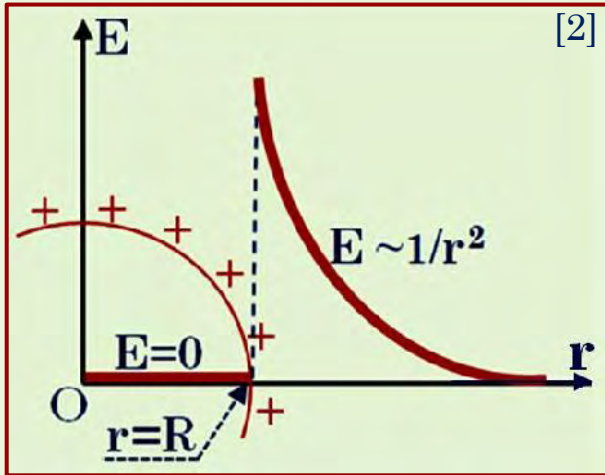
III. თანაბრად დამუხტული **სფერული ზედაპირის** (**სზ-ს**) ველი [1]:

- **R** რადიუსიანი **სზ**, მუხტის $+\sigma$ ზედაპირული სიმკვრივით, ქმნის ველს, რომელიც ხასიათდება ცენტრალური სიმეტრიით {ნებისმიერი წერტილის \vec{E} ვექტორი გადის **სზ-ს** ცენტრზე და $E=E(r)$ };
- შევადაროთ ველის დამახულობები წერტილებსთვის -
 - დამუხტული **სზ-ს შიგნით**, **J** სფერულ ზედაპირზე (რადიუსი r_j);
 - დამუხტული **სზ-ს გარეთ**, **K** სფერულ ზედაპირზე (რადიუსი r_k);



- ვინაიდან $r_j < R$, **J** **სზ-ს** შიგნით [1],[2] $q=0$ და $E=0$;
- $r_k > R$, ე.ი. $4\pi r_k^2$ ფართობის **K** **სზ-ს** შიგნით აღმოჩნდება მთელი **Q** მუხტი და გაუსის თეორემით

$$\Phi_E = Q/\epsilon_0 \quad (1.1)$$



▪ ასევე (10.3.1) \Rightarrow სფერული ზედაპირისთვის

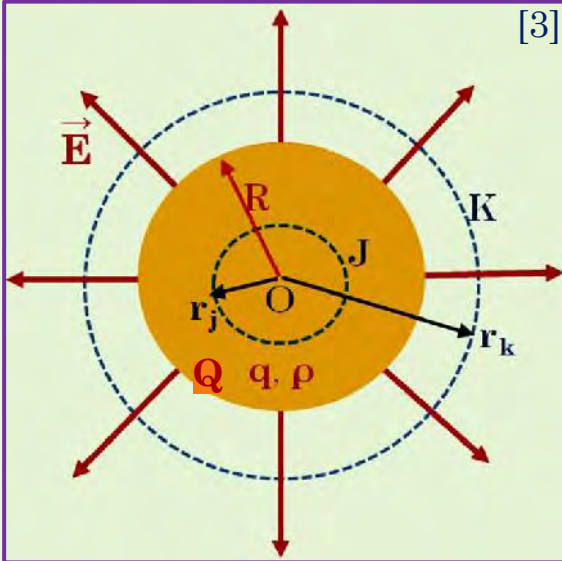
$$\Phi_E = \oint_s \mathbf{E}_n dS = \oint_s \mathbf{E} dS = \mathbf{E} \oint_s dS = \mathbf{E} 4\pi r^2 \quad (1.2)$$

▪ {(1.1) = (1.2)} $\Rightarrow \mathbf{E} 4\pi r^2 = Q / \epsilon_0 \Rightarrow \mathbf{E} = Q / 4\pi \epsilon_0 r^2 \quad (1.3)$

▪ (1.3) \Rightarrow სფერული ზედაპირის გარეთ დამახულობა შეესაბამება ზედაპირული მუხტის თითქოსდა სფეროს ცენტრში განთავსებას [2];

▪ (10.3.3) $\Rightarrow Q = \sigma 4\pi R^2 \Rightarrow (1.3) \Rightarrow \mathbf{E} = \sigma R^2 / \epsilon_0 r^2 \quad (1.4)$

[3]



IV. თანაბრად დამუხტული სფეროს ველი:

▪ Q მუხტი თანაბრადაა განაწილებული R რადიუსიანი სფეროს $V=(4/3)\pi R^3$ მოცულობაში [3], მუხტის მოცულობითი სიმკვრივით $\rho = Q/V = 3Q/4\pi R^3$ (1.5)

▪ შევადაროთ ველის დაძაბულობები -

- დამუხტული სფეროს გარეთ, K სფერულ ზედაპირზე (რადიუსი r_k);
- დამუხტული სფეროს შიგნით, J სფერულ ზედაპირზე (რადიუსი r_j);

▪ დამუხტული სფეროს გარეთ, K სფ-ზე {(1.3)-ს ანალოგიურად} დაძაბულობა შეესაბამება ზედაპირული მუხტის თითქოსდა სფეროს ცენტრში განთავსებას $E = Q/4\pi\epsilon_0 r_k^2$ [4];

▪ J სფ-ზე ($r_j < R$):

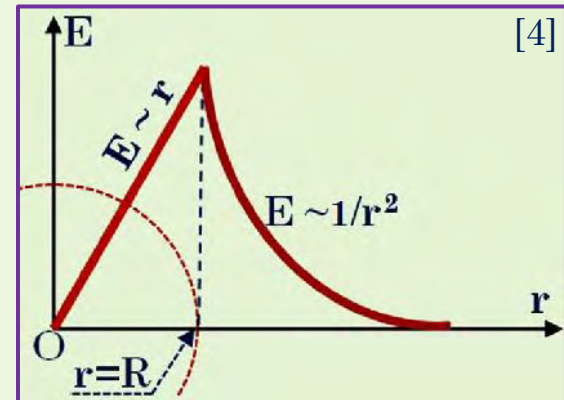
$$\bullet (10.3.1) \Rightarrow \Phi_E = \oint_S \mathbf{E}_n dS = \oint_S \mathbf{E} dS = E \oint_S dS = E 4\pi r_j^2 \quad (1.6)$$

$$\bullet (10.3.2) \Rightarrow \Phi_E = q_j / \epsilon_0 = \rho (4/3)\pi r_j^3 / \epsilon_0 \quad (1.7)$$

$$\bullet \{(1.6)=(1.7)\} \Rightarrow E 4\pi r_j^2 = \rho (4/3)\pi r_j^3 / \epsilon_0 \Rightarrow$$

$$E = \rho r_j / 3\epsilon_0 = Q r_j / 4\pi\epsilon_0 R^3 \quad (1.8)$$

ე.ი., $E \sim r$ - სფეროს შიგნით ველის დაძაბულობა იზრდება ცენტრამდე მანძილის პროპორციულად [4];



2. გაუს-ოსტროგრადსკის თეორემის დიფერენციალური სახე

✓ გაუს-ოსტროგრადსკის თეორემის **დიფერენციალური სახე** განსაზღვრავს ველის დაძაბულობას მუხტის ნებისმიერი სივრცული განაწილებისას;

▪ **დივერგენცია** (**div**, ლათ. *divergere* - განსხვავების გამოაშკარავება) დიფერენციალური ოპერატორი, რომელიც ვექტორულ ველს გარდაქმნის სკალარულ ველად;

▪ ოსტროგრადსკის თეორემით რაიმე \vec{X} ვექტორის ნაკადი ნებისმიერი ჩაკეტილი ზედაპირის მიმართ უტოლდება ინტეგრალს ამ ზედაპირით შემოსაზღვრულ მოცულობაზე ვექტორის **დივერგენციიდან**:

$$\oint_S \mathbf{X}_n dS = \int_V \text{div} \vec{X} dV \quad (2.1)$$

და

$$\text{div} \vec{X} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} (1/\Delta V) \oint_S (\vec{X} d\vec{S}) \quad (2.2)$$

✓ ელექტრული ველის დაძაბულობის ნაკადისთვის {(2.1),(2.2) შესაბამისად}:

$$\text{div} \vec{E} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} (1/\Delta V) \oint_S (\vec{E} d\vec{S}) \quad (2.3)$$

▪ გაუსის თეორემით, ΔV მოცულობაში q მუხტის $\langle \rho \rangle$ საშუალო სიმკვრივისას

$$\oint_S (\vec{E} d\vec{S}) = q/\epsilon_0 = \langle \rho \rangle \Delta V / \epsilon_0 \quad \longrightarrow \quad (1/\Delta V) \oint_S (\vec{E} d\vec{S}) = \langle \rho \rangle / \epsilon_0 \quad (2.4)$$

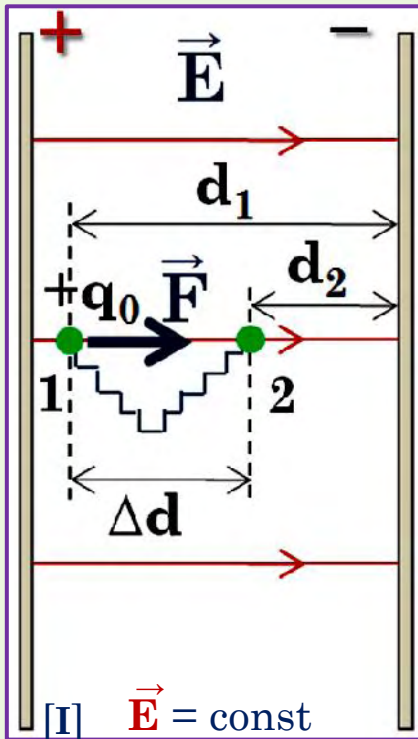
• $\Delta V \rightarrow 0$ ე.ი., ამ წერტილში $\langle \rho \rangle \rightarrow \rho$ და $\langle \rho \rangle / \epsilon_0 \rightarrow \rho / \epsilon_0$ (2.5)

▪ {(2.3), (2.4), (2.5)} \longrightarrow $\text{div} \vec{E} = \rho / \epsilon_0$ (2.6)

გაუს-ოსტროგრადსკის თეორემის დიფერენციალური სახე

$$\text{div} \vec{E} = \partial E_x / \partial x + \partial E_y / \partial y + \partial E_z / \partial z$$

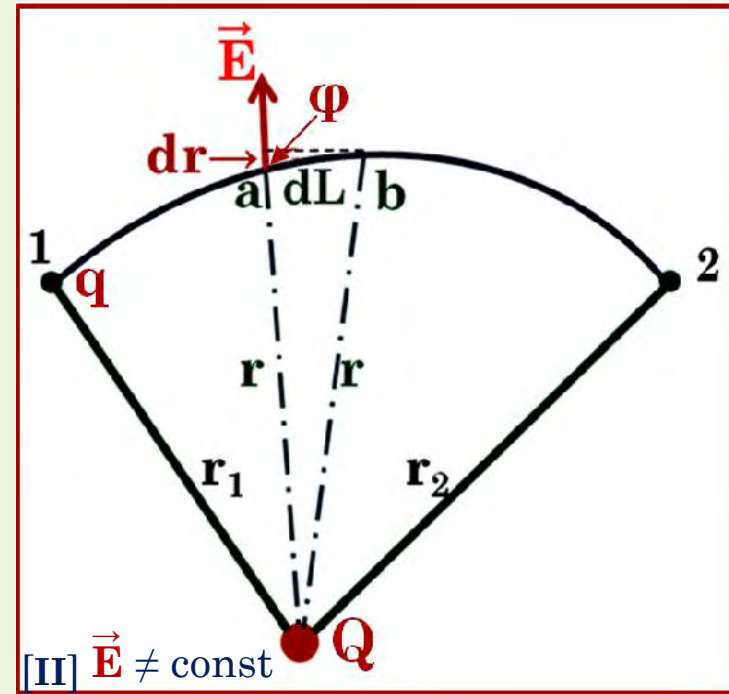
3. ელექტროსტატიკურ ველში მუხტის გადაადგილებაზე შესრულებული მუშაობა



✓ ელექტროსტატიკური ველი შეასრულებს გარკვეულ მუშაობას, თუ ველის მხრიდან q მუხტზე მოქმედი ძალა გადაადგილებს ამ მუხტს;

I. \vec{E} დამახულობის ერთგვაროვანი ველი: $\Delta d = (d_1 - d_2)$ მანძილზე q მუხტის გადაადგილებისას ველის მხრიდან მოქმედი $\vec{F} = \text{const}$ ძალა შეასრულებს მუშაობას: $A = F\Delta d = F(d_1 - d_2) = qE(d_1 - d_2) = qE\Delta d$ (3.1)

▪ იმავე (1-2) წერტილებს შორის უფრო რთული ტრაექტორიით მოძრაობისას მუშაობის სიდიდე რჩება უცვლელი, მას მაინც $(d_1 - d_2)$ განსაზღვრავს;



II. Q წერტილოვანი მუხტის ველში q მუხტის (1-2) წერტილებს შორის მოძრაობისას, მათ შორის მანძილი r და ძალა F განუწყვეტლივ იცვლება;

• ვიხილავთ dA -ს მცირე dL უბანზე:

$$dA = FdL \cos \phi = Fdr = (k_0 Qq/r^2)dr \quad (3.2)$$

მაშინ, $A = \int dA = k_0 Qq \int_{r_1}^{r_2} dr/r^2 = k_0 Qq \left(-1/r \right) \Big|_{r_1}^{r_2} = k_0 Qq \left[(1/r_1) - (1/r_2) \right]$ (3.3)

▪ მუშაობა არ არის დამოკიდებული გზის ფორმაზე, მას საწყისი და საბოლოო მდებარეობა განსაზღვრავს;

✓{(3.1),(3.3)} ➔ როგორც ერთგვაროვან, ასევე წერტილოვანი მუხტის ველში ელექტროსტატიკური ძალის მუშაობა (სიმძიმის ძალის მუშაობის მსგავსად) არაა დამოკიდებული ტრაექტორიის ფორმაზე და შეკრულ წირზე ნულის ტოლია; ანუ:

- ელექტროსტატიკური ველი პოტენციური (კონსერვატიული) ველია !
- ველში მოქმედი ძალები - პოტენციური ძალებია !

▪ $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$ (3.4) => (3.2)

$$d\mathbf{A} = \mathbf{F} d\mathbf{L} \cos\phi = q\mathbf{E} d\mathbf{L} \cos\phi = q\mathbf{E}_L d\mathbf{L} \quad (3.5) \quad \rightarrow$$

$$\mathbf{A} = q \int_{r_1}^{r_2} \mathbf{E}_L d\mathbf{L} \quad (3.6)$$

▪ ჩაკეტილ ტრაექტორიაზე ($r_1 = r_2$) $\mathbf{A} = 0$, მაგრამ $q \neq 0$, ე.ი.:

$$\oint \mathbf{E}_L d\mathbf{L} = 0 \quad (3.7)$$

✓ დაძაბულობის ვექტორის ცირკულაცია L წირზე 0 -ს ტოლია (ველის პოტენციურობის პირობა);



“ადამიანთა უმრავლესობა საკმარისადაა აღზრდილი, რომ სავსე პირით არ ისაუბრონ, მაგრამ მათ არ ერიდებათ აკეთონ ეს ცარიელი თავით.” Orson Welles



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1915 - 1985

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 12

თემა:

სემესტრი II

ელექტროსტატიკა

88·

081

1. პოტენციალი. პოტენციალთა სხვაობა

083

2. ეკვიპოტენციარი ზედაპირები. პოტენციალის კავშირი ველის დამახულობასთან

085

3. ელექტრული დიპოლი

086

4. დიპოლი გარე ელექტრულ ველში

1. პოტენციალი. პოტენციალთა სხვაობა.

▪ სხვადასხვა საკითხთა განხილვა-გადაწყვეტისას მეტად წარმატებულია ენერგეტიკული მიდგომა.
 • ელექტრული მოვლენების შესწავლისას ეს მიდგომა ხორციელდება **პოტენციალის**, **პოტენციალთა სხვაობის (ძაბვის)**, მუხტის პოტენციური ენერჯის ცნებების გამოყენებით;

▪ {ველის კონსერვატიულობიდან გამომდინარე} ელექტროსტატიკური ველის მუშაობა ტოლი უნდა იყოს ამ ველში **მუხტის პოტენციური ენერჯის** ცვლილებისა შებრუნებული ნიშნით

$$dA = -dW \quad (1.1)$$

I. E დაძაბულობის **ერთგვაროვანი** ველი:

$$A = F\Delta d = F(d_1 - d_2) = qE(d_1 - d_2) = - (qEd_2 - qEd_1) = - (W_{p2} - W_{p1}) = -\Delta W_p \quad (1.2)$$

$$W_p = qEd \quad (1.3)$$

II. Q წერტილოვანი მუხტის ველში, q სასინჯი მუხტის უსასრულო მცირე dr მანძილზე გადაადგილებისას

$$dA = (k_0 Qq/r^2) dr = -dW_p \quad (1.4)$$

$$W_p = k_0 Qq/r \quad (1.5)$$

✓ ველის ნებისმიერ წერტილში W_p პოტენციური ენერჯია არა მარტო ველს ახასიათებს, არამედ q **სასინჯ მუხტზეც** არის დამოკიდებული. ამიტომ, **ველის** მახასიათებლად იყენებენ **φ პოტენციალის** ცნებას

$$\varphi = W_p / q \quad (1.6)$$

▪ (1.6) $\Rightarrow \varphi = W_p$, თუ $q=1$. ველის მოცემული წერტილის **პოტენციალი** რიცხობრივად ამ წერტილში მოთავსებული **ერთეულოვანი დადებითი მუხტის** პოტენციური ენერჯის ტოლია;

▪{(1.5) $W_p = k_0 Qq/r \Rightarrow \varphi = W_p/q$ (1.6)} \Rightarrow Q წერტილოვანი მუხტის ველის პოტენციალი მისგან r მანძილზე:

$$\varphi = k_0 Q/r \quad (1.7);$$

▪{(1.7) $\Rightarrow A = k_0 Qq[(1/r_1) - (1/r_2)]$ (11.3.3)} \Rightarrow

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = -q(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (1.8)$$

• $(\varphi_2 - \varphi_1) = \Delta\varphi$ - პოტენციალის ცვლილება (1.9)

• $(\varphi_1 - \varphi_2) = U$ - პოტენციალთა სხვაობა, ძაბვა (1.10)

▪{(1.7), (1.8)} \Rightarrow თუ $r_2 = \infty \Rightarrow \varphi_2 = 0 \Rightarrow \varphi = A/q$

• ველის მოცემული წერტილის პოტენციალი რიცხობრივად იმ მუშაობის ტოლია, რომელსაც ასრულებს ელექტრული ძალა ამ წერტილიდან უსასრულობაში ერთეულოვანი დადებითი მუხტის გადაადგილებისას;

▪(1.7) $\Rightarrow \varphi_\infty = 0$, ე.ი. მანძილის ზრდასთან ერთად φ მცირდება და უსასრულობაში ნულს უტოლდება;

▪{(1.8), (1.10) $\Rightarrow A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU$ } \Rightarrow

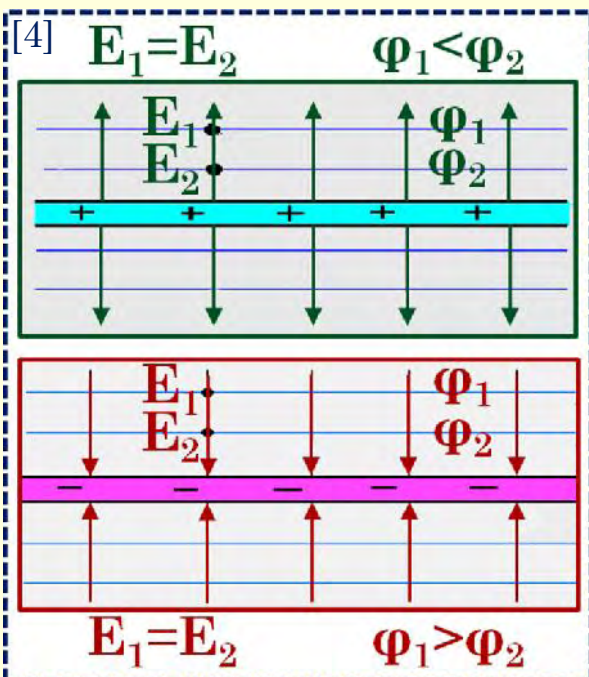
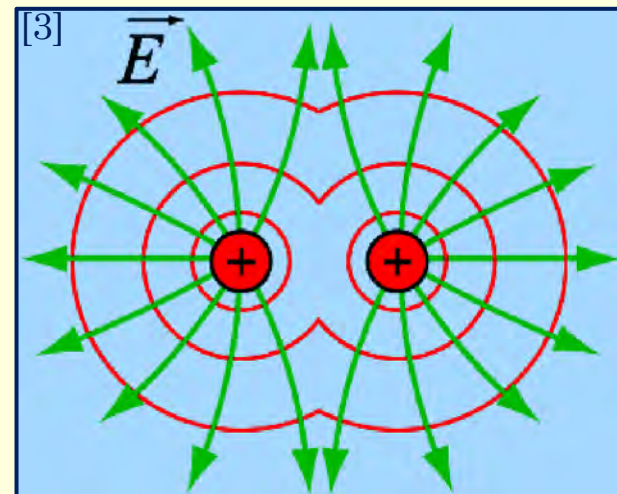
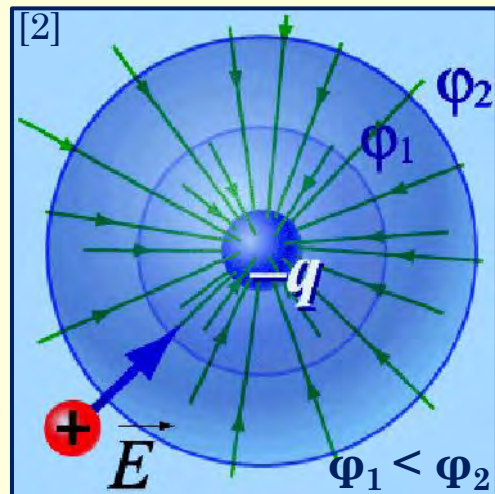
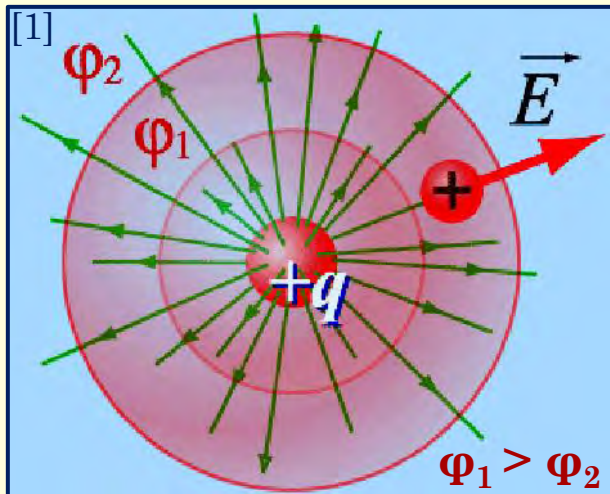
$$[U] = [A]/[q] = 1 \text{ჯოული} / 1 \text{კულონი} = 1 \text{ვოლტი}$$

• 1 ვოლტი ისეთ ორ წერტილს შორის (პოტენციალთა სხვაობა) ძაბვაა, რომელთა შორის 1 კულონი მუხტის გადაადგილებისას სრულდება 1 ჯოული მუშაობა;

• $[W]$ ენერგიის ერთეულად 1 ჯ-თან ერთად გამოიყენება 1 ელექტრონ-ვოლტი (1 ევ);

• 1ევ ის ენერგიაა, რომელსაც შეიძენს ელექტრონი ველში 1ვ პოტენციალთა სხვაობის გავლის შედეგად $1 \text{ევ} = (1.6 \cdot 10^{-19} \text{კ})(1 \text{ვ}) = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ჯ}$;

2. ეკვიპოტენციური ზედაპირები. პოტენციალის კავშირი ველის დამაბულობასთან



• ელექტრული ველის, მისი **ძალური** მახასიათებლის - **E დამაბულობის** ვიზუალიზაცია მიიღწევა ძალწირების გამოყენებით;

✓ ველის **ენერგეტიკული** მახასიათებლის - **φ პოტენციალის** განაწილებას სივრცეში ასახავენ **ეკვიპოტენციური ზედაპირებით**;

• **ეკვიპოტენციური ზედაპირი** - ისეთი ზედაპირია, რომლის ყოველ წერტილში პოტენციალს ერთი და იგივე მნიშვნელობა აქვს ($\varphi = \text{const}$) [1]-[4];

• ეკვიპოტენციური ზედაპირის **ნორმალი** გვიჩვენებს ველის დამაბულობის ვექტორის **მიმართულებას**;

▪ {როდესაც} მუხტი ნორმალის გასწვრივ მცირე dn გადაადგილდება ასრულებს, (1.2) \rightarrow

$$dA = Fdn = qEdn \quad (2.1)$$

$$\{(1.4), (1.6) \Rightarrow (2.1)\} \rightarrow dA = q[\varphi_1 - (\varphi_1 + d\varphi)] = -q d\varphi \quad (2.2)$$

$$\{(2.1), (2.2)\} \rightarrow \mathbf{E} = -d\varphi/dn = -\text{grad}\varphi \quad (2.3)$$

$$\text{ანუ } \{E_x = -\partial\varphi/\partial x; E_y = -\partial\varphi/\partial y; E_z = -\partial\varphi/\partial z\} \quad (2.4)$$

$$\text{ერთგვაროვანი ველისას } \{1.I\}: \mathbf{E} = (\varphi_1 - \varphi_2)/d \quad (2.5)$$

$$\bullet (2.5) \rightarrow [E] = [\varphi]/[d] = 1 \text{ ვ/მ}$$

• 1 ვ/მ ისეთი ველის დამაბულობაა. რომლის პოტენციალი მცირდება 1 ვოლტით ძალწირის გასწვრივ 1 მეტრით გადანაცვლებისას;

$$\bullet \text{ასევე ხმარებაშია: } [E] = [F]/[q] = 1 \text{ ნ/კ}$$

• 1 ნ/კ - ისეთი ერთგვაროვანი ველის დამაბულობაა, რომელშიც 1 კ მუხტზე 1 ნ ძალა მოქმედებს;

$$1 \text{ ნ/კ} = 1 \text{ ვ/მ}$$

3. ელექტრული დიპოლი

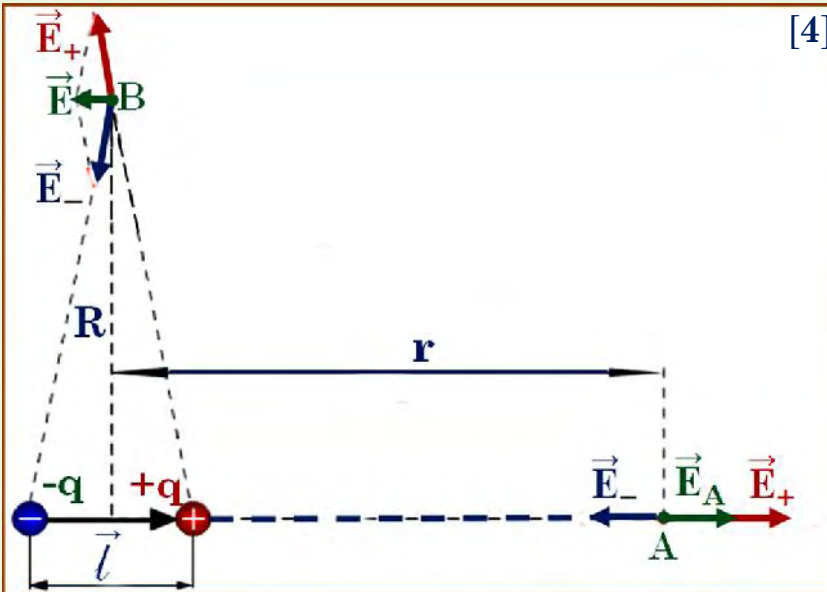
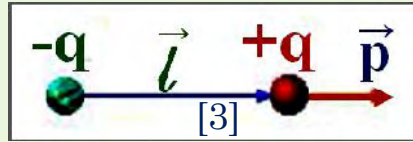
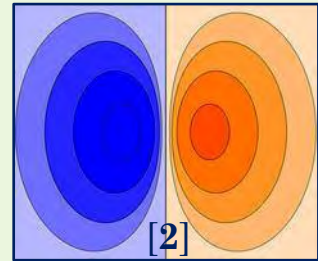
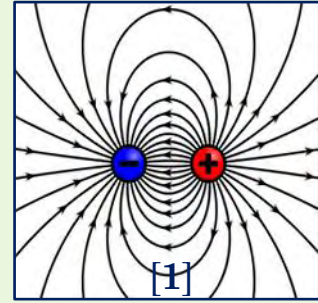
✓ **ელექტრული დიპოლი** – იდეალიზირებული, ელექტრონეიტრალური სისტემა, შექმნილი ტოლი, საპირისპირო ნიშნის წერტილოვანი მუხტებით {[1]-დიპოლის ძალწირები};

▪ დიპოლის შემადგენელი თითოეული მუხტი “ქმნის” *კვანძოტეციალური* ზედაპირების *საკუთარ*, მაგრამ *ურთიერთგავლენის* შემცველ სიმრავლეს [2];

▪ მუხტები გარკვეული l მანძილით {დიპოლის **მხარით**} არიან დაცილებულნი. \vec{l} ვექტორის მიმართულებად მიღებულია მიმართულება *უარყოფითი* მუხტიდან *დადებითისკენ* [3];

▪ ელექტრული დიპოლის ძირითადი მახასიათებელია \vec{p} **დიპოლის მომენტი**

$$\vec{p} = q\vec{l} \quad (3.1)$$



✓ სივრცის *ნებისმიერ* წერტილში დიპოლით შექმნილი ელექტრული ველის \mathbf{E} დამახულობა სუპერპოზიციის პრინციპის თანახმად [4]

$\vec{E} = \vec{E}_- + \vec{E}_+ \quad (3.2) \Rightarrow$ A წერტილში $\mathbf{E} = \mathbf{E}_+ - \mathbf{E}_- \quad (3.3)$

▪ მიღებული (3.4), (3.5) გამოსახულებები იღებს მარტივ სახეს, რადგან დაცულია პირობა $r \gg l$;

• A წერტილში $\mathbf{E} = (4\pi\epsilon_0)^{-1} 2pr^{-3} \quad (3.4)$

$\{\mathbf{E} = (kq/r_+^2) - (kq/r_-^2) = kq(r_- - r_+) \cdot (r_- + r_+) / (r_+^2 r_-^2) \approx (4\pi\epsilon_0)^{-1} q \cdot l \cdot 2r / r^4 = (4\pi\epsilon_0)^{-1} p 2r^{-3} \}$

• B წერტილში $\mathbf{E} = (4\pi\epsilon_0)^{-1} pR^{-3} \quad (3.5)$

4. დიპოლი გარე ელექტრულ ველში

✓ დიპოლის ქცევას გარე ელექტრულ ველში დიპოლის მომენტი განსაზღვრავს;

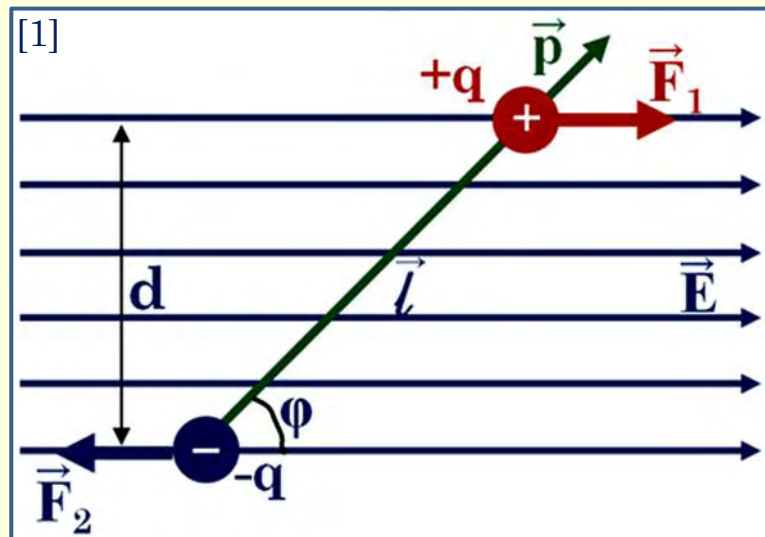
▪ \vec{E} დაძაბულობის ერთგვაროვან ველში, φ კუთხით მოთავსებულ დიპოლზე [1] იმოქედებს სიდიდით ტოლი და საპირისპიროდ მიმართული (\vec{F}_1, \vec{F}_2) ძალების მაბრუნებელი \vec{M} მომენტი:

$$\vec{M} = \vec{F}d = q\vec{E}d = q\vec{E}l\sin\varphi = \vec{p}\vec{E}\sin\varphi \quad (4.1)$$

ანუ

$$\vec{M} = [\vec{p}\vec{E}] \quad (4.2)$$

▪ მომენტის ზემოქმედებით დიპოლის ღერძი განთავსდება მაღწირების პარალელურად და ეცდება ამ მდგომარეობის შენარჩუნებას;



▪ დიპოლის შემობრუნებისას (ვთქვათ, φ_1 -დან φ_2 კუთხემდე) ელექტრული ველი ასრულებს მუშაობას

$$A = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M d\varphi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} pE \sin\varphi \cdot d\varphi = pE \{(-\cos\varphi_2) - (-\cos\varphi_1)\} = pE(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2) \quad (4.3)$$

{თუ ჩავთვლით, რომ $\vec{W} = 0$, როდესაც $\vec{p} \perp \vec{E}$ ($\varphi = 90^\circ$)} ელექტრული ველის ამ მუშაობის შესრულების შედეგად დიპოლის \vec{W} პოტენციური ენერჯია მცირდება

$$\Delta W = -A = -pE \cos\varphi = -\vec{p} \cdot \vec{E} \quad (4.4)$$



“კომპეტენტურია ის ადამიანი, ვინც წესებთან შესაბამისობაში ცდება.” *Paul Valery*

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1871 - 1945



სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 13

თემა:

სემესტრი II

ელექტროსტატიკა

გვ.

088

1. დიელექტრიკების პოლარიზაცია. პოლარიზაციის ვექტორი

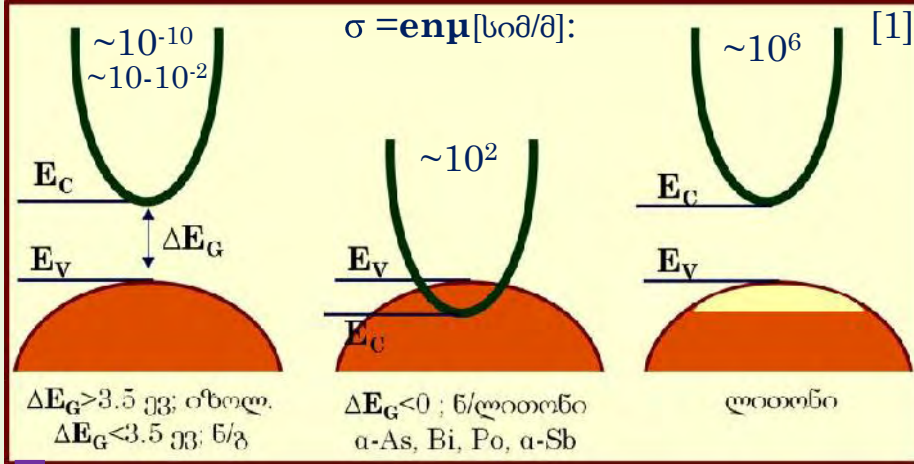
091

2. ელექტრული ველის დამახულობა დიელექტრიკში

092

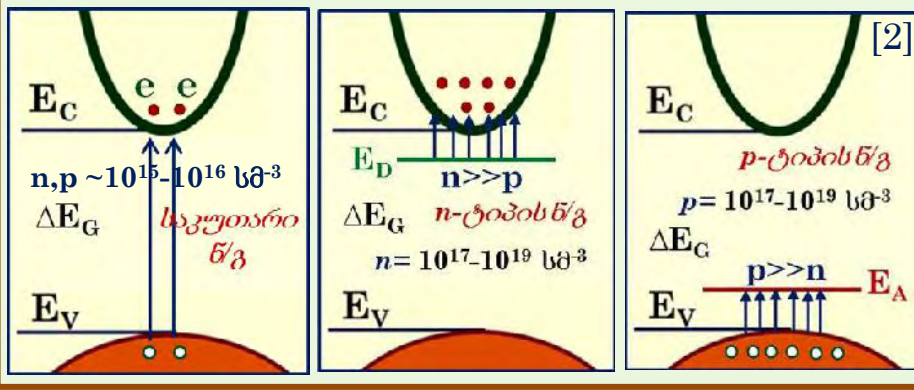
3. ელექტრული წანაცვლების ვექტორი. გაუსის თეორემა დიელექტრიკში

1. დიელექტრიკების პოლარიზაცია. პოლარიზაციის ვექტორი



▪ ელექტრული მახასიათებლებით მიღებული ნივთიერებათა დაყოფა **კარგ** (ლითონები) და **ცუდ** (იზოლიატორები \equiv დიელექტრიკები) გამტარებად; ▪ შუალედური მდგომარეობა უკავიათ **ნახევრად გამტარებს** და **ნახევრად ლითონებს** [1];

▪ დიელექტრიკების დაბალი გამტარობა უკავშირდება **თავისუფალი** ელექტრონების **მცირე** კონცენტრაციას $\sim 10^8 \text{ სმ}^{-3}$ { $\sim 10^{22} \text{ სმ}^{-3}$ ლითონებში } [2];




✓ **დიელექტრიკის პოლარიზაცია** - დიელექტრიკში **ბმული მუხტების** შეზღუდული წანაცვლება, ან **ელექტრული დიპოლების** შემობრუნება **გარე ელექტრული ველის** {**სხვა** ზემოქმედების - მექანიკური ძაბვის, ტემპერატურის} გავლენით, თუ სულაც **სპონტანურად** (**სეგნეტოელექტრიკები**);

▪ როგორი იქნება დიელექტრიკის **პოლარიზაცია**, ანუ რა **ზეგავლენას** მოახდენს **გარე მოქმედება** დიელექტრიკზე {გამოვლინდება **მუხტების** ურთიერთწანაცვლება, თუ **ორიენტაციული ცვლილებები**}, დამოკიდებულია **დიელექტრიკის აგებულებაზე**;

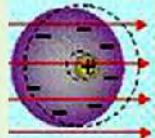
▪ **პოლარიზაცია** - დიელექტრიკის ისეთი მდგომარეობა, როდესაც მისი მოცულობის პრაქტიკულად **ნებისმიერ** ელემენტს **გააჩნია** ელექტრული **დიპოლის მომენტი**. ანუ: ▪ {თუმცა} **მოცულობის** ნებისმიერ მაკროსკოპულ ელემენტში **ჯამური მუხტი არ იცვლება**, მაგრამ **ზედაპირზე** ჩნდება **გარკვეული σ ზედაპირული სიმკვრივის ბმული მუხტი**;

I. არაპოლარული დიელექტრიკი (შედგება არაპოლარული მოლეკულებისგან)

$\vec{E}_0=0; \vec{p}=0; \vec{E}_p=0;$

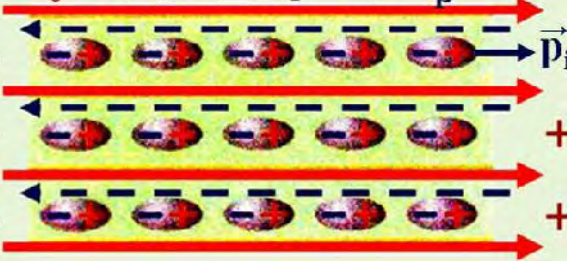


[1]



$E = E_0 - E_p$

$\vec{E}_0>0; \vec{p}=\sum \vec{p}_i \neq 0; \vec{E}_p \neq 0;$




$N_2, H_2, O_2, CO_2, CH_4, \dots$

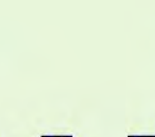
[1] პოლარიზაციის სახე - ელექტრონული {ორბიტების დეფორმაცია}. განხორციელების დრო $t = 10^{-15}$ წმ (უსწრაფესი მექანიზმი);

II. პოლარული დიელექტრიკი (შედგება პოლარული მოლეკულებისგან)

$\vec{E}_0=0; \vec{p}=0; \vec{E}_p=0;$

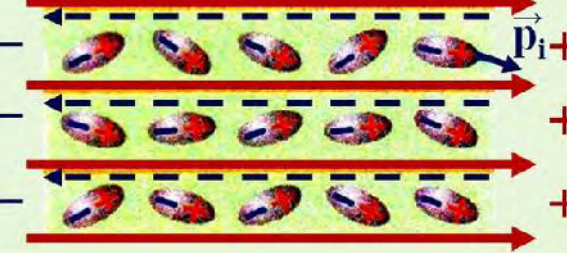


[2]



$E = E_0 - E_p$

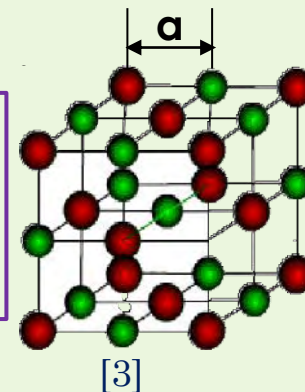
$\vec{E}_0>0; \vec{p}=\sum \vec{p}_i \neq 0; \vec{E}_p \neq 0;$



$H_2O, CO, SO_2, NH_3, \dots$

[2] პოლარიზაციის სახე - ორიენტაციული {დიპოლების უპირატესად ველის შესაბამისი ორიენტაცია}

III. კრისტალური აგებულების იონური დიელექტრიკი
 გარე ელექტრული ველის გავლენით
იონური ქვემესრების ურთიერთწანაცვლება
 {მესრის მუდმივაზე მცირე სიდიდით $\Delta a < a$ };



$NaCl, KCl, KBr, \dots$

[3] პოლარიზაციის სახე - იონური განხორციელების დრო $t = 10^{-13}$ წმ;

ზოგიერთ კრისტალურ დიელექტრიკებში {**პიეზოელექტრიკები**} პოლარიზაცია მექანიკური დეფორმაციითაც მიიღწევა;



კვარცი
 SiO_2



ტურმალინი
 $\text{Na}(\text{Li}, \text{Al})_3\text{Al}_6[(\text{OH})_4 | (\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}]$



სეგნეტის მარილი
 $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

სეგნეტოელექტრიკები - კრისტალები {სეგნეტის მარილი, BaTiO_3 , LiNbO_3 , ... }, რომლებიც ტემპერატურათა გარკვეულ ინტერვალში ხასიათდებიან **სპონტანური** (თავისთავადი) პოლარიზაციით;

•გარკვეულ T_K ტემპერატურაზე - **კიურის დიელექტრიკული წერტილი** - იცვლება სეგნეტოელექტრიკის კრისტალური მოდუფიკაცია და **სპონტანური პოლარიზაცია ქრება** {სეგნეტის მარილი - $T_K=297\text{K}$, BaTiO_3 - $T_K=392\text{K}$ };

✓ დიელექტრიკის პოლარიზაციის **ხარისხის** დასახასიათებლად გამოიყენება **პოლარიზაციის ვექტორი**, რომელიც ერთეულოვან მოცულობაში დიპოლური მომენტების ვექტორული ჯამის ტოლია

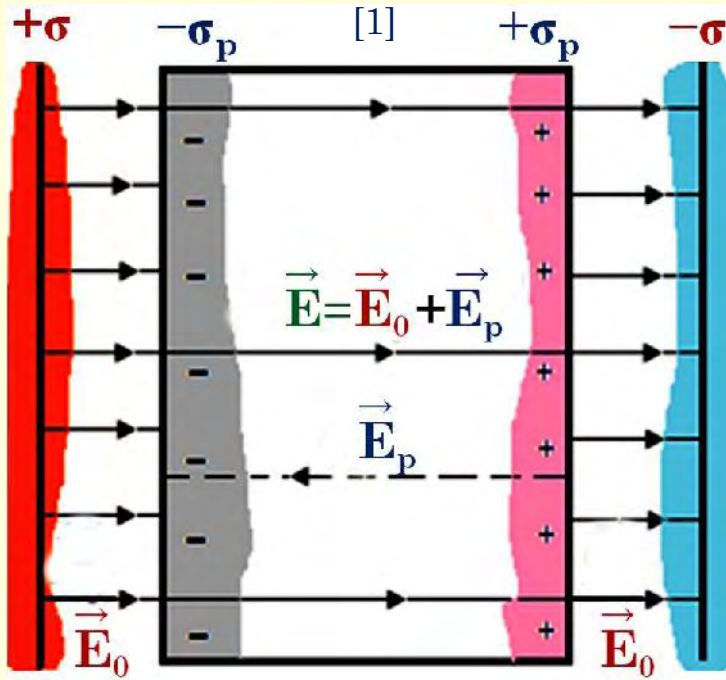
$$\vec{P} = (\sum_i \vec{p}_i) / \Delta V \quad (1.1)$$

$$\{(1.1)\Rightarrow P = p/V = ql / Sl = q/S = \sigma; [P] = \text{კ}\cdot\text{მ}/\text{მ}^3 = \text{კ}/\text{მ}^2\}$$

▪ წანაცვლებითი [1], თუ ორიენტაციული [2] პოლარიზაციისას, დიელექტრიკის მართობულ მოპირდაპირე წახნაგებზე ჩნდება {იხ.2-[1]} საპირისპირო ნიშნის და რიც-ხობრივად P -ს ტოლი სიმკვრივის **ბმული** ზედაპირული მუხტი $\sigma_p = P$ (1.2);

▪ არაერთგვაროვან დიელექტრიკში აღიძვრება ρ_p სიმკვრივის **ბმული** მოცულობითი მუხტიც $(-\rho_p) = \text{div} \vec{P}$ (1.3)

2. ელექტრული ველის დაძაბულობა დიელექტრიკში



▪ დამუხტული პარალელური ფირფიტებით შექმნილი \mathbf{E}_0 დაძაბულობის {გარე} ველში მოთავსებულ დიელექტრიკში, {პოლარიზაციის შედეგად} აღძრული ზედაპირული (ბმული) მუხტი ქმნის \mathbf{E}_p დაძაბულობის საკუთარ ველს [1];

▪ გაუსის თეორემის მიხედვით ორივე დაძაბულობა შეიძლება მუხტების ზედაპირულ სიმკვრივეთა შესაბამისი სიდიდეებით განისაზღვროს {თანაც, (1.2) $\sigma_p = P$ }:

$$\mathbf{E}_0 = \sigma / \epsilon_0 \quad (2.1) \quad \text{და} \quad \mathbf{E}_p = \sigma_p / \epsilon_0 = P / \epsilon_0 \quad (2.2)$$

▪ ამ ველების საპირისპირო მიმართულებების გათვალისწინებით დიელექტრიკში დამყარებული დაძაბულობის სიდიდე

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 - \mathbf{E}_p = \mathbf{E}_0 - P / \epsilon_0 \quad (2.3)$$

▪ პოლარიზაცია, ძირითადად, წრფივად და მოკიდებული ველის დაძაბულობაზე დიელექტრიკში

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (2.4)$$

• კოეფიციენტი χ დიელექტრიკული ამთვისებლობა ნივთიერების მახასიათებელი სიდიდეა {პოლარულ დიელექტრიკში ის, ასევე, ტემპერატურის უკუპროპორციული};

• (2.4) => (2.3) $\rightarrow \mathbf{E} = \mathbf{E}_0 - \chi \mathbf{E}$ ანუ

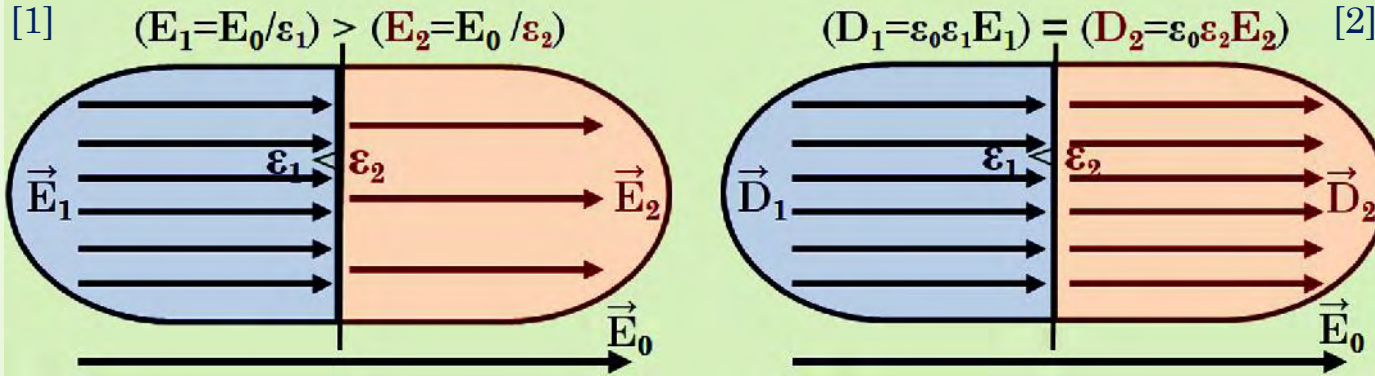
$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 / (1 + \chi) \quad (2.5)$$

დიელექტრიკში ველის დაძაბულობა $(1 + \chi)$ -ჯერ მცირდება;

• ე.ი., $(1 + \chi)$ წარმოადგენს ფარდობით დიელექტრიკულ შეღწევადობას

$$1 + \chi = \epsilon \quad (2.6) \quad \text{და} \quad \mathbf{E} = \mathbf{E}_0 / \epsilon \quad (2.7)$$

3. ელექტრული წანაცვლების ვექტორი. გაუსის თეორემა დიელექტრიკში



✓ \vec{D} - ელექტრული წანაცვლების (ინდუქციის) ვექტორი;

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E} \quad (3.1)$$

▪ ორი ჭსხვადასხვა - ϵ_1, ϵ_2 დიელექტრიკის გამყოფ საზღვარზე -

- იცვლება \vec{E} ელექტრული ველის დაძაბულობის ვექტორის სიდიდე [1];
- მაგრამ, უცვლელი რჩება ელექტრული წანაცვლების ვექტორი [2];

✓ დიელექტრიკში:

▪ წერტილოვანი მუხტისას -

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon (q / 4\pi \epsilon_0 \epsilon r^2) = q / 4\pi r^2 \quad (3.4)$$

▪ გაუსის თეორემა დიელექტრიკში უმნიშვნელოდ იცვლის სახეს:

$$\Phi_E = Q / \epsilon_0 \Rightarrow \Phi_D = Q \quad (3.5)$$

Q - ცვლავს შემოსაზღვრულ მოცულობაში არსებული სრული მუხტია

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i$$

▪ {(2.6) $1 + \chi = \epsilon$ } \Rightarrow (3.1) \Rightarrow

$$\vec{D} = \epsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (3.2)$$

{(2.4) $\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E}$ } \Rightarrow (3.2)

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (3.3)$$

▪ ველის მახასიათებელი $\vec{E}, \vec{D}, \vec{P}$ ვექტორები:

• \vec{E} დაძაბულობის ვექტორი - ველის ძირითადი მახასიათებელი, ითვალისწინებს ყველა მუხტის (თავისუფალი, ბმული) წვლილს ელექტრული ველის შექმნაში;

• \vec{D} ელექტრული წანაცვლების ვექტორი - აღწერს ველის შექმნაში მხოლოდ თავისუფალი მუხტების წვლილს;

• \vec{P} პოლარიზაციის ვექტორი q_i - მხოლოდ ბმული მუხტების მონაწილეობას;



“ამ ქვეყნად ყველაზე მძიმე სენი - ფიქრის ჩვევაა. ის არ იკურნება.”
Erich Maria Remarque



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1898 - 1970

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 14

თემა:

სემესტრი II

ელექტროსტატიკა

88·

094

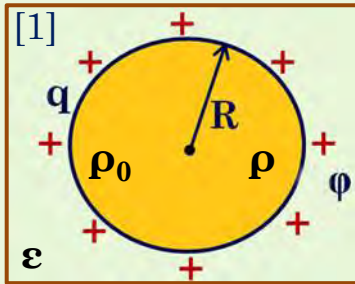
1. გამტარის და კონდენსატორის ტევადობა

097

2. დამუხტული კონდენსატორის (ელექტროსტატიკური ველის) ენერგია

1. გამტარის და კონდენსატორის ტევადობა

✓ ცალკეულ გამტარებს და {განსაკუთრებით} გამტართა სისტემებს (კონდენსატორებს) მუხტის {ანუ, ენერჯის} დაგროვების უნარი გააჩნიათ. ეს უნარი აიწერება სიდიდით - ელექტროტევადობით (C);

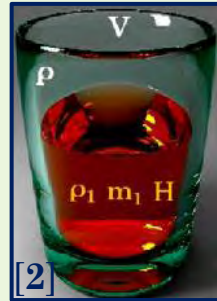


▪ განცალკევებულ გამტარზე q მუხტის გადატანისას, მასზე ჩნდება φ პოტენციალი, რომლის სიდიდე ამ გამტარის C ელექტროტევადობაზეა დამოკიდებული;

▪ C -ს განსაზღვრავს გამტარის ფორმა, ზომა, გარემოს ε დიელექტრიკული შეღწევადობა. მაგალითად, R რადიუსიანი სფეროს [1] ტევადობა

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R \quad (1.1)$$

▪ ამავე დროს, C ელექტროტევადობა საერთოდ არაა დამოკიდებული გამტარის ნივთიერების გვარობაზე (ρ_0), კუთრ წინააღობაზე (ρ), გადაცემულ q მუხტსა, თუ აღძრულ φ პოტენციალზე {ისევე, როგორც ჭიქის V მოცულობაზე გავლენას არ ახდენს მისი კედლის და ჩასხმული სითხის სიმკვრივეები ρ , ρ_1 , სითხის მასა m_1 , და H სვეტის სიმაღლე [2]};



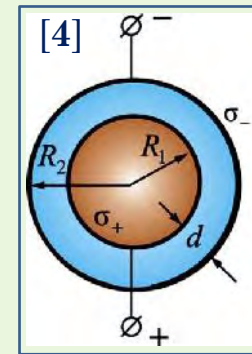
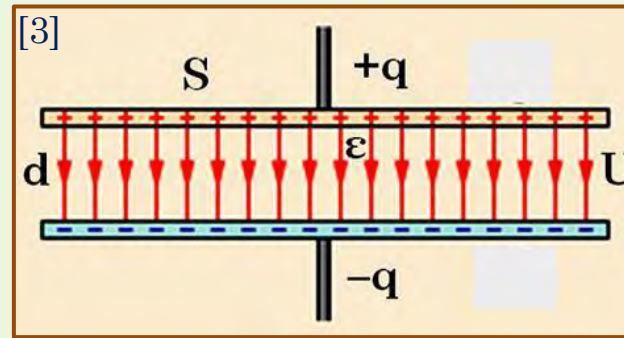
▪ გამტარის თვისება - ელექტროტევადობა რიცხობრივად გამტარის მუხტის და პოტენციალის ფარდობის ტოლია $C = q/\varphi$ (1.2)

• ელექტროტევადობის ერთეულია ფარადა: (1.2) $\rightarrow [C] = 1\text{კ}/\text{ვ} = 1\text{ფ}$; 1ფ ისეთი განცალკევებული გამტარის ელექტროტევადობაა, რომლის პოტენციალს 1 კ მუხტი 1ვ-ით ცვლის;

• (1.1) \rightarrow ელექტრული მუდმივას ერთეულია: $[\varepsilon_0] = [C]/[R] = 1\text{ფ/მ}$;

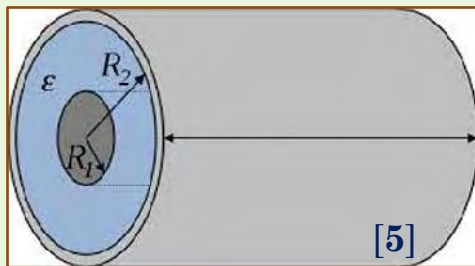
• 1 ფ დიდი ტევადობაა (ვაკუუმში ასეთი ტევადობა ექნებოდა $R=10^6$ კმ რადიუსის სფეროს}. დედამიწის ($R=6.4 \cdot 10^3$ კმ) ტევადობაა $C=711 \cdot 10^{-6}$ ფ = 711 მკვ;

▪ ელექტროტევადობის პრაქტიკული ერთეულებია: 1 მკვ = 10^{-6} ფ, 1 პკვ = 10^{-12} ფ;



✓ დიდი მუხტის (ე.ი., მნიშვნელოვანი ენერჯიის) დაგროვება მოსახერხებელია ახლოს განლაგებული ორი გამტარისგან შემდგარი სისტემით - კონდენსატორით:

- გამტარები - კონდენსატორის შემონაფენები - ერთმანეთისგან თხელი დიელექტრიკული ფენით არიან გამოყოფილნი;
- შემონაფენები, ძირითადად, ბრტყელი გამტარებია - ბრტყელი კონდენსატორი [3];
- არსებობს აგრეთვე სფერული [4] და ცილინდრული [5] კონდენსატორები;
- კონდენსატორის მუხტი - ერთი შემონაფენის q-ს აბსოლუტური მნიშვნელობაა;



▪ გაუსის თეორემის შესაბამისად, შემონაფენებს შორის არსებული ელექტრული ველის დაძაბულობა

$$E = \sigma / \epsilon_0 \epsilon = q / \epsilon_0 \epsilon S \quad (1.3)$$

▪ E, ასევე, განისაზღვრება შემონაფენებს შორის U ძაბვით და მათ შორის შუალედის d სიგანით

$$E = U / d \quad (1.4)$$

$$(1.4) \Rightarrow (1.2) \quad C = q / U = q / Ed \quad (1.5); \quad (1.3) \Rightarrow (1.5) \Rightarrow C = \epsilon_0 \epsilon S / d \quad (1.6)$$

(1.6) - ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროტევადობაა;

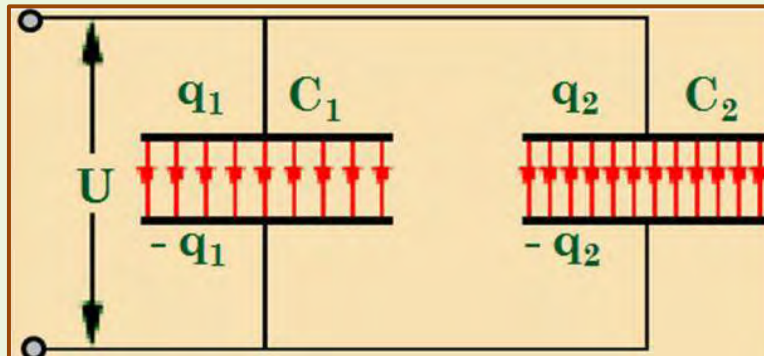
კონდენსატორის ტევადობის და ენერჯიის ვარირება შესაძლებელია კონდენსატორთა შერთებით:

• პარალელური შერთება :

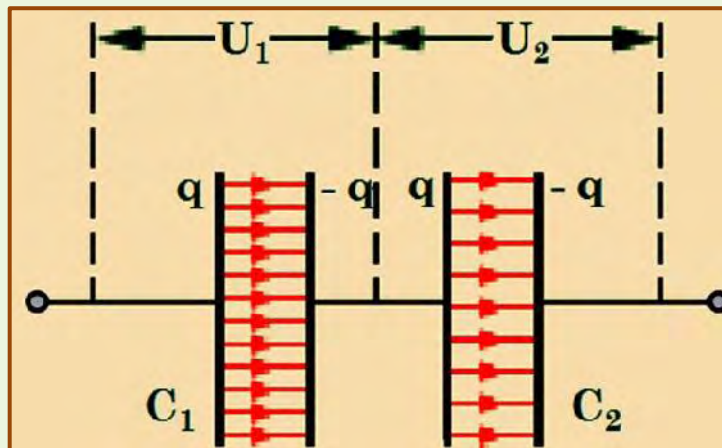
$$U=U_1=U_2; q=q_1+q_2;$$

$$C=(q_1+q_2)/U=q_1/U+q_2/U \rightarrow$$

$$C = C_1+C_2 \quad (1.7)$$



{1}



• მიმდევრობითი შერთება :

$$q=q_1=q_2; U=U_1+U_2;$$

$$C=q/(U_1+U_2)$$

$$1/C=(U_1+U_2)/q=(U_1/q)+(U_2/q) \rightarrow$$

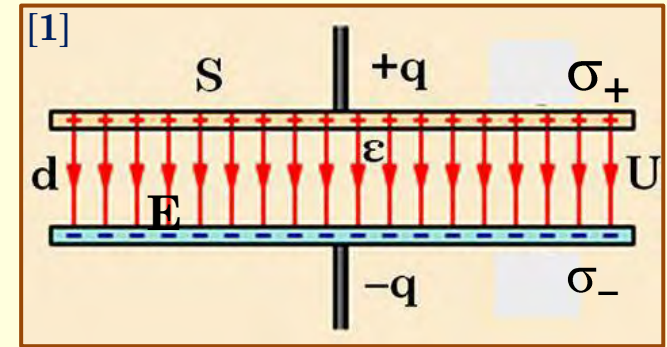
$$1/C = (1/C_1) + (1/C_2) \quad (1.8) \rightarrow$$

$$C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2) \quad (1.9)$$

2. დამუხტული კონდენსატორის (ელექტროსტატიკური ველის) ენერგია

✓ დამუხტული კონდენსატორის თითოეული შემონაფენის q მუხტი {თითქოსდა} იმყოფება მეორე შემონაფენის q მუხტის მიერ შექმნილ ელექტროსტატიკურ ველში;

▪ თითოეული შემონაფენის მუხტი ურთიერთქმედებს აღნიშნულ ელექტრულ ველთან, ე.ი. ამ მუხტს გააჩნია პოტენციური ენერგია, რომელსაც **კონდენსატორის ენერგიას** უწოდებენ;



▪ **კონდენსატორის W ენერგია** უტოლდება კონდენსატორის q მუხტის ერთი შემონაფენიდან მეორე შემონაფენზე {რომლის ველის დაძაბულობა $E_1 = E/2$ } გადასატანად შესასრულებელ მუშაობას: $W = A = Fd = qE_1d = qEd/2$ (2.1)

▪ $E = U/d$ და $C = q/U$ თანაფარდობების (2.1)-ში გამოყენებით ➔

$$W = qdE/2 = qU/2 = q^2/2C = CU^2/2 \quad (2.2)$$

▪ კონდენსატორის ენერგიის ფორმულა $W = CU^2/2$ (2.3) მარტივად გადაიწერება E დაძაბულობის ნებისმიერი ელექტროსტატიკური ველის ენერგიის დასადგენად:

{(1.6) $C = \epsilon_0 \epsilon S/d$ } => (2.3) ➔

$$W = CU^2/2 = (\epsilon_0 \epsilon S/d) \cdot (U^2/2) = (\epsilon_0 \epsilon S/d) \cdot (E^2 d^2/2) = \epsilon_0 \epsilon E^2 Sd/2 = \epsilon_0 \epsilon E^2 V/2 \quad (2.4)$$

• აქ, $V = Sd$ წარმოადგენს ველის გარკვეული არის (სივრცის) მოცულობას. (2.4)-ის V მოცულობაზე გაყოფით მიიღება w ველის ენერგიის სიმკვრივის გამოსახულება

$$w = \epsilon_0 \epsilon E^2/2 \quad (2.5); \quad \text{ვაკუუმში } \epsilon = 1 \text{ და } w = \epsilon_0 E^2/2 \quad (2.6)$$



“ლოდინი შეუძლებელია მხოლოდ მაშინ, როდესაც არაფერს არ აკეთებ.”
Alexandre Dumas (მამა)

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1887 - 1961



სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 15

თემა:

სემესტრი II

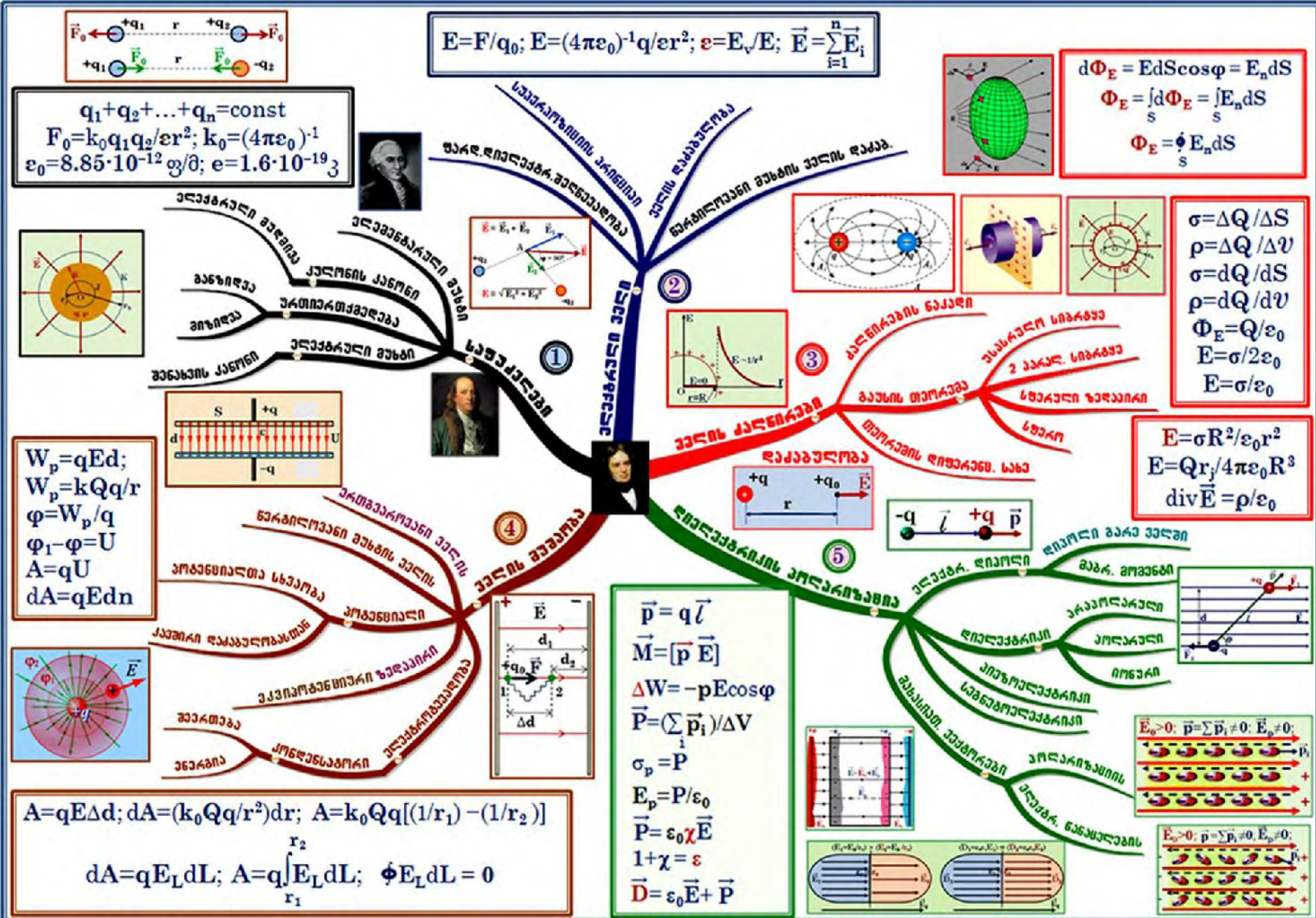
ელექტროსტატიკა

88·

099

1. ელექტროსტატიკის Mind Map

ელექტროსტატიკის Mind Map



Appendix I. ინფორმაცია (ცხრილები), რომელიც გამოგადგებათ

გამოყენებული ბერძნული სიმბოლოები

α ალფა	η ეტა	ν ნიუ
β ბეტა	θ თეტა	π პი
γ გამა	κ კაპა	ρ რო
Δ დელტა	λ ლამბდა	τ ტაუ
ε ეპსილონი	μ მიუ	φ ფი

ფიზიკურ სიდიდეთა ძირითადი ერთეულები

ს ი დ ი დ ე	განზოქილება	ერთეული	აღნიშვნა
სიგრძე	L	მეტრი	მ
დრო	T	წამი	წმ
მასა	M	კილოგრამი	კგ
ტემპერატურა	Q	კელვინი	K
ნივთიერებ. რაოდ.	N	მოლი	მოლი
დენის ძალა	I	ამპერი	ა
სინათლის ძალა	J	კანდელა	კდ

ძირითადი ფიზიკური მუდმივები

მუდმივა	აღნიშ.	სიდიდე
ბორის რადიუსი	a	$5.292 \cdot 10^{-11}$ მ
სინათლის სიჩქარე	c	$2.998 \cdot 10^8$ მ / წმ
ელემენტარული მუხტი	e	$1.602 \cdot 10^{-19}$ კ
ელექტრული მუდმივა	ϵ_0	$8.854 \cdot 10^{-12}$ ფ / მ
გრავიტაციული მუდმივა	G	$6.672 \cdot 10^{-11}$ ნ მ ² / კგ ²
თავის.ვარდნის აჩქარება	g	9.807 მ/წმ ²
პლანკის მუდმივა	h	$6.626 \cdot 10^{-34}$ ჯ წმ
“_”	ħ	$1.055 \cdot 10^{-34}$ ჯ წმ
ბოლცმანის მუდმივა	k	$1.381 \cdot 10^{-23}$ ჯ / K
კულონის მუდმივა	k_0	$8.988 \cdot 10^9$ ნ მ ² / კ ²
მასის ატომური ერთეული	მ.ა.ე.	$1.661 \cdot 10^{-27}$ კგ
ელექტრონის მასა	m_e	$9.110 \cdot 10^{-31}$ კგ
ნეიტრონის მასა	m_n	$1.675 \cdot 10^{-27}$ კგ
პროტონის მასა	m_p	$1.673 \cdot 10^{-27}$ კგ
მაგნიტური მუდმივა	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ ჰე / მ
ავოგადროს რიცხვი	N_A	$6.022 \cdot 10^{23}$ მოლი ⁻¹
ნორმალური ატმოსფ. წნევა	P_0	$1.013 \cdot 10^5$ პა
აირის უნივერს. მუდმივა	R	8.314 ჯ / (K მოლი)
აბსოლუტური ნული	T_K	-273.16 °C

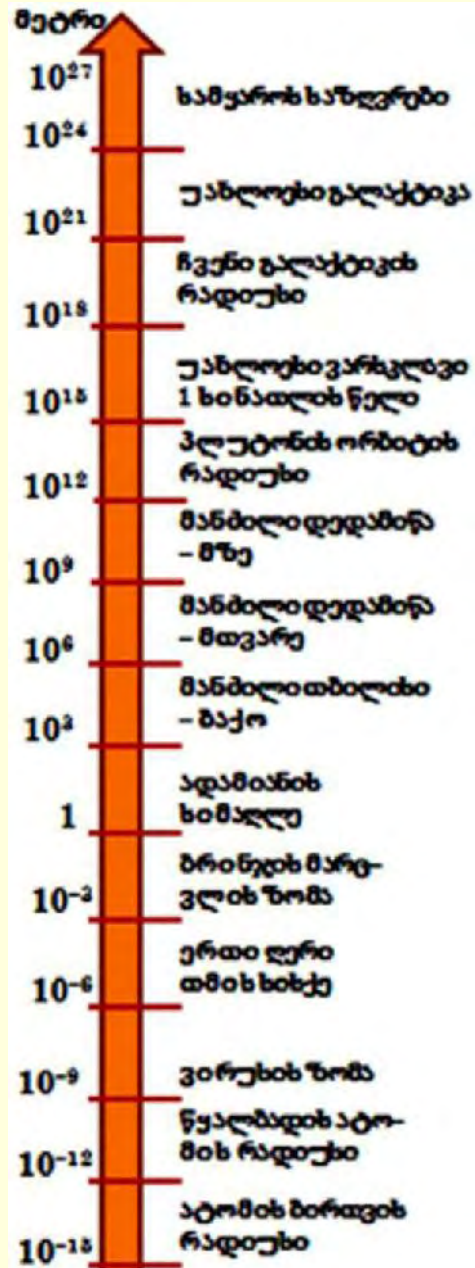
ერთეულთა თავსაკრები

მეცნიერული თავსაკრები	თავსაკრები	აღნიშვნა
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

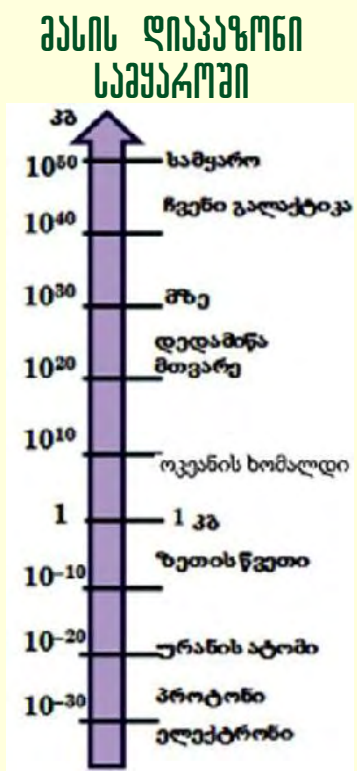
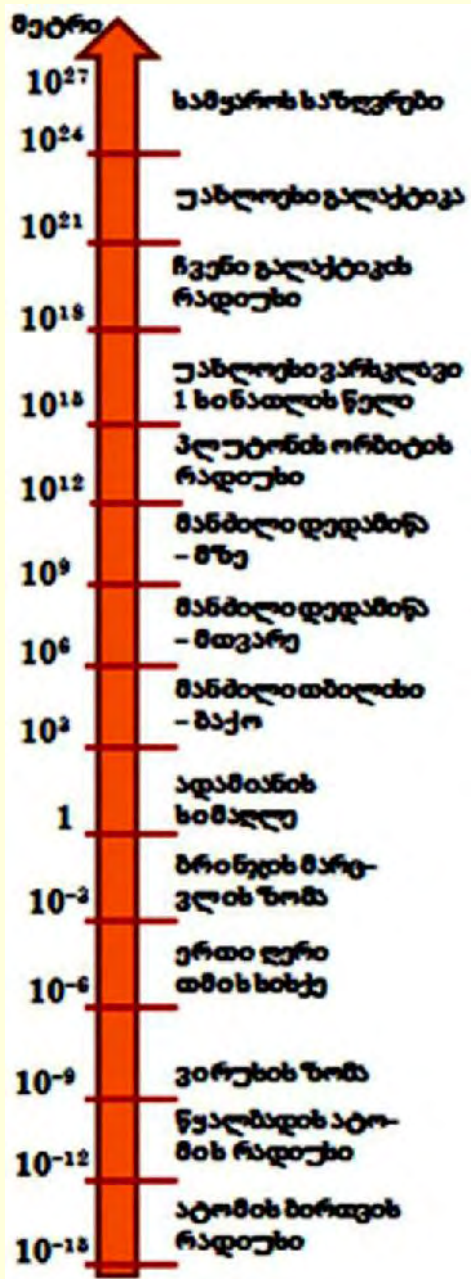
ფიზიკურ სიდიდეთა ნაკრები ერთეულები

სიდიდე	აღნიშ.	ერთეული	აღნიშ.	სხვა ერთეულები
ფართობი	S	კვადრატული მეტრი	მ ²	სმ ² = 10 ⁻⁴ მ ²
მოცულობა	V	კუბური მეტრი	მ ³	ლ = 10 ⁻³ მ ³
ბრტყელი კუთხე	φ	რადიანი	რად	გრად = 0.0175 რად
სივრცითი კუთხე	g	სტერადიანი	სტერ	
გადაადგილება, გზა	S, L	მეტრი	მ	კმ = 10 ³ მ
სიჩქარე	V	მეტრი წამთან	მ წმ ⁻¹	კმ სთ ⁻¹ = 0.278 მ წმ ⁻¹
აჩქარება	a	მეტრი წამ კვადრატთან	მ წმ ⁻²	
კუთხური სიჩქარე	ω	რადიანი წამთან	რად წმ ⁻¹	
სიხშირე	ν	ჰერცი	ჰც	წმ ⁻¹ ≡ ჰც
სიმკვრივე	r	კილოგრამი კუბურ მეტრთან	კგ მ ⁻³	გ სმ ⁻³ = 10 ³ კგ მ ⁻³
ძალა	F	ნიუტონი	ნ	კგ.მ = 9.8 ნ
იმპულსი	P	კილოგრამ-მეტრი წამთან	კგ მ წმ ⁻¹	
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 ⁻¹⁹ 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 ნაკრძეული ერთეულოები (გაგრიქლეა)				
სიდიდე	აღნიშ.	ერთეული	აღნიშ.	სხვა ერთეულოები
კუთრი სიტბოტევაღობა	c	ჯოული კილოგრამ-კელვინზე	$\text{ჯ კგ}^{-1} \text{K}^{-1}$	
მოლოური მასა	M	კილოგრამი მოლოთან	კგ მოლი ⁻¹	
კონცენტრაცია	n	1 კუბურ მეტრთან	მ^{-3}	$\text{სმ}^{-3} = 10^6 \text{მ}^{-3}$
ელექტრული მუხტი	q	კულონი	კ	
დენის სიმკვრივე	J	ამპერი კვადრატულ-მეტრთან	ა მ^{-2}	
ძაბვა, ემძ	U, E	ვოლტი	ვ	
ელ. ველის დამაბულობა	E	ვოლტი მეტრთან	ვ მ^{-1}	
წინააღმდეგობა	R	ომი	ომი	
კუთრი წინააღმდეგობა	ρ	ომი მეტრი	ომი მ	ომი მ ² მ ⁻¹ = 10 ⁻⁶ ომი მ
ელექტრო ტევაღობა	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 II. 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