

იმეფაღინე, იმჩაველე ღა მათარე !

ლევან გლუჩიძე, აკაკი გიგინეიშვილი

ფ ი ზ ი კ ა

სტუ-ს ოთხ სპეცირიანი ჟურნალ ლექციების კონსპექტი

ნაწილი III



თბილისი 2015



•ფიზიკის ფართო (ოთხ სემესტრიანი) კურსი გათვლილია ტექნიკური უნივერსიტეტის ფიზიკური სპეციალობების სტუდენტებისთვის.

•ის მიზნად ისახავს: სტუდენტი არა მარტო გავარკვიოთ, შევასწავლოთ და შევაყვაროთ 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. მუდმივი ელექტრული დენი	006
1.ელექტრული დენი. დენის ძალა და სიმკვრივე	007
2.ომის კანონი წრედის ერთგვაროვანი უბნისთვის	009
3.გამტარის წინაღობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე	010
4.დენის წყაროები. ელექტრომამოძრავებელი ძალა და ძაბვა	011
ლექცია 2. მუდმივი დენის წრედები	013
1.დენის მუშაობა და სიმძლავრე. ჯოულ-ლენცის კანონი	014
2.ომის კანონი ჩაკეტილი წრედისთვის	015
3.ომის კანონი წრედის არაერთგვაროვანი უბნისთვის	017
4.კირხჰოფის კანონები	018
ლექცია 3. მყარი სხეულის ენერგეტიკული ზონური სტრუქტურის ელემენტები	019
1.საყრდენი ცნებები ატომის ფიზიკიდან	020
2.მყარი სხეულის ენერგეტიკული ზონების ფორმირება და შევსება	022
3.ლითონები, ნახევრად გამტარები, დიელექტრიკები	025
ლექცია 4. ელექტროგამტარობა	026
1.ლითონთა ელექტროგამტარობის კლასიკური ელექტრონული თეორია	027
2.ნახევრად გამტარის საკუთრივი და მინარევული გამტარობა	029
3.ელექტროლიტური დისოციაცია. ელექტროლიზი	031
ლექცია 5. ელექტრული დენი სითხესა და აირში	033
1.ელექტროლიზის კანონები	034
2.დენი აირსა და ვაკუუმში	035
3.პლაზმა	039

ლექცია 6. მაგნიტური ველის მახასიათებლები	040
1. მაგნიტური ველი. მაგნიტური ველის ინდუქცია	041
2. მაგნიტური ინდუქციის წირები და ნაკადი	043
3. ბიო-სავარ-ლაპლასის კანონი	045
4. მაგნიტური ველის მოქმედება დენიან გამტარზე (ამპერის ძალა)	046
5. პარალელური დენების ურთიერთქმედება	047
 ლექცია 7. მაგნიტური ველის მოქმედება ნივთიერებასა და მუხტებზე	 048
1. მაგნიტური ველის მახასიათებელი სიდიდეები და გარემო	049
2. ლორენცის ძალა	052
3. ჰოლის ეფექტი	054
 ლექცია 8. ელექტრომაგნიტური ინდუქცია	 055
1. ელექტრომაგნიტური ინდუქცია. ლენცის წესი	056
2. ინდუქციის ე.მ.ძალა. ფარადეის კანონი	058
3. ელექტრომაგნიტური ველი	060
 ლექცია 9. ინდუქციური მოვლენები	 062
1. ელექტრომაგნიტური მოვლენები - ურთიერთინდუქცია	063
2. ტრანსფორმატორი	065
3. თვითინდუქცია და მაგნიტური ველის ენერგია	067
 ლექცია 10. მაგნეტიზმის ბუნება	 070
1. მაგნეტიკები	071
2. დამაგნიტების ფიზიკური საფუძვლები	072
3. დამაგნიტების ვექტორი და მაგნიტური ამთვისებლობა	073

ლექცია 11. მაგნიტური ნივთიერებები	074
1. დიამაგნეტიკი და პარამაგნეტიკი	075
2. ფერომაგნეტიკი	077
ლექცია 12. ცვლადი დენის მახასიათებლები	080
1. ცვლადი დენის ფიზიკური საფუძვლები	081
2. სიმძლავრე. ემ ძალის და დენის ეფექტური მნიშვნელობა	084
ლექცია 13. ცვლადი დენის წრედები	086
1. აქტიური და რეაქტიული წინააღობის წრედები	087
2. ცვლადი დენის სრული წრედი	091
3. რეზონანსი {ცვლადი ძაბვის წრედებში}	092
ლექცია 14. ელექტრომაგნიტური ტალღები	093
1. რხევითი კონტური	094
2. ელექტრომაგნიტური ტალღა	097
ლექცია 15. ელექტრომაგნიტური ტალღები	100
1. ელექტრომაგნიტური ტალღის მახასიათებლები	101
2. ელექტრომაგნიტური ტალღების სკალა	102
3. წანაცვლების დენი. მაქსველის განტოლებები	103
Supplement	105
ელექტროობის & მაგნეტიზმის Mind Map	106
Appendix I	
1. ინფორმაცია (ცხრილები), რომელიც გამოგადგებათ	107
Appendix II	
1. გამოყენებული ლიტერატურა	111
	111



“სახელი ისაა, როდესაც უფრო მეტი ადამიანი გიცნობს, ვიდრე შენ იცნობ.”
Tom Stoppard



რამდენი უნდა იცოდეს, რომ იცოდეს რამე ?!

1937

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 1

თემა:

სემესტრი III

მუდმივი ელექტრული დენი

ზვ.

007

1. ელექტრული დენი. დენის ძალა და სიმკვრივე

009

2. ომის კანონი წრედის ერთგვაროვანი უბნისთვის

010

3. გამტარის წინააღობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

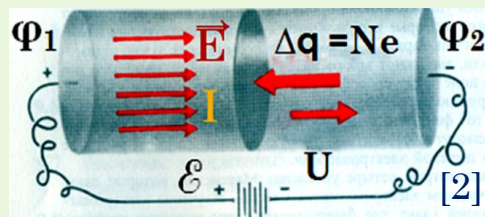
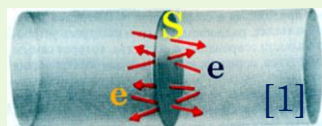
011

4. დენის წყაროები. ელექტრომამოძრავებელი ძალა და ძაბვა

1. ელექტრული დენი. დენის ძალა და სიმკვრივე

- ელექტროსტატიკის ფარგლებში განიხილებოდა უძრავი მუხტების თვისებები და ურთიერთქმედება;
- ელექტროდინამიკა განზოგადოებულად სწავლობს ელექტრომაგნიტურ ველს, {აქცენტით დროზე დამოკიდებულ - ცვლად ველზე} და მის ურთიერთქმედებას მუხტებთან, მათ შორის მიმართულად მოძრავ მუხტებთან;

✓ ცნება - “ელექტრული დენი” უკავშირდება მყარ სხეულში, სითხეში, აირში, ვაკუუმში {გარკვეულ პირობებში} ელექტრული მუხტების მიმართული ნაკადის არსებობას;



- {ქაოსური მოძრაობის [1] ვეებერთელა სიჩქარის $\bar{V} \approx 10^6$ მ/წმ ფონზე} გამოყოფილი მიმართულებით ჭარბი Δq [2] მუხტის გადასატანად აუცილებელია არსებობდეს:

1. მიმართულად მოძრაობის უნარის მქონე (“თავისუფალი”) დამუხტული ნაწილაკები:

- თავისუფალი ელექტრონები (e) მყარ სხეულებში;
- იონები და ელექტრონები აირსა და ელექტროლიტებში;
- ელექტრონები და ხვრელები ნახევრად გამტარებში;
- {გარკვეულ პირობებში} ელექტრონები ვაკუუმში;

2. ელექტრული ველი - რომელიც მოქმედებს მუხტებზე ძალით და უზრუნველყოფს მათ მიმართულ მოძრაობას;

- ელექტრულ ველს გამტარში აღძრავს და ინარჩუნებს გამტარის ბოლოებზე არსებული $U = \phi_1 - \phi_2$ პოტენციალთა სხვაობა (ძაბვა) [2];

$$U \Rightarrow E \Rightarrow F_q \Rightarrow V_d$$

$$q \xrightarrow{\vec{V}_d} \vec{F}_q$$

- ისტორიულად და პირობითად დენის მიმართულებად მიჩნეულია დადებითი მუხტის და არა e-ის მოძრაობის მიმართულება;

▪ დენის არსებობა ვლინდება **სამი** მოქმედებით:

1. დენიანი გამტარის ირგვლივ იქმნება **მაგნიტური ველი** (*ყოველთვის* !);

2. დენიანი გამტარი **თბება** {არ თბება ზე-გამტარი};

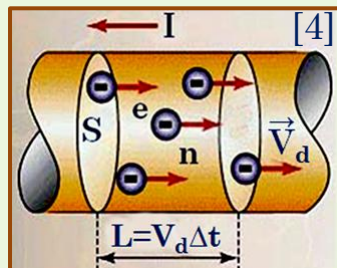
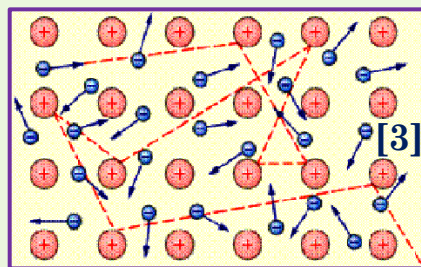
3. დენის გავლას შეიძლება თან ახლდეს **ქიმიური პროცესები**;



▪ გამტარში ელექტრული ველის არსებობისას ($E \neq 0$), კულონური ძალის $\vec{F} = e\vec{E}$ გავლენით, თავისუფალი ელექტრონი ქაოსური [3] მოძრაობის $V \sim 10^6$ მ/წმ ფონზე იძენს **მიმართული მოძრაობის (დრეიფულ)** $\vec{V}_d \approx 10^{-6} - 10^{-4}$ მ/წმ სიჩქარეს;

▪ დავაკავშიროთ **I** დენის ძალა V_d დრეიფულ სიჩქარესთან და თავისუფალი ელექტრონების $n = N/V$ კონცენტრაციასთან [4]:

$$\begin{aligned} I &= \Delta q / \Delta t = Ne / \Delta t = n \nu e / \Delta t = \\ &= n L S e / \Delta t = n V_d \Delta t S e / \Delta t = \\ &= en V_d S \quad (1.3) \end{aligned}$$



▪ დენის ძირითადი რაოდენობრივი მახასიათებელია **I** დენის ძალა. ის ტოლია გამტარის განივკვეთში Δt დროში გასული Δq მუხტის ფარდობისა ამ დროსთან;

• მუდმივი დენისას {უცვლელი სიდიდის და მიმართულების დენი} **I** = $\Delta q / \Delta t$ (1.1)

• ცვლადი დენისას **i** = dq / dt (1.2)

• დენის ძალის ერთეული $[I] = 1$ ამპერი - ელექტროდინამიკის ერთადერთი ძირითადი ერთეულია SI სისტემაში;

• 1 ა დენისას გამტარში 1 წმ-ში 1 კ მუხტი გადის {1ა-ის ზუსტი განმარტება ეფუძნება დენიანი გამტარების მაგნიტურ ურთიერთქმედებას};



▪ **I** დენის ძალასთან ერთად დენს ახასიათებენ **j** დენის სიმკვრივით (განივკვეთის ფართობის ერთეულზე მოსული დენის ძალით):

$$\{j = \Delta I / \Delta S_n \text{ და } j = dI / dS_n\} \quad (1.4)$$

S_n - დენისადმი გამტარის მართობული განივკვეთის ფართობი;

• (1.4) ➔ **j**-ის ერთეულია $[j]_{SI} = [I] / [S] = 1 \text{ ა} / \text{მ}^2$

▪ დენის სიმკვრივე ვექტორული სიდიდეა, მისი მიმართულება დადებითი მუხტების დრეიფული სიჩქარის ვექტორის მიმართულებას ემთხვევა (1.3) $\Rightarrow$ (1.4)

$$\vec{j} = -en \vec{V}_d \quad (1.5)$$

2.ომის კანონი წრედის ერთგვაროვანი უბნისთვის

▪ გამტარში I დენს განაპირობებს ელექტრული ველი, მას კი - გამტარის ბოლოებზე არსებული U ძაბვა. ამ სიდიდეებს შორის კავშირი ($I \sim U$) დაადგინა ოჰმა;

✓ ელექტრული წრედის უბანში გამავალი დენის I დენის ძალა პირდაპირპროპორციულია ამ უბანზე მოდებული U ძაბვისა და უკუპროპორციულია ამ უბნის [1] R წინაღობისა (ომის კანონი):

$$I = U/R \quad (2.1) \quad \text{ანუ} \quad U = IR \quad (2.2)$$

▪ $[U]_{SI} = 1\text{ვ} \quad (2.2) \Rightarrow [R]_{SI} = [U]/[I] = 1\text{ვ}/\text{ა} = 1 \text{ ომი}$.
1 ომი წინაღობა აქვს გამტარს, რომლის ბოლოებზე 1 ვ ძაბვისას მასში გადის 1 ა დენი;

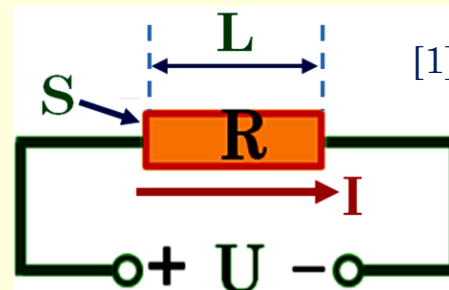
▪ გამტარის წინაღობა დამოკიდებულია გამტარის L სიგრძეზე, S განივკვეთის ფართობზე [1] და მისი ნივთიერების ელექტრულ მახასიათებელზე - ρ კუთრ წინაღობაზე:

$$R = \rho L/S \quad (2.3) \quad \Rightarrow \quad [\rho] = 1 \text{ ომი} \cdot \text{მ}$$

• ნივთიერების კუთრი წინაღობის შებრუნებული სიდიდეა σ - კუთრი გამტარობა:

$$\sigma = 1/\rho \quad (2.4); \quad [\sigma] = 1/[\rho] = (\text{ომი} \cdot \text{მ})^{-1} = 1 \text{ სიმენსი};$$

▪ გამტარში ნაწილაკების დაჯახებები განუწყვეტლივ ცვლიან თავისუფალი ელექტრონების მოძრაობის მახასიათებლებს (e -ის გაბნევა). **გაბნევის** შედეგად გამტარი ხელს უშლის - “ქინძა-აღმდეგება” - მასში დენის არსებობას;
▪ კონკრეტული გამტარის ამ თვისების რაოდენობრივი მახასიათებელია R წინაღობა;



G. Ohm
1787-1854

▪ ჩავწეროთ ომის კანონი ვექტორული სახით - j დენის სიმკვრივისა და E ელექტრული ველის დამაბულობით:

$$\{(1.4), (2.3)\} \quad \Rightarrow \quad jS = I = U/R = US/\rho L \quad \Rightarrow$$

$$j = U/\rho L = EL/\rho L \quad \Rightarrow \quad j = E/\rho = \sigma E \quad (2.5)$$

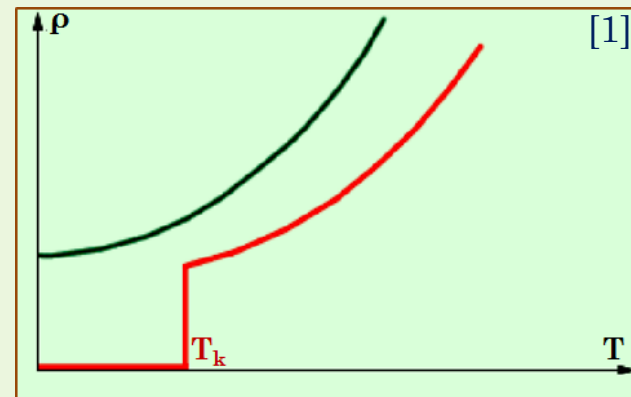
და
$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2.6)$$

ომის კანონის დიფერენციალური სახე;

3. გამტარის წინაღობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

✓ ყველა ელექტროგამტარ სხეულში ვლინდება მისი R წინაღობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება;

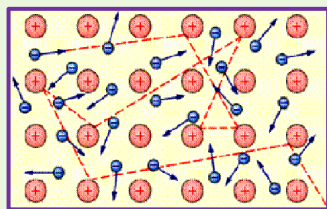
▪ {(2.3) $R = \rho L/S$ } გამომდინარე, ეს მოვლენა, ძირითადად, გამტარის **ნივთიერების** ელექტრული ρ , σ მახასიათებლების ტემპერატურულ დამოკიდებულებას უკავშირდება (ზომების ცვლილების გავლენა, განსაკუთრებით მყარ ფაზაში, უმნიშვნელოა);



▪ R , ρ , σ პარამეტრებზე ტემპერატურის გავლენის კონკრეტულ სახეს **ორი განსხვავებული მექანიზმი** $\{\sigma \sim nV_d\}$ განსაზღვრავს:

1. მუხტების n კონცენტრაციის **ცვლილება** $\{n$ -ის ზრდა *ამცირებს* R -ს};

2. მუხტების V_d დრეიფული სიჩქარის, ანუ გაბნევის ინტენსივობის {მოძრაობის ქაოსურობის} **ცვლილება** {ქაოსურობის ზრდა *ამცირებს* V_d -ს და *ზრდის* R -ს};



• **ლითონებში** $n \approx \text{const}$, გაბნევის ინტენსივობა კი იზრდება ტემპერატურის მატებისას და **იზრდება** წინაღობა [1];

• **ნახევრად გამტარებში**, უმეტეს შემთხვევაში, ძლიერადაა გამოხატული n კონცენტრაციის ზრდის წვლილი და წინაღობა **მცირდება** T -ს ზრდისას;

▪ კელვინის სკალით $R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - T_1)]$ (2.1) $\rho_2 = \rho_1[1 + \alpha(T_2 - T_1)]$ (2.2);

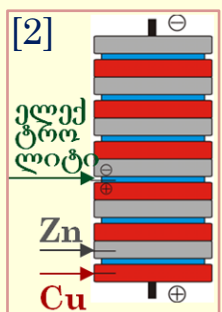
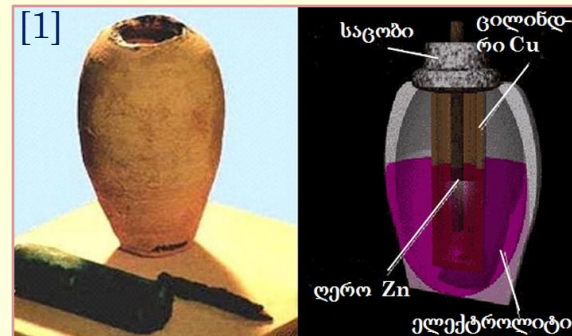
▪ ცელსიუსის სკალით და $t_0 = 0^\circ\text{C}$: $R = R_0(1 + \alpha t)$ (2.3) $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$ (2.4);

▪ α -წინაღობის ტემპერატურული კოეფიციენტი, $[\alpha] = \text{K}^{-1}$;

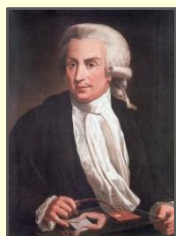
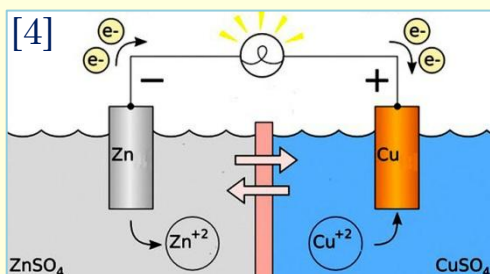
▪ გარკვეულ T_k ტემპერატურაზე ზოგიერთი გამტარი ნივთიერების წინაღობა $\{\rho, R\}$ **ნახტომისებურად ნულამდე** ეცემა [1]. ამ მოვლენას **ზეგამტარობა** ეწოდა;

4. დენის წყაროები. ელექტრომამოძრავებელი ძალა და ძაბვა

- 1800 წლამდე მხოლოდ ხახუნით ხერხდებოდა მუხტის დაგროვება, რაც ფაქტიურად გამორიცხავდა ელექტრობის პრაქტიკულ გამოყენებას;
- თუმცა, არ არის სრულად უარყოფილი ჰიპოთეზა შუმერების ცივილიზაციის აღმავლობის პერიოდის {XXVIII-XXIV ს.ჩ.წ.} შესაბამისი “დენის წყაროს” [1] არსებობის შესახებ;



- ✓ პირველი, რეალურად მოქმედი დენის წყარო [2,3] XVIII ს-ის ბოლოს, იტალიაში შექმნა ა.ვოლტამ {ლ.გალვანის კვლევების კვალზე};
- უფრო სრულყოფილია დანიელის და იაკობის გალვანური ელემენტი [4];



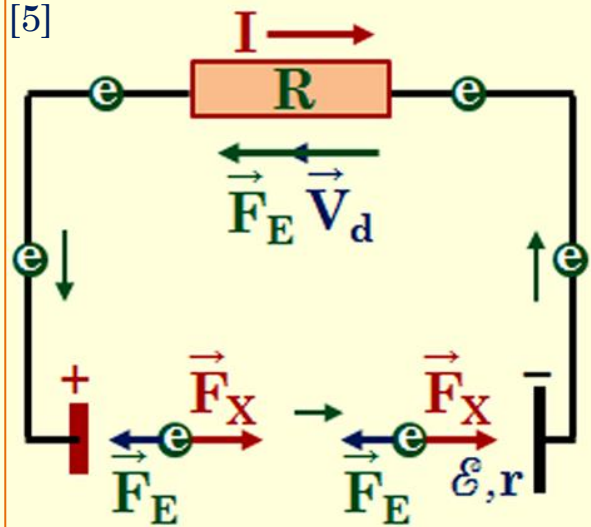
L. Galvani
1737-1798



A. Volta
1745-1827

- წრედში დენს **ელექტრული ველი** განაპირობებს. თუ წრედის ყველა უბანზე მხოლოდ ელექტრული ძალა მოქმედებს, მუხტები მთელ წრედში ერთი მიმართულებით გადაადგილდებიან;
- ელექტრონები მოძრაობენ დადებითი პოტენციალის მქონე წრედის უბნის ბოლოსკენ, ხოლო უარყოფითი პოტენციალის მქონე ბოლოზე ელექტრონების **რიცხვის** აღდგენა **არ ხდება**.
- შედეგად, დენის გავლას აუცილებლად თან სდევს ამ დენის განმსაზღვრელი პოტენციალთა სხვაობის შემცირება, ე.ი. დენი სწრაფად **მიილევა**;
- დენის წყაროში “-ფ” ელექტროდზე ელექტრონების რიცხვის აღდგენა მხოლოდ სხვა **ბუნების** და F_E ელექტრულის საპირისპირო ძალის - F_X **გარე ძალის** მოქმედებითაა შესაძლებელი [5];

[5]



▪ გარე ძალები [5] მოქმედებენ ნებისმიერი ტიპის და r შიგა წინაღობის დენის წყაროში, რომელიც გარკვეული სახის ენერგიას (ქიმიურს, მექანიკურს, სითბურს და ა.შ.) **ელექტრულ ენერგიად** გარდაქმნის;

▪ გარე წრედში {დენის წყაროს მიღმა} ერთეულოვანი მუხტის გადატანაზე **ელექტრული** ძალის მუშაობას განსაზღვრავს U ძაბვა: $U = A_E/q$ (4.1)

• ამ ძაბვის სიდიდეს გვიჩვენებს **შეკრულ** წრედში [6] დენის წყაროს კლემებთან მიერთებული ვოლტმეტრი {პოტენციალთა სხვაობის გასაზომი ხელსაწყო};

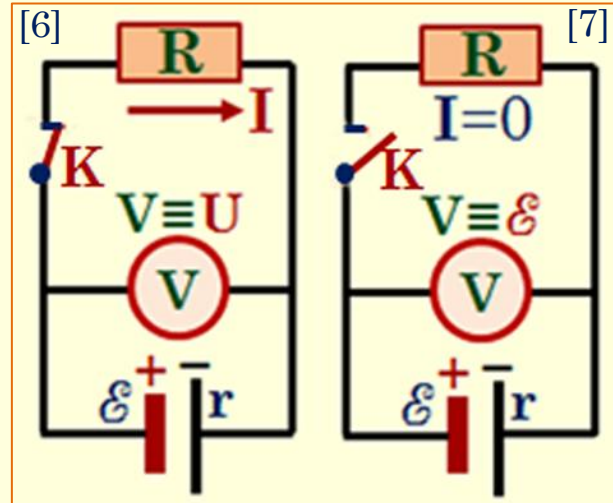
▪ **გათიშულ წრედში** [7] დენის წყაროს კლემებზე პოტენციალთა სხვაობა უტოლდება სკალარულ ფიზიკურ სიდიდეს - $\mathcal{E}$ **ელექტრომამოძრავებელ ძალას**;

▪ **ემ ძალა** განსაზღვრავს ერთეულოვანი მუხტის გადატანაზე **გარე ძალების** მიერ შესრულებულ მუშაობას $\mathcal{E} = A_X/q$ (4.2):

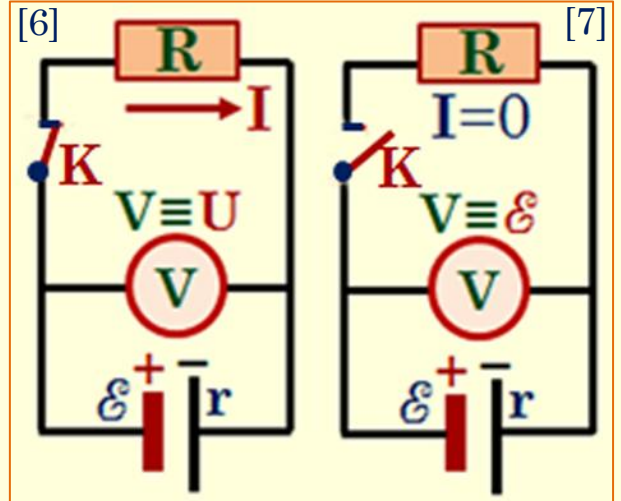
• დენის წყაროს პოლუსებს შორის გათიშულ წრედში;

• სრულად კონტურში შეკრული წრედისას;

[6]



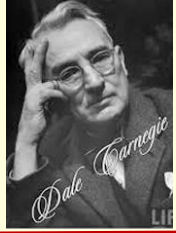
[7]



▪ ისტორიული სახელწოდების {ელექტრომამოძრავებელი ძალა} მიუხედავად, $\mathcal{E}$ უშუალო კავშირშია **მუშაობის** (და **არა ძალის**) ცნებასთან და მისი ერთეულიც არის $[\mathcal{E}] = [U] = [A]/[q] = 1 \text{ ჯ/კ} = 1 \text{ ვოლტი}$;



“თუ ადამიანი ცდილობს საკუთარი მიზნებისთვის გამოგიყენოთ,
ამოშალეთ ის ნაცნობების სიიდან.” Dale Carnegie



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1888 - 1955

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 2

თემა:

სემესტრი III

მუდმივი დენის წრედები

ზვ.

014

1.დენის მუშაობა და სიმძლავრე. ჯოულ-ლენცის კანონი

015

2.ომის კანონი ჩაკეტილი წრედისთვის

017

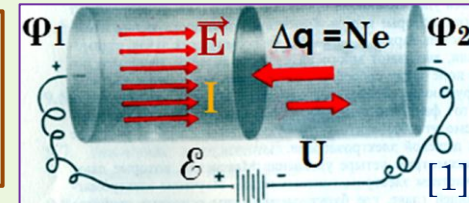
3.ომის კანონი წრედის არაერთგვაროვანი უბნისთვის

018

4.კირხჰოფის კანონები

1.დენის მუშაობა და სიმძლავრე. ჯოულ-ლენცის კანონი

✓ გამტარის ბოლოებზე U ძაბვით აღძრული ელექტრული ველი მიმართულად [1] ამოძრავებს q მუხტებს (ქმნის I დენს), ანუ ასრულებს A მუშაობას (**დენის მუშაობა**) $A = qU$ (1.1) $\{A = FL = qEL = qUL/L = qU\}$;



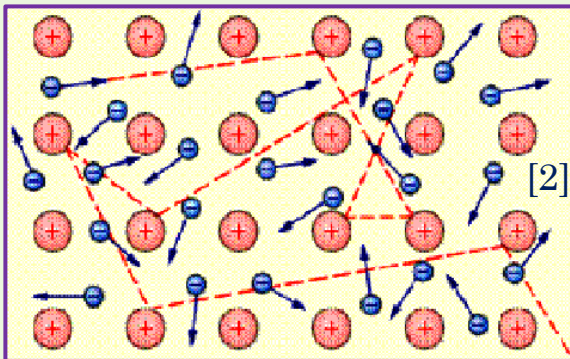
- (1.1)-ში დენის ძალის ($I = q/t$) და ომის კანონის ($U = IR$) გამოყენებით $\Rightarrow A = IUt = I^2Rt = U^2t/R$ (1.2)
- (1.2) $\Rightarrow$ დენის სიმძლავრე $P = A/t = IU = I^2R = U^2/R$ (1.3)



J. Joule
1818-1889



H. Lenz
1804-1865



- წრედის შეკვრისას დენის მუშაობა ხმარდება ელექტრონების **კინეტიკური ენერგიის** ზრდას;
 - მცირე დროში მყარდება სითბური წონასწორობა - მოძრავი მუხტები ეჯახებიან გამტარის შემადგენელ იონებს [2] და **გადასცემენ** მათ თავისი ენერგიის ნაწილს. გამტარი თბება და გამოყოფს დენის მუშაობის ტოლ სითბოს:
- $Q = I^2Rt$ (1.4) ჯოულ-ლენცის {ცდისეული} კანონი;

▪ გამტარის მოცულობის ერთეულსა და დროის ერთეულში გამოყოფილ სითბოს {რაოდენობას} უწოდეს **კუთრი სითბური სიმძლავრე**

$$p_0 = dQ/d\mathcal{V}dt \quad (1.5)$$

$$(1.4) \Rightarrow dQ = I^2Rdt = (jdS)^2 dt \rho dL/dS = \rho j^2 dL dS dt = \rho j^2 d\mathcal{V}dt \quad (1.6)$$

$$(1.6) \Rightarrow (1.5) \Rightarrow$$

$$p_0 = \rho j^2 = (\sigma)^{-1} j^2 \quad (1.7)$$

$$\{(1.2.6) \ j = \sigma E\} \Rightarrow (1.7) \Rightarrow$$

$$p_0 = \sigma E^2 \quad (1.8)$$

(1.8) წარმოადგენს ჯოულ-ლენცის კანონის **დიფერენციალურ სახეს**;

2. ომის კანონი ჩაკეტილი წრედისთვის

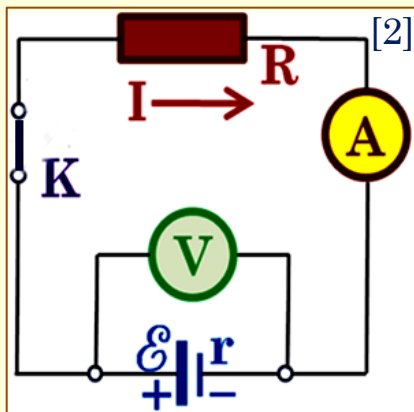
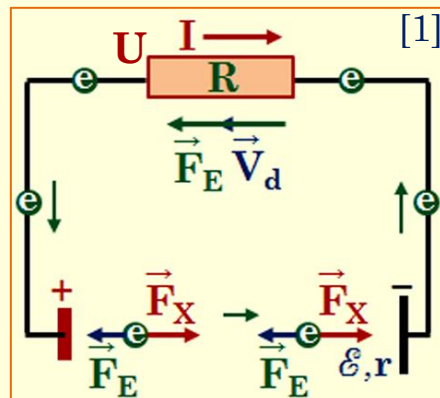
▪ $U \Rightarrow E \Rightarrow I$ -ს პროცესების {აღბერის} ჯაჭვის წყალობით გარე წრედში ჩნდება და ნარჩუნდება e -ის მოძრაობა წრედის $+q$ ბოლოსკენ [1];

▪ დენის წყაროში ელექტრონების $-q$ ელექტროდზე დაბრუნებას გარე, არაელექტრული ბუნების ძალა განაპირობებს. ამ ძალების მიერ დენის წყაროში შესრულებულ მუშაობას $\mathcal{E}$ ემ ძალა ასახავს

$$A_e = q\mathcal{E} \quad (2.1) \quad \{(1.1)\text{-ს ანალოგიურად}\}$$

▪ წრედის გარე უბანზე მუხტის გადატანაზე ელექტრული ძალის მუშაობა U ძაბვით გამოითვლება $A_u = qU$. ასეთივე სიდიდის, მაგრამ საპირისპირო ნიშნის მუშაობას ელექტრული ძალა დენის წყაროს შიგნითაც ასრულებს [1];

✓ ამრიგად, ელექტრული ძალის ჯამური მუშაობა (მთლიან წრედში [2]) ნულის ტოლია და შესრულებულ მუშაობას წრედის ორივე ნაწილში განსაზღვრავს $\mathcal{E}$ ემძ: $A = q\mathcal{E} = I\mathcal{E}dt \quad (2.2)$



▪ ენერგიის მუდმივობის $A = Q$ და ჯოულ-ლენცის (1.4) კანონების გათვალისწინებით (2.2) მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$I\mathcal{E}dt = I^2 R dt + I^2 r dt \Rightarrow \mathcal{E} = IR + Ir \quad (2.3) \Rightarrow I = \mathcal{E} / (R + r) \quad (2.4)$$

{ R წრედის გარე ნაწილის და r შიგა (დენის წყაროს) წინაღობებია.}

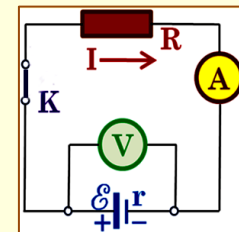
✓ (2.3), (2.4) ფორმულები ასახავენ ომის კანონს **ჩაკეტილი წრედისთვის**: დენის ძალა პირდაპირპროპორციულია წრედის ემ ძალისა და უკუპროპორციულია გარე და შიგა წინააღობათა ჯამისა;

▪ (2.3) $\Rightarrow$ ძაბვის ვარდნა $\{U = IR\}$ წრედის გარე უბანზე ემძ-სა და შიგა უბანზე ძაბვის ვარდნის სხვაობით განისაზღვრება:

$$U = \mathcal{E} - Ir \quad (2.5)$$

▪(2.4) მტკიცდება ენერგიის მუდმივობის კანონის საფუძველზეც, **გარე ძალების** მუშაობის $A_e = \mathcal{E}q = \mathcal{E}It$ და **დენის** მუშაობის $A = I^2Rt + I^2rt$ გატოლებით:

$$A = A_e \Rightarrow I^2Rt + I^2rt = \mathcal{E}It \Rightarrow I = \mathcal{E} / (R + r)$$



▪(2.3)-ის ანალოგიურად, წრედის სრული P სიმძლავრე გარე და შიგა უბნებზე გამოყოფილ სიმძლავრეთა ჯამის ტოლია და $\{(1.3), (2.3)\} \Rightarrow$

$$P = P_R + P_r = I^2R + I^2r = I\mathcal{E} = \mathcal{E}^2 / (R + r) \quad (2.6)$$

▪**სასარგებლოა** P_R გარე უბანზე გამოყოფილი სიმძლავრე. ამდენად, (2.6) $\Rightarrow$ **η წრედის მქც** ტოლია

$$\eta = P_R / P = R / (R + r) \quad (2.7)$$

•**დანაკარგების** შესამცირებლად ხელსაყრელია წრედში $R \gg r$ პირობის დაცვა. თუმცა, **მაქსიმალური სასარგებლო სიმძლავრე** მიიღწევა, როდესაც $R = r$. ამ დროს წრედის მქც $\eta = 50\%$;

3. ომის კანონი წრედის არაერთგვაროვანი უბნისთვის



✓ მარტივი “იგივეობა” ძაბვასა და პოტენციალთა სხვაობას შორის $U = \Phi_1 - \Phi_2 = IR$ კორექტულია, თუ წრედის უბანი **ერთგვაროვანია** [1]: ე.ი., ის არ შეიცავს დენის წყაროს და **E** დამაბულობის ველი მხოლოდ ელექტროსტატიკური ბუნებისაა;

✓ წრედის უბანზე დენის წყაროს არსებობის შემთხვევაში [2] ველი შეიცავს, როგორც **ელექტრულ**, ასევე **გარე** ძალის კომპონენტს, ანუ

$$\vec{E} = \vec{E}_E + \vec{E}_X \quad (3.1)$$

▪ ასეთ უბანზე ძაბვას U_{12} უწოდებენ ერთეულოვანი მუხტის გადატანაზე **ჯამური** (3.1) **E** ველით შესრულებულ მუშაობას:

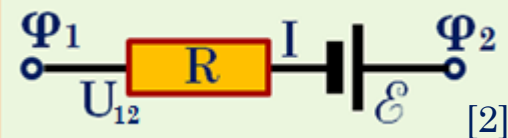
$$U_{12} = \int_1^2 \vec{E}_E d\vec{l} + \int_1^2 \vec{E}_X d\vec{l} \quad (3.2)$$

• ვინაიდან $\vec{E}_E d\vec{l} = -d\Phi$, (3.2)-ში პირველი ინტეგრალი $(\Phi_1 - \Phi_2)$ **პოტენციალთა სხვაობის** ტოლია, მეორე ინტეგრალი $\mathcal{E}$ **ემ ძალის**, ე.ი.

$$U_{12} = IR = (\Phi_1 - \Phi_2) + \mathcal{E} \quad (3.3)$$

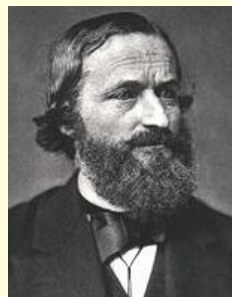
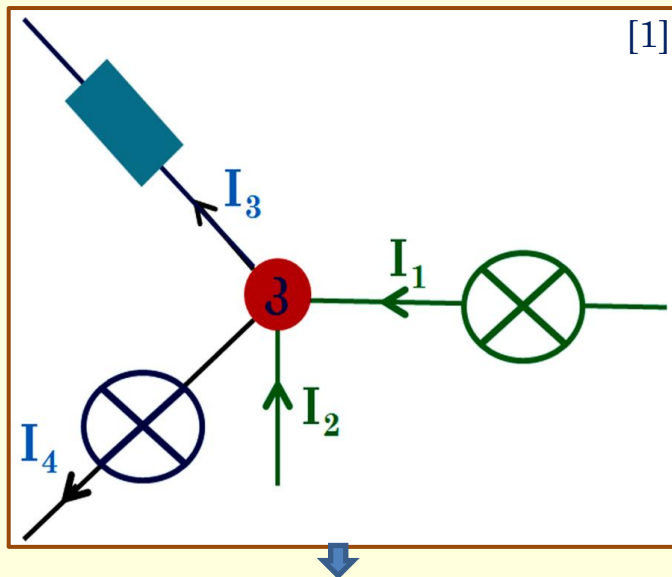
• (3.3) ფაქტიურად ომის კანონის **განზოგადოებული** სახეა და ის გადადის ომის კანონში წრედის ერთგვაროვანი უბნისთვის, როდესაც $\mathcal{E} = 0$;

• (3.3) მუდმივი დენის წრედის უბნისთვის **ენერგიის მუდმივობის კანონსაც** განასახიერებს;

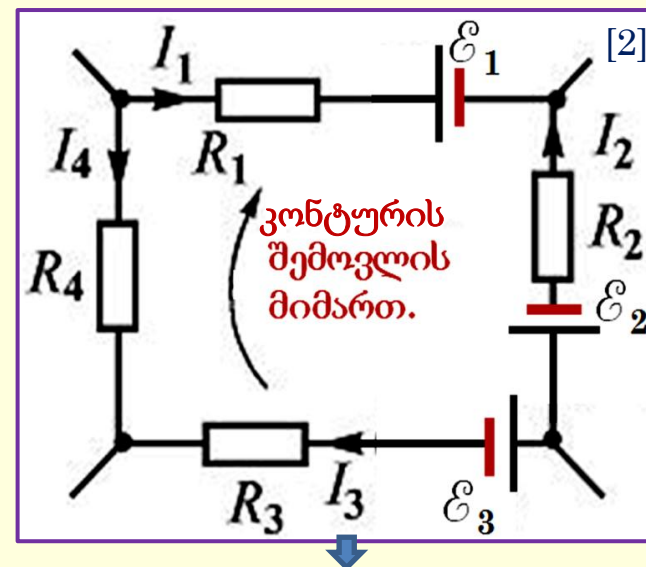


4.კირხჰოფის კანონები

✓ ნებისმიერ წრედში დენების და ძაბვების განაწილება ემორჩილება **კირხჰოფის 2** კანონს;



G.Kirchhoff
1824-1887



✓ **I კანონი:** კვანძში შესული დენების ჯამი ტოლია კვანძიდან გამოსული დენების ჯამისა [1]:

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 \quad \Rightarrow$$

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0 \quad \Rightarrow$$

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 \quad (4.1)$$

✓ **II კანონი:** ჩაკეტილი კონტურის ცალკეულ უბნებში ძაბვის ვარდნათა ალგებრული ჯამი ტოლია კონტურში მოქმედ ემძ-თა ალგებრული ჯამისა [2]:

$$\pm I_1 R_1 \pm I_2 R_2 \pm I_3 R_3 \pm I_4 R_4 = \pm \mathcal{E}_1 \pm \mathcal{E}_2 \pm \mathcal{E}_3$$

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i \quad (4.2) \quad \Rightarrow$$

▪ დენი ითვლება დადებითად, თუ მისი მიმართულება ემთხვევა კონტურის შემოვლის მიმართულებას;

▪ ემძ-ს ექნება ნიშანი "+", თუ დენის წყაროში დენის მიმართულება ემთხვევა კონტურის შემოვლის მიმართულებას;

• წარმოდგენილ მაგალითში [2]: $I_1 R_1 - I_2 R_2 + I_3 R_3 - I_4 R_4 = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3$



“ინტელექტი არის უნარი სხვადასხვა მხრიდან შეხედოთ საგნებს და ამავდროულად ჭკუიდან საბოლოოდ არ შეიშალოთ.” Douglas Adams



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1952 - 2001

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 3

თემა:

სემესტრი III

მყარი სხეულის ენერგეტიკული ზონური სტრუქტურის ელემენტები

ზვ.

020

1.საყრდენი ცნებები ატომის ფიზიკიდან

022

2.მყარი სხეულის ენერგეტიკული ზონების ფორმირება და შევსება

025

3.ლითონები, ნახევრად გამტარები, დიელექტრიკები

1. საყრდენი ცნებები ატომის ფიზიკიდან

▪ მყარი სხეულის ფიზიკური თვისებები მჭიდრო კავშირშია მისი შემადგენელი ატომების სავალენტო გარსების სტრუქტურასთან;

▪ ატომის ელექტრონული აგებულების გამარტივებული {პლანეტარული} მოდელის ფარგლებში ელექტრონები ბრუნავენ “მზის”- ბირთვის გარშემო ელიფსურ ორბიტებზე [1], რომლებიც ქმნიან გარკვეული გარსების { $n=1(K), 2(L), \dots$ } და ქვეგარსების { $0(s), 1(p), 2(d), \dots$ } ერთობლიობას;

▪ ერთელექტრონიან იონებში, ბირთვის z -მუხტისას n ორბიტის r_n რადიუსი [2]

$$r_n = n^2 r_1 / z \quad (1.1)$$

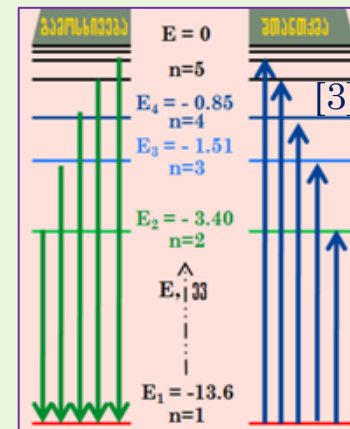
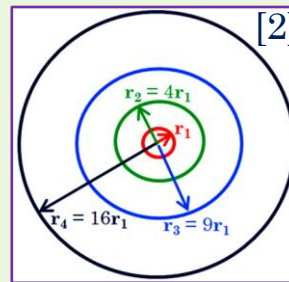
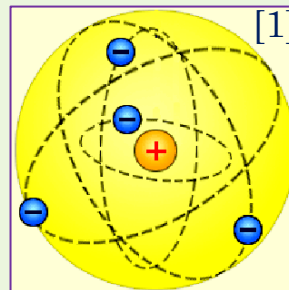
აქ $r_1 = \hbar^2 / m_0 e$ (1.2) - ბორის რადიუსია {ბორის წყალბადის მოდელის I რადიუსი};

▪ e -ს ენერგია n ორბიტაზე (დონეზე)

$$E_n = -ze^2 / 2r_n = -m_0 e^4 z^2 / 2\hbar^2 n^2 \quad (1.3)$$

▪ e -ს ერთი ენერგეტიკული დონიდან მეორეზე გადასვლისას [3] ადგილი აქვს ენერგიის კვანტის შთანთქმას ან გამოსხივებას

$$h\nu = E_f - E_i \quad (1.4)$$



▪ სე-დან {სტრუქტურული ელემენტები - ატომები, იონები} მყარი სხეულის ჩამოყალიბებისას, მეზობელი ელექტრონული გარსების **მიახლოება** - **გადაფარვის** შედეგად, ინვიდუალური ატომური მდგომარეობები ერთიანდებიან კრისტალისთვის დამახასიათებელ დონეთა ერთიან კოლექტიურ სისტემებში - **ენერგეტიკულ ზონებში**;

▪ ელექტრონული მდგომარეობების ზონებში გაერთიანება **არ ახდენს გავლენას** გარსების მიხედვით ელექტრონთა რაოდენობრივ განაწილებაზე;

✓ ელექტრონული მდგომარეობების სისტემატიკა ეფუძნება კვანტური რიცხვების {4 კვანტური რიცხვი} ერთობლიობას:

1. **n-მთავარი კვანტური რიცხვი** ($n=1,2,3,4,\dots$, შესაბამისი აღნიშვნა K, L, M, N,...) განსაზღვრავს ელექტრონის ორბიტის რადიუსსა და ენერგიას;

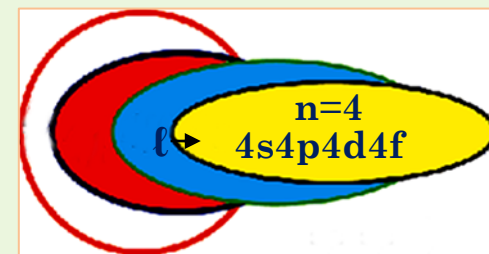
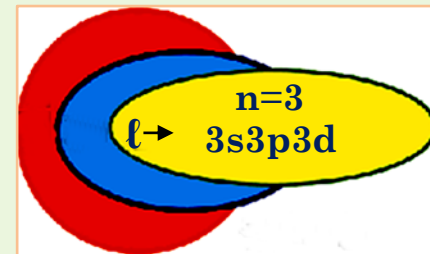
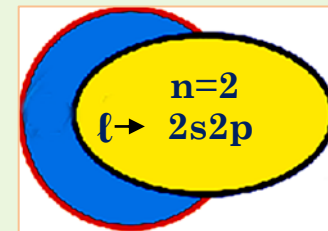
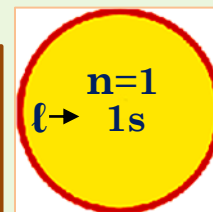
2. **ℓ-ორბიტალური კვანტური რიცხვი** ($\ell = 0,1,2,3,\dots,n-1$, შესაბამისი აღნიშვნა s, p, d, f,...) განსაზღვრავს ატომური ორბიტალის ფორმას;

3. **m-მაგნიტური კვანტური რიცხვი**

$$(m = \ell, \ell-1, \ell-2, \dots, 0, \dots, -(\ell-2), -(\ell-1), -\ell)$$

განსაზღვრავს ატომური ორბიტალის სივრცულ მდებარეობას;

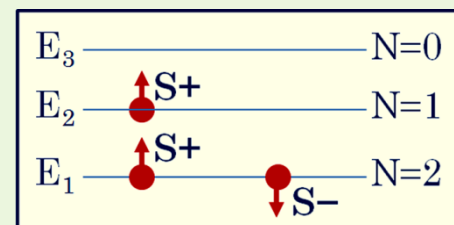
4. (S) **m_s -მაგნიტური სპინური რიცხვი** (ელექტრონებისთვის $m_s = +1/2, -1/2$). განსაზღვრავს ელექტრონის სპინის ($S = m_s \hbar$) მიმართულებას;



+ პაულის (აკრძალვის) პრინციპი:

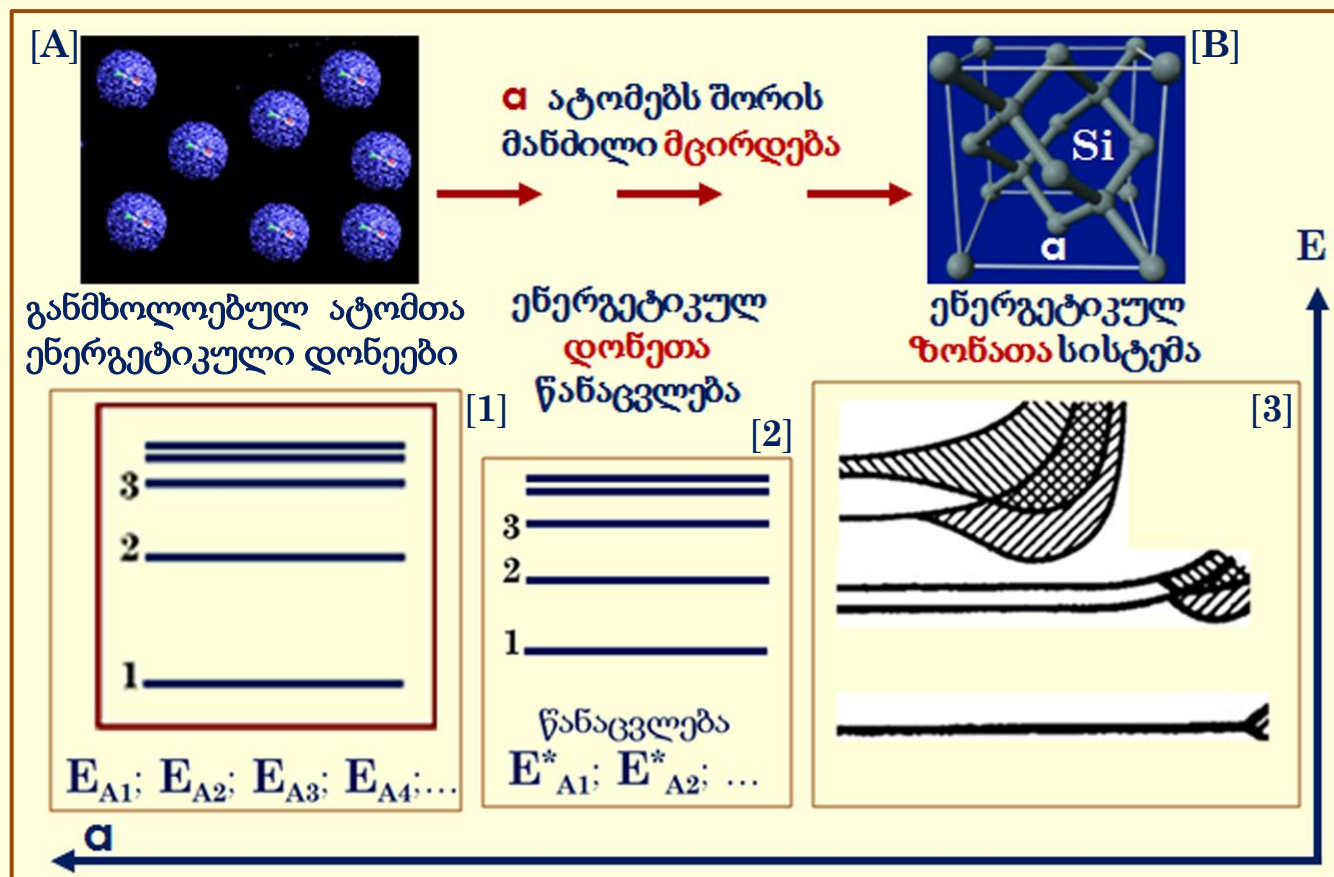
▪ შეუძლებელია ატომში 1-ზე მეტი ელექტრონი იმყოფებოდეს ერთსა და იმავე კვანტურ მდგომარეობაში (იდენტური n, ℓ, m, s);

• ანუ, 1 ენერგეტიკულ დონეზე მხოლოდ 2 ელექტრონი თუ განლაგდება, თანაც საპირისპირო სპინით!



W. Pauli
1900–1958

2.მყარი სხეულის ენერგეტიკული ზონების ფორმირება და შევსება



▪ ატომებიდან [A] კრისტალის [B] ჩამოყალიბებას საფუძველად უდევს ატომებს შორის მანძილის შემცირება. შედეგად ელექტრონის ურთიერთქმედების არეალი ფართოვდება - ერთის მაგივრად ის უკვე მრავალ ატომთან ურთიერთქმედებს. რაც განაპირობებს:

- ენერგეტიკული დონეების [1] წანაცვლებას - ენერგიის ცვლილებას [2];
- ლოკალურ დონეთა სისტემის საფუძველზე ყალიბდება ერთიანი - მთელი კრისტალისთვის - დაშვებულ ენერგიათა ზონების [3] სისტემა;

▪ ენერგეტიკულ ზონაში ელექტრონებისთვის “ადგილების” რაოდენობას განსაზღვრავს იზოლირებულ ატომებში შესაბამის დონეებზე “ადგილების” ჯამური რიცხვი;

▪ ენერგეტიკულ ზონურ სპექტრში დაშვებული ზონები გამოყოფილნი არიან ერთმანეთისგან **აკრძალული ენერგიის ზონებით** {უბნებით};
 • **აკრძალური ზონის** {ზონების} **სიგანე** ΔE_G კრისტალის უმნიშვნელოვანესი ენერგეტიკული მახასიათებელია;

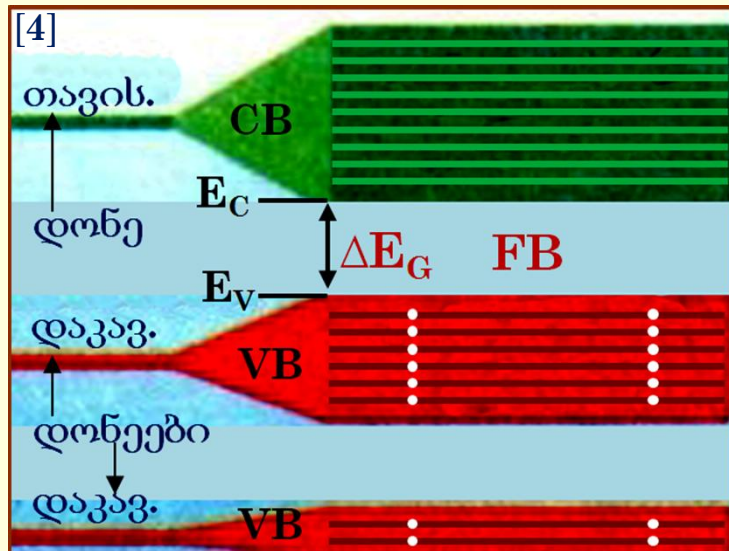
▪ ელექტრონები კრისტალში ურთიერთქმედებენ იონებისგან შემდგარ კრისტალურ მესერთან;
 • ეს ურთიერთქმედება აიწერება კრისტალის ეფექტური ელექტრული ველით, რომლის პერიოდული პოტენციალი ასახავს **კრისტალის სიმეტრიას**;

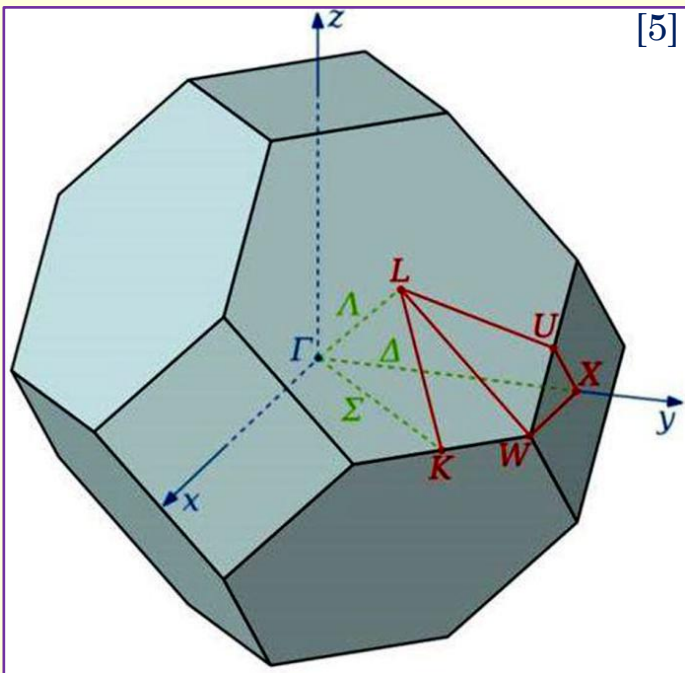
▪ კრისტალის ფიზიკური თვისებების აღწერისას განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება ელექტრონებით **შევსებულ უმაღლეს ზონას** $\{E_v \text{ მაქსიმალური ენერგიით}\}$ და მისგან ΔE_G ენერგიით დაცილებულ ელექტრონებისგან **თავისუფალ უდაბლეს ზონას** $\{E_c \text{ მინიმალური ენერგიით}\}$ [4];

▪ **ენერგეტიკული სპექტრი** - დამოკიდებულება ელექტრონის ენერგიასა და იმპულსს $\{k - \text{ტალღურ რიცხვს}\}$ შორის - დისპერსიის კანონი - განსაზღვრავს ნაწილაკის ქცევას კონკრეტულ პროცესებში:

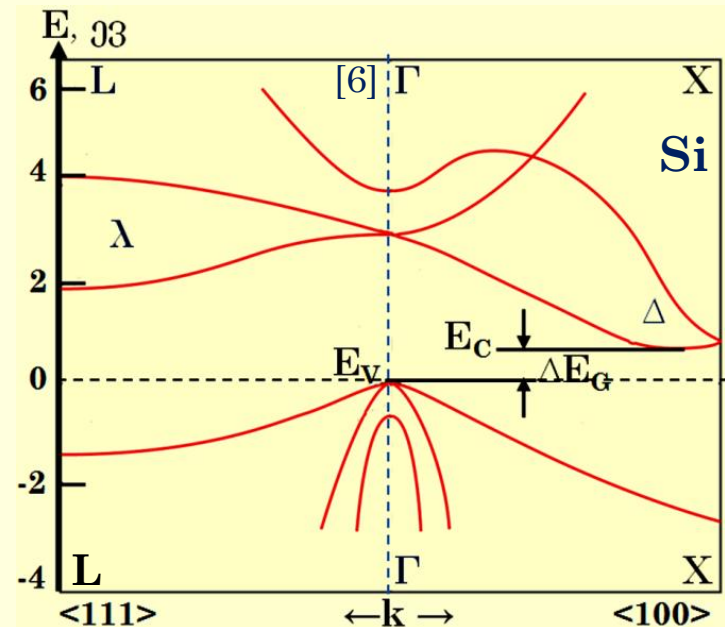
$$E(P) = E(h/\lambda) = E\{h/(2\pi/k)\} = E(\hbar k) \Rightarrow E(k) \quad (2.1)$$

k იცვლება $-\pi/a < k_i < \pi/a$ (a მესრის მუდმივა, $i=x,y,z$) საზღვრებში და ამ არეს **ბრილუენის I ზონას** უწოდებენ [5]. ბრილუენის ზონა შებრუნებული მესრის სივრცეს მიკუთვნება;



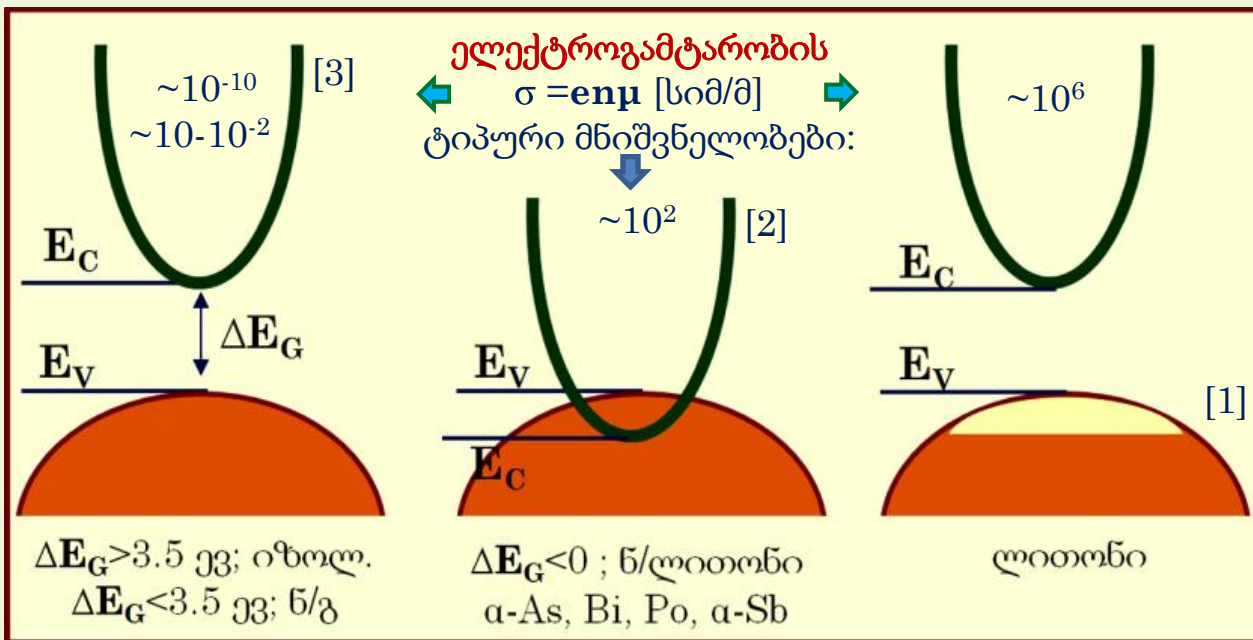


წახნაგცენტრირებული კუბური სიმეტრიის კრისტალის **ბრილუენის ზონა**. მაღალი სიმეტრიის წერტილებია Γ , L , $X \dots$



Si-ის კრისტალის **ენერგეტიკული ზონური სტრუქტურა** $\{E(k)$ სპექტრი}

3. ლითონები, ნახევრად გამტარები, დიელექტრიკები



✓ ელექტროგამტარობაში e -ს მონაწილეობა ნიშნავს, რომ მას შეუძლია ველის გავლენით V_d სიჩქარის შეძენა, ანუ უფრო მაღალ ენერგეტიკულ დონეზე გადასვლა, რომელზეც მისთვის თავისუფალი მდგომარეობა უნდა არსებობდეს;

▪ ეს შეიძლება განხორციელდეს ერთი დაშვებული ზონის ფარგლებში [1], ან თავისუფალი მდგომარეობების მქონე სხვა ზონაში გადასვლით [2],[3];

✓ ელექტრული მახასიათებლების საფუძველზე მიღებულია ნივთიერებათა დაყოფა **კარგ** (ლითონები [1]) და **ცუდ** (იზოლატორები ≡ დიელექტრიკები [3]) გამტარებად;

▪ შუალედური მდგომარეობა უკავიათ **ნახევრად გამტარებს** [3] და **ნახევრად ლითონებს** [2];

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



“თქვენი დრო შეზღუდულია, ამიტომ არ გაფლანგოთ ის სხვისი ცხოვრების ცხოვრებით.” Steve Jobs

რამდენი უნდა იცოდეთ, რომ იცოდეთ რამე ?!

1955 - 2011



სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 4

თემა:

სემესტრი III

ელექტროგამტარობა

ზვ.

027

1. ლითონთა ელექტროგამტარობის კლასიკური ელექტრონული თეორია

029

2. ნახევრად გამტარის საკუთრივი და მინარევული გამტარობა

031

3. ელექტროლიტური დისოციაცია. ელექტროლიზი

1. ლითონთა ელექტროგამტარობის კლასიკური ელექტრონული თეორია

■ ლითონთა გამტარობის **კლასიკური** ელექტრონული თეორია ჩამოაყალიბეს **დრუდემ** და **ლორენცმა** და ის ეფუძნება დაშვებას, რომ გამტარობის ელექტრონების ქცევა {მოძრაობა} **ემსგავსება იდეალური აირის მოლეკულების** მოძრაობის ხასიათს;

■ ლითონში თავისუფალი ელექტრონების ერთობლიობას {**აირს**} შეიძლება შევუსაბამოთ ერთატომიანი აირის მახასიათებლები და თეორიული დებულებები {მაგ.: სითბური ენერგია $\overline{E_k} = m\overline{V^2}/2 = (3/2)kT$ };

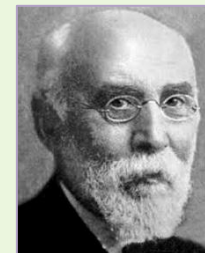
■ თუმცა, ცხადია, დრუდეს თეორია მნიშვნელოვნად განსხვავებულ ხედვას ეყრდნობოდა:

1. **ყველა** ელექტრონი მოძრაობს **მაქსველის** განაწილებით განსაზღვრული **ერთნაირი** საშუალო კვადრატული სიჩქარით

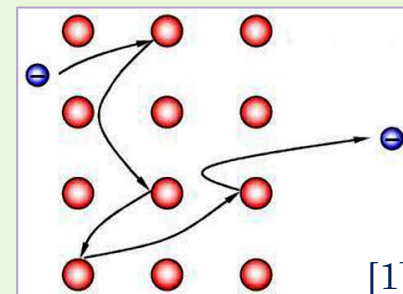
$$V_q = (3kT/m)^{1/2}$$



P. Drude
1863-1906



H. Lorentz
1853-1928



2. გამოირიცხა ელექტრონების **ერთმანეთზე** გაბნევა {აირში მოლეკულები ერთმანეთს ეჯახებიან}, განიხილებოდა მხოლოდ ელექტრონის **სიჩქარის მომენტალური ცვლილება** იონებთან დაჯახების შედეგად [1];

3. თითოეული დაჯახებისას ელექტრონის სიჩქარე **ნულს** უტოლდება. ანუ, **ნებისმიერი**, მათ შორის **დრეიფული სიჩქარე** სრულად **ისპობა**;

4. დაჯახებებს შორის **ველს** შეუძლია ელექტრონების მოძრაობის სიჩქარის **ნებისმიერი** სიდიდით შეცვლა, ხოლო დაჯახებისას **მიმართული** მოძრაობის სიჩქარე **ნულდება**;

• dt დროის შუალედში ელექტრონის სიჩქარის მომენტალური ცვლილების ალბათობას განსაზღვრავს dt/τ ფარდობა. τ - **რელაქსაციის** (თავისუფალი განარბენის) **დროა**;

• ელექტრონების სითბურ წონასწორობას **დაჯახებები** უზრუნველყოფენ. დაჯახების შედეგად ელექტრონი იღებს სიჩქარეს, რომელიც შეესაბამება დაჯახების ადგილის **ტემპერატურას**;

▪ თეორიის ფარგლებში განისაზღვრა σ კუთრი ელექტროგამტარობა

$$\sigma = ne^2\tau/m^* \quad (1.1)$$

• n - ელექტრონების კონცენტრაციაა;

• τ **რელაქსაციის დრო** - აქ დრო, რომლის განმავლობაში e -ს “ავიწყდება” რა მიმართულებით მოძრაობდა;

• m^* - ელექტრონის **ეფექტური მასა**, ანუ დინამიური მასა, რომელიც ვლინდება, როგორც კრისტალის პერიოდულ ველში ნაწილაკის **მოძრაობის მახასიათებელი** პარამეტრი;

$$\{(1.1.5) \ j=enV_d; (1.12.6) \ j = \sigma E\} \Rightarrow enV_d = \sigma E \Rightarrow$$

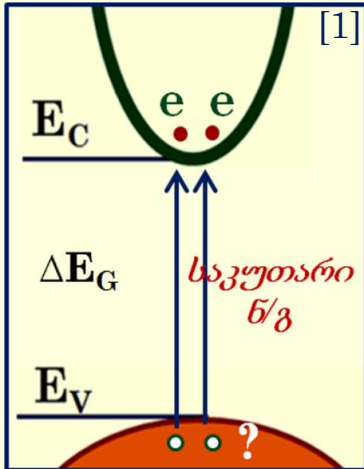
$$\sigma = enV_d/E \quad (1.2) \Rightarrow V_d/E \equiv \mu \quad (1.3)$$

• დამუხტული ნაწილაკის დრეიფულ სიჩქარეს **ერთეულოვან** ელექტრულ ველში (5.3) ეწოდა ამ ნაწილაკის **ძვრადობა** (μ);

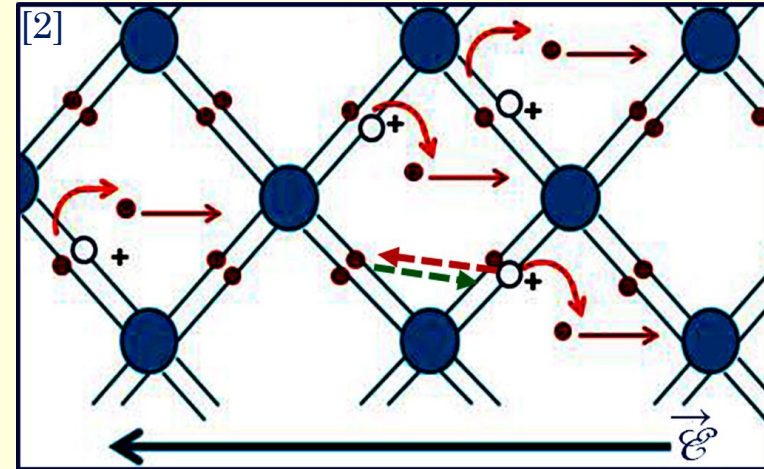
$$\cdot (1.3) \Rightarrow (1.2) \Rightarrow \boxed{\sigma = en\mu} \quad (1.4)$$

$$\cdot \{(1.1) \ \sigma = ne^2\tau/m^*, (1.4) \ \sigma = en\mu\} \Rightarrow \mu = e\tau/m^* \quad (1.5)$$

2. ნახევრად გამტარის საკუთრივი და მინარევული გამტარობა



■ მინარევებისგან თავისუფალ ნ/გ კრისტალში {საკუთარი ნ/გ [1]} ელექტროგამტარობა ძალიან მცირეა. ვინაიდან, E_C ენერგიის გამტარობის ზონაში, E_V ენერგიის სავალენტო ზონიდან გადასასვლელად e -მა ΔE_G სიგანის **აკრძალული ზონა** უნდა გადალახოს;



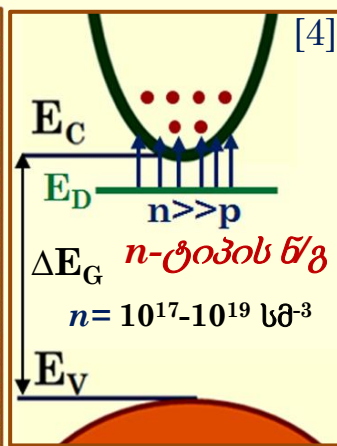
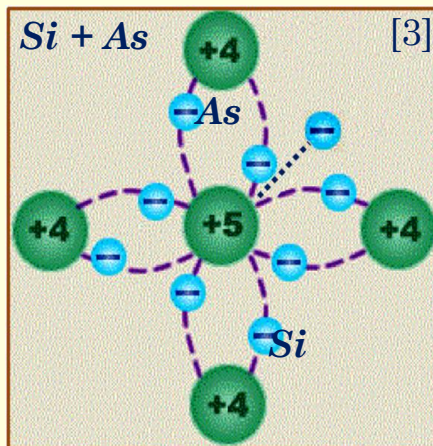
■ საკუთარ გამტარობაში ყოველთვის მუხტის გადამტანების **წყვილი** მონაწილეობს: ბმიდან **გამონთავისუფლებული**, ანუ გამტარობის ზონაში გადასული **თავისუფალი ელექტრონი** და ბმაში (ე.ი. სავალენტო ზონაში) დარჩენილი, დადებითი ეფექტური მუხტის მქონე ვაკანსია – **ხვრელი** [1];

■ რეალურად, **ხვრელური გამტარობა** ეს არის – ვაკანსიებზე გადანაცვლების მეშვეობით – **ბმული** ელექტრონების წვლილი გამტარობაში [2];

• ცხადია, სავალენტო ზონაში **ხვრელების** p კონცენტრაციას, გამტარობის ზონაში გადასული ელექტრონების n კონცენტრაცია განსაზღვრავს და $p = n$ (2.1);

■ **საკუთარი ნ/გ-ს** ელექტროგამტარობა $\sigma = \sigma_n + \sigma_p = en\mu_n + ep\mu_p$ (2.2)

■ **ხვრელების** ეფექტური მასა, როგორც წესი, აჭარბებს ელექტრონებისას ($m_p^* > m_n^*$), ამდენად μ_p **ხვრელების** ძვრადობა და, შესაბამისად, მათი σ_p წვლილი საკუთარ გამტარობაში **ნაკლებია** თავისუფალი ელექტრონების μ_n ძვრადობასა σ_n წვლილზე საკუთარ გამტარობაში;



▪ მინარევების შეტანით შესაძლებელია:

1. მუხტის თვისუფალი გადამტანების კონცენტრაციის ფართო საზღვრებში **ვარიერება**;

2. გამტარობის სასურველი $\{n \text{ ან } p\}$ ტიპის **ფორმირება**;

• ნ/გ იქნება **n-ტიპის**, თუ მინარევის ვალენტობა **აღემატება** {დონორი} კრისტალის ძირითადი შემადგენლის ვალენტობას [3],[4];

• ნ/გ იქნება **p-ტიპის**, თუ მინარევის ვალენტობა **ნაკლებია** {აქცეპტორი} კრისტალის ძირითადი შემადგენლის ვალენტობაზე [5],[6];

▪ მინარევული ატომები {თუ მათი რაოდენობა არ არის ძირითადი ატომების რიცხვის შესადარი} ქმნიან აკრძალულ ზონაში მინარევულ დონეს:

• დონორულ E_D დონეს გამტარებლობის ზონის ფსკერთან {მინარევის ვალენტობა მეტია} [4];

• აქცეპტორულ E_A დონეს სავალენტო ზონის ჭერთან {მინარევის ვალენტობა ნაკლებია} [6];

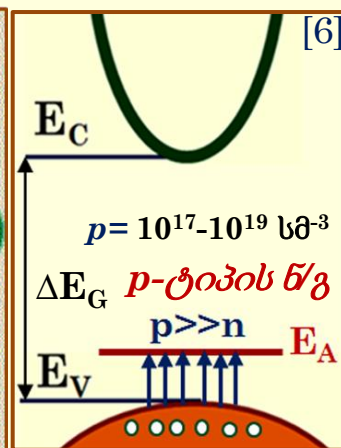
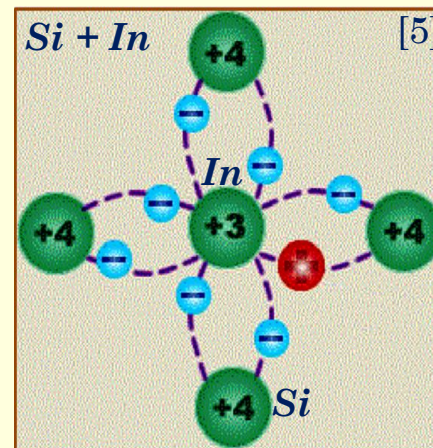
▪ ცხადია, დაშვებული ზონიდან მცირე ენერგეტიკული ღრეხოთი დაშორებული მინარეული დონიდან მნიშვნელოვნად **ადვილდება** თავისუფალი ელექტრონების გამტარებლობის ზონაში $\{n\}$ -ტიპის ნ/გ ან თავისუფალი ხვრელების სავალენტო ზონაში $\{p\}$ -ტიპის ნ/გ რიცხვის **რეგულირება**;

$T \rightarrow$

$\{n, p\} \uparrow$

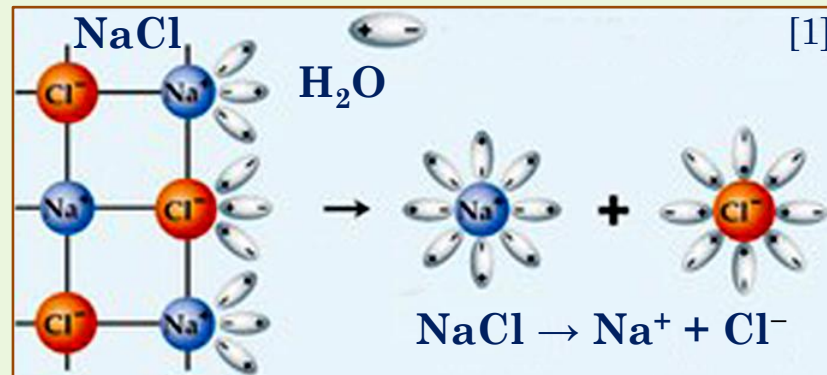
$\{\mu_n, \mu_p\} \downarrow$

▪ ტემპერატურის მატებისას **იზრდება** გამტარობა, ვინაიდან იზრდება **კონცენტრაციები** ზონებში {თუმცა, ასევე **მცირდება** მუხტის გადამტანების ძვრადობა};



3. ელექტროლიტური დისოციაცია. ელექტროლიზი

▪ ელექტროლიტებს მიეკუთვნებიან ნივთიერებები (შენაერთები), რომლებიც გამხსნელში, გამხსნელის პოლარული მოლეკულების **ელექტრული ველის** გავლენით, შემაღგენელ იონებად დაშლას – **ელექტროლიტურ დისოციაციას** – განიცდიან [1];
 • ელექტროლიტების ელექტროგამტარობა, ძირითადად, იონურია;



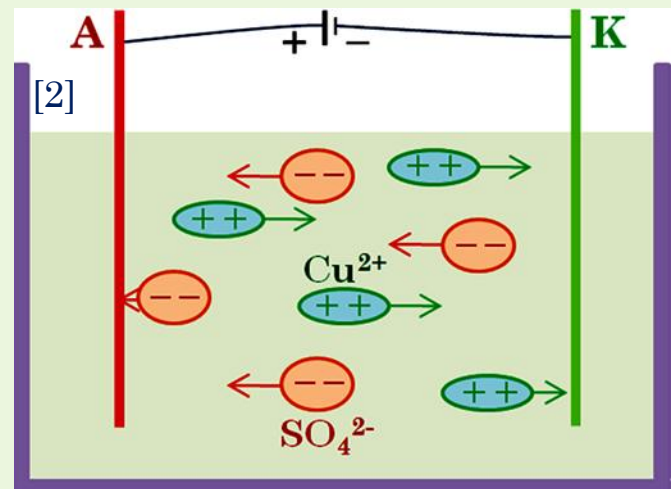
▪ გამხსნელი ამცირებს ნივთიერების მოლეკულის შემაღგენელ იონებს შორის ელექტროსტატიკურ მიზიდულობას (მაგ.: წყალი $\epsilon=81$ -ჯერ) და სითბური ენერგია (მოლეკულების ქაოსური მოძრაობა) შეიძლება საკმარისი აღმოჩნდეს იონების განცალკევებისთვის;

▪ ნივთიერების ელექტროლიტური **დისოციაციას ხარისხი**, ანუ იონებად დაშლილი მოლეკულების რიცხვის შეფარდება მათ საერთო რიცხვთან, ბევრ ფაქტორზეა დამოკიდებული: (მოლეკულის დისოციაციის უნარი, გამხსნელის გვარობა, ტემპერატურა, წნევა);

▪ დისოციაციით მიღებული და გამხსნელში ქაოსურად მოძრავი იონები ერთმანეთთან მიახლოებისას შეიძლება კვლავ შეერთდნენ ნეიტრალურ მოლეკულად – იონების **რეკომბინაცია**;

▪ მოცემულ პირობებში **დისოციაცია-რეკომბინაციის** ერთდროული მიმდინარეობა, რაღაც დროში უზრუნველყოფს დინამიური წონასწორობის დამყარებას და, ამდენად, იონების გარკვეული **რაოდენობის ფიქსირებას**;

✓ ელექტროლიტში დენის წყაროსთან მიერთებული ორი ელექტროდის (დადებითი პოტენციალის ანოდის და უარყოფითი – კათოდის) მოთავსებისას, ელექტროლიტში გამავალი დენი განაპირობებს ამ ელექტროდებზე რიგი ქიმიური და ფიზიკური პროცესების მიმდინარეობას, რომელთა ერთობლიობას **ელექტროლიზს** უწოდებენ;



▪ Cu_2SO_4 -ის შემთხვევაში [2]:

• SO_4^{2-} უარყოფითი იონები (ანიონები) ელექტრული ველის გავლენით მოძრაობენ ანოდისკენ და ანოდზე ჟანგვის ელექტროქიმიური რეაქციის შედეგად, გამოიყოფიან ნეიტრალური მოლეკულების სახით;

• Cu^{2+} დადებითი იონები (კათიონები) მიემართებიან კათოდისკენ და იქ მიიერთებენ იმ ორ ელექტრონს, რომელიც მათ აკლიათ (აღდგენის რეაქცია). ამრიგად, კათოდზე გამოიყოფა (დაილექება) სპილენძის უკვე ელექტრონეიტრალური ატომები;

• ელექტროლიზი წარმოადგენს სუფთა სპილენძის მიღების ერთ-ერთ მარტივ მეთოდს. ის გამოიყენება, აგრეთვე, ერთი ლითონის ზედაპირის მეორე ლითონის თხელი ფენით დასაფარავად, ლითონის მინარევებისგან გასათავისუფლებლად და ა.შ.;

▪ ელექტროლიტები ემორჩილებიან:

- **ომის** კანონს $j = \sigma E$ - ამდენად, **სუსტი** დენიც აღძრავს ელექტროლიზის მოვლენას;
- **ჯოულ-ლენცის** კანონს - დენის მთელი ენერგია სითბოს სახით გამოიყოფა;



“ვერანაირი საგრძნობი, რეალური სიმშვენიერე ვერ შეედრება იმას, რისი დაგროვების უნარიც გააჩნია ადამიანს თავისი ფანტაზიის სიღრმეში.” *Francis Scott Fitzgerald*



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1896 - 1940

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 5

თემა:

სემესტრი III

ელექტრული დენი სითხესა და აირში

ზვ.

034

1.ელექტროლიზის კანონები

035

2.დენი აირსა და ვაკუუმში

039

3.პლაზმა

1. ელექტროლიზის კანონები

✓ ელექტროლიზი აიწერება ფარადეის მიერ ცდით დადგენილი ორი კანონით:



M. Faraday
1791 - 1867

I. ელექტროდზე გამოყოფილი ნივთიერების მასა პროპორციულია ელექტროლიტში დენის ძალისა და დენის გავლის დროის (ანუ, პროპორციულია გასული მუხტის სიდიდის):

$$m = kIt = kq \quad (1.1)$$

• ნივთიერების გვარობაზე დამოკიდებულ k კოეფიციენტს

ელექტროქიმიური ეკვივალენტი ეწოდება;

• (1.1) $\Rightarrow [k] = [m]/[q] = 1 \text{ კგ/კ} \text{ და } k \text{ ელექტროქიმიური ეკვივალენტი} - \text{ელექტროლიტში } 1 \text{ კ მუხტის გავლისას ელექტროდზე გამოყოფილი ნივთიერების მასის ტოლია;}$

II. ნივთიერების ელექტროქიმიური ეკვივალენტი მისი ქიმიური A ეკვივალენტის პროპორციულია:

$$k = F^{-1}A \quad (1.2)$$

• F – ფარადეის მუდმივაა. მისი რიცხვითი მნიშვნელობა ავოგადროს რიცხვის და ელემენტარული მუხტის ნამრავლის ტოლია:

$$F = N_A \cdot e = (6.022 \cdot 10^{23} \text{ მოლი}^{-1}) \cdot (1.602 \cdot 10^{-19} \text{ კ}) = 96\,485 \text{ კ} \cdot \text{მოლი}^{-1};$$

• A ქიმიური ეკვივალენტი – ნივთიერების μ მოლური მასისა და ν ვალენტობის ფარდობით განისაზღვრება: $A = \mu / \nu \quad (1.3);$

$$\{(1.2), (1.3)\} \Rightarrow (1.1) \Rightarrow m = F^{-1}Aq = F^{-1}(\mu/\nu)q \quad (1.4) \Rightarrow \text{თუ, რიცხობრივად } q = F, \text{ მაშინ}$$

$$m = \mu/\nu = A \quad (1.5)$$

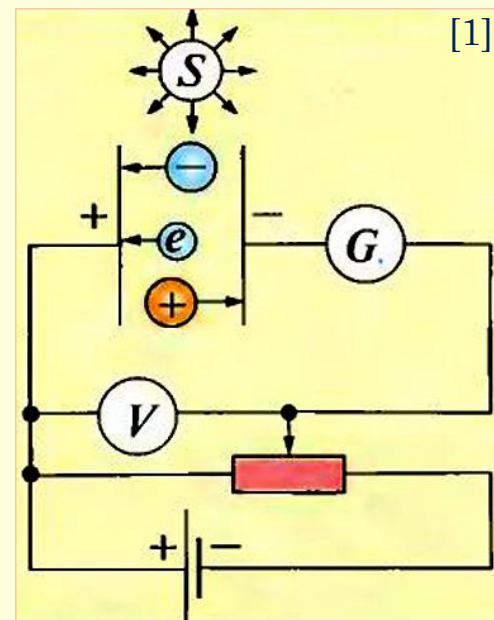
• ელექტროლიტში ფარადეის მუდმივას ტოლი მუხტის გავლისას, ელექტროდზე გამოყოფილი ნივთიერების მასა რიცხობრივად მისი ქიმიური ეკვივალენტის ტოლია;

2.დენი აირსა და ვაკუუმში

▪ზუნებრივ მდგომარეობაში აირი **დიელექტრიკია**
- დენს არ ატარებს, ვინაიდან მასში არც იონები და
არც თავისუფალი ელექტრონები **არ არსებობენ**;

▪აირის გამტარობას მისი ატომების **იონიზაცია** – ატომი-
დან ელექტრონების მოწყვეტის შედეგად თავისუფალი
ელექტრონების და დადებითი იონების გაჩენა – განაპი-
რობებს;

•თავისუფალი ელექტრონი შეიძლება ნეიტრალურმა
ატომმა ჩაიჭიროს, მაშინ გამტარობაში წარმოქმნილი
უარყოფითი იონებიც მიიღებენ მონაწილეობას [1];



▪აირის ატომის იონიზაციას გარკვეული ენერგია (**იონიზაციის ენერგია**)
უნდა მოხმარდეს, რომელიც აირს სხვადასხვა გზით შეიძლება გადაეცეს:

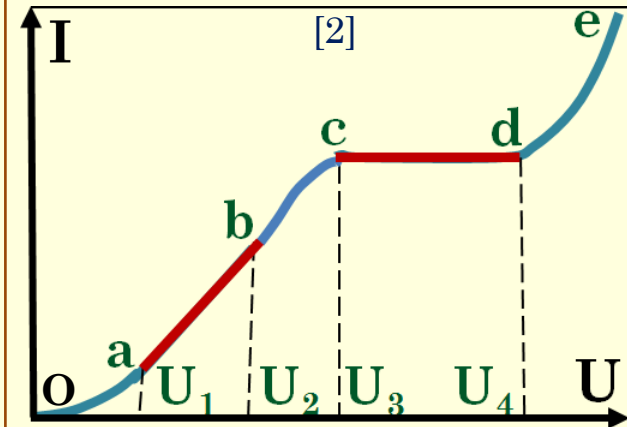
1. დასხივებით (ულტრაიისფერი, რენტგენის, რადიოაქტიური სხივები);
2. გახურებით;
3. ძლიერი ელექტრული ველით;
4. თვით იმ ელექტრული ველით, რომელმაც აირში დენი უნდა აღძვრას;

▪გარეშე ზემოქმედების პირობებში (იონიზაციის 1, 2, 3 გზა)
დამუტული ნაწილაკების **გაჩენის** შედეგად დენის აღძვრას
აირის არათავისთავადი განმუხტვა (გამტარობა) ეწოდება [1];

▪თუ, გარედან აირს იონიზაციისთვის საჭირო ენერგია არ მიეწოდება და იონიზაციასაც ელექტროდებს შორის არსებული ველი (4) განაპირობებს, მაშინ აღძრულ დენს აირში **თავისთავადი განმუხტვა** (გამტარობა) უწოდება;

▪აირში გამტარობის ვოლტ-ამპერული (**VA**) მახასიათებელი, რამდენიმე გამოკვეთილი უბნისგან შედგება [2]. ომის კანონი {წრფივი $I(U)$ დამოკიდებულება} მხოლოდ ძაბვათა ვიწრო **ab** ინტერვალში სრულდება (U_1-U_2);

•**Oa** უბანზე {ძალიან მცირე ძაბვისას} იონიზატორის მოქმედებით გაჩენილი ელექტრონები და იონები **სრულად ვერ მონაწილეობენ** დენის შექმნაში - მათი ნაწილი **რეკომბინაციას განიცდის** და ვერ აღწევს ანოდამდე;



▪ძაბვის ზრდისას უკვე დიდი სიჩქარით მოძრავ დამუხტულ ნაწილაკებს **ნაკლები დრო რჩებათ** ნეიტრალურ მოლეკულებად შეერთებისთვის (რეკომბინაციისთვის) და დენი სწრაფად იმატებს {**VA-ს ab, bc** უბნები};

▪შემდგომ, ძაბვის გარკვეული (U_3) მნიშვნელობისას, იონიზატორით დროის შუალედში გაჩენილი ყველა **დამუხტული ნაწილაკი** იმავე დროში **ასწრებს ანოდამდე მისვლას** და დენი ძაბვის მატებას ვეღარ გრძნობს {**VA-ს cd** უბანი} - **ნაჯერი ხდება**;

▪თუ, დენის ნაჯერობის მიუხედავად ძაბვის ზრდა გაგრძელდება, მის გარკვეულ (U_4) მნიშვნელობაზე კვლავ გამოვლინდება დენის, და თანაც ძალიან მკვეთრი, მატება. ეს ნიშნავს, რომ იონიზატორისგან დამოუკიდებლად, გაჩნდნენ ახალი, დამატებითი **დამუხტული ნაწილაკები** - გამოვლინდა **თავისთავადი განმუხტვა**;

▪ ძაბვის ძალიან მაღალ მნიშვნელობებზე, ელექტრული ველი იმდენად ძლიერი ხდება, რომ მის მიერ აჩქარებულ ელექტრონებს შესწევთ უნარი ნეიტრალურ ატომებთან დაჯახებისას გადასცენ მათ იონიზაციისთვის საჭირო ენერგია;

• შედეგად, ელექტრონებისა და იონების რიცხვის ზრდა ზვავურ ხასიათს იღებს - დარტყმითი ელექტრონული იონიზაცია;

• ზვავური პროცესის დაწყებისთვის შეიძლება ერთი ელექტრონის არსებობაც იყოს საკმარისი;

• მხოლოდ დარტყმითი ელექტრონული იონიზაცია ვერ იქნება თავისთავადი განმუხტვის ერთადერთი მექანიზმი;

• ელექტრონები მიემართებიან რა ანოდისკენ, მისი მიღწევის შემდეგ გამტარობის პროცესში წვლილს ველარ შეიტანენ;

▪ იონიზაციის შესანარჩუნებლად კათოდიდან ახალი თაობის ელექტრონების ემისია საჭირო. ეს მიიღწევა კათოდისკენ მოძრავი დადებითი იონების ენერგიის ხარჯზე, მათი კათოდთან დაჯახებისას;

▪ კათოდიდან ელექტრონების ემისია, ასევე შესაძლებელია კათოდის გახურებით - თერმოელექტრონულ ემისია;

✓ ვაკუუმში დენის აღძვრას ძირითადად თერმოელექტრონული ემისია უდევს საფუძვლად. მისი გამოყენებით ვაკუუმში იქმნება **თავისუფალი ელექტრონების** გარკვეული კონცენტრაცია;

• ლითონიდან “ამოსასვლელად გამზადებულ” ელექტრონს ენერგია სჭირდება:
1. კათოდის შემადგენელი იონების მიზიდულობის **დასაძლევად**;
2. კათოდიდან უკვე ამოფრქვეული და მის ზედაპირთან დაგროვებული ელექტრონების - “ელექტრონული ღრუბლის” განზიდვის **გადასალახავად**;

▪ ვაკუუმში თერმოელექტრონული ემისიით გაჩენილი თავისუფალი ელექტრონები, კათოდსა და ანოდს შორის პოტენციალთა სხვაობის არსებობისას, **ამოძრავდებიან ანოდისკენ** და ვაკუუმში დენი გაივლის;
• ვაკუუმშიც, აირის მსგავსად, ომის კანონი ფაქტობრივად **არ** სრულდება;

- ✓ აირს, რომლის სტრუქტურული ელემენტების (*სე*) უმეტესობა **იონიზირებულია** ეწოდება პლაზმა;
- პლაზმაში დადებითი და უარყოფითი მუხტების სიმკვრივები ერთმანეთს {პრაქტიკულად} **უტოლდება**. ამიტომ პლაზმა **ელექტრონეიტრალურ სისტემას** წარმოადგენს;
 - პლაზმა შეიძლება აღქმული იყოს როგორც ნივთიერების კიდევ ერთი აგრეგატული მდგომარეობა (მყარ, თხევად და აირადთან ერთად);
 - პლაზმის w იონიზაციის ხარისხი იონიზირებული N_i და სრული N *სე*-ის რიცხვთა ფარდობაა
- $$w = N_i / N \quad (3.1)$$



შავი ხვრელის ირგვლივ ცხელი პლაზმის აკკრეციული (გრავიტაციულად მიზიდული მატერიის) დისკო

- მზე და ვარსკვლავები გახურებული ($T = 10^6 - 10^7 \text{ K}$) პლაზმის გიგანტურ შენადედს წარმოადგენენ;
- პლაზმა მოიცავს კოსმოსურ სივრცეს ვარსკვლავებსა და გალაქტიკებს შორის. დედამიწის ატმოსფეროს ზედა ფენაც სუსტად იონიზირებული პლაზმაა;

- განსხვავებული თვისებების წყალობით, **პლაზმა** ნივთიერების განსაკუთრებულ **მდგომარეობად** განიხილება;
- პლაზმის მოძრაობის ელექტრული და მაგნიტური ველებით **მართვის** შესაძლებლობა მისი პრაქტიკული გამოყენების {ძრავის მუშა სხეული, ენერგიის წყარო თუ გენერატორი, ლითონების დამუშავება და ა.შ.} წონიან საფუძვლებს ქმნის;



“სამართლიანობა ძლიერი უნდა იყოს, ძალა კი სამართლიანი.” Blaise Pascal

რამდენი უნდა იცოდეს, რომ იცოდეს რამე ?!

1623 - 1662



სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 6

თემა:

სემესტრი III

მაგნიტური ველის მახასიათებლები

88.

041

1. მაგნიტური ველი. მაგნიტური ველის ინდუქცია

043

2. მაგნიტური ინდუქციის წირები და ნაკადი

045

3. ბიო-სავარ-ლაპლასის კანონი

046

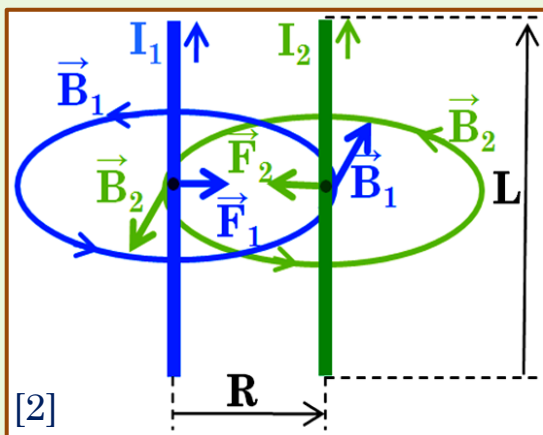
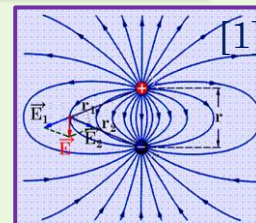
4. მაგნიტური ველის მოქმედება დენიან გამტარზე (ამპერის ძალა)

047

5. პარალელური დენების ურთიერთქმედება

1. მაგნიტური ველი. მაგნიტური ველის ინდუქცია

▪ **უძრავი მუხტები** ურთიერთქმედებენ მიზიდვა-განზიდვის ძალებით, ამ მუხტებით შექმნილი ელექტროსტატიკური **ველების** მეშვეობით [1];



✓ მიზიდვა-განზიდვის ძალებით ურთიერთქმედებენ **დენიანი გამტარებიც** (**მოძრავი მუხტები**) მათ ირგვლივ აღძრული **სხვა ბუნების** ველებით – **მაგნიტური ველებით**;

▪ **ერთი** მიმართულების დენები **მიიზიდებიან** [2];

▪ **საპირისპირო** მიმართულების დენები **განზიდებიან**;

• მაგნეტიზმის ისტორია ანტიკური მცირე აზიიდან იწყება - **მაგნეზიაში** აღმოაჩინეს მიზიდვის უნარის მქონე “ქვები” – **“მაგნიტები”**;

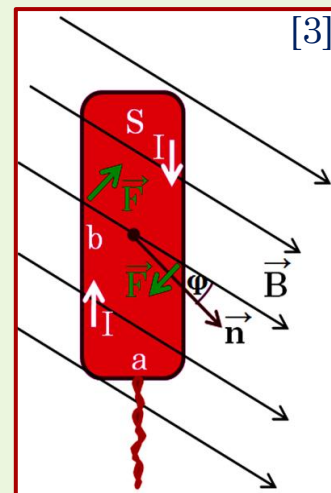
▪ დენიანი გამტარი მუდმივ მაგნიტთანაც ურთიერთქმედებს:

• მუდმივი მაგნიტი **მაორიენტირებელ ზეგავლენას** ახდენს დენიან ჩარჩოზე [3];

• დენიანი გამტარი – კომპასის ისარზე;

▪ ჩამოყალიბებული კონცეფციის თანახმად ამ ურთიერთქმედებებს განაპირობებს არა ელექტრული, არამედ – **მაგნიტური ველი**;

✓ მაგნიტური ველის ძირითად (**ძალურ**) მახასიათებელს **$\vec{B}$ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი** წარმოადგენს. ის სივრცის მოცემულ წერტილში ასახავს მაგნიტური ველის სიდიდესა და მიმართულებას;

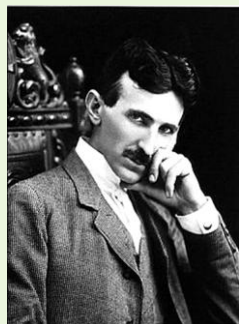
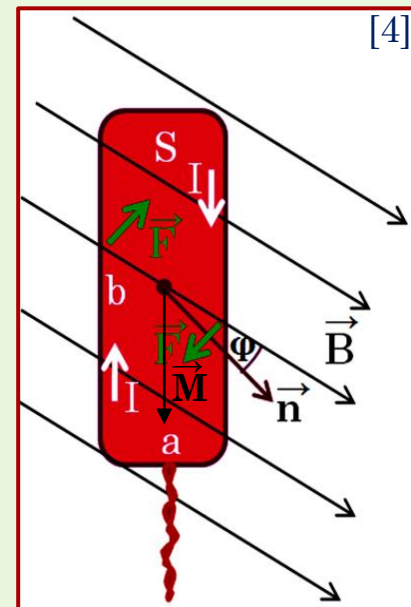


- მაგნიტური ველის არსებობის, ინდუქციის ვექტორის დადგენა შესაძლებელია მაგნიტური ველის სამი გამოვლინების საფუძველზე:
 - დენიან ჩარჩოზე მაბრუნებელი ძალის **მომენტის** მოქმედება;
 - დენიან გამტარზე ძალით მოქმედება (**ამპერის ძალა**);
 - მოძრავ მუხტზე ძალით მოქმედება (**ლორენცის ძალა**);

▪ $S=ab$ ფართობის მქონე I დენიან ჩარჩოზე [4] მოქმედი მექანიკური მახრუნებელი მომენტი $\vec{M}=IS[\vec{n}\vec{B}]$:

- მომენტი **მაქსიმალურია**, როდესაც ჩარჩოს სიბრტყის $\vec{n}$ ნორმალს $\vec{B}$ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის (მაგნიტური ველის) **მართობია**;
- მომენტი **ნულის** ტოლია, თუ ნორმალს $\vec{n}$ ინდუქციის $\vec{B}$ ვექტორის მიმართულებას **ემთხვევა**;
- M მომენტის სიდიდე იზრდება ჩარჩოს S ფართობის, მასში დენის ძალის I და ინდუქციის B ვექტორის ზრდისას:

$$M = IBS \sin \varphi \quad (1.1), \quad \text{თუ } \varphi = 90^\circ \Rightarrow M_{\max} = IBS \quad (1.2)$$



N.Tesla
1856-1943

- (1.2) $\Rightarrow B = M_{\max}/IS$ (1.3). B მოცემულ გარემოში მხოლოდ ველის მახასიათებელია და **არ** არის დამოკიდებული (1.3) -ში შემავალ არც ერთ სიდიდეზე;
- (1.3) $\Rightarrow [B] = [M]/[I][S] = 15\text{მ}/(\text{ამ}^2) = 1\text{ტლ}$. ერთი ტესლა ისეთი მაგნიტური ველის ინდუქციაა, რომელიც მასში შეტანილ 1მ^2 ფართობის ჩარჩოზე 15მ მაქსიმალური მახრუნებელი მომენტით იმოქმედებს, თუ ამ ჩარჩოში 1 ა დენი გადის;

- თუ სივრცის მოცემულ წერტილში მაგნიტურ ველს რამდენიმე წყარო ქმნის, მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი სუპერპოზიის პრინციპით დგინდება

$$\vec{B} = \sum \vec{B}_i \quad (1.4)$$

2. მაგნიტური ინდუქციის წირები და ნაკადი

✓ მაგნიტური ველის ვიზუალიზაცია ხდება მაგნიტური ინდუქციის წირებით {თვისობრივად განსხვავდებიან ელექტრული ველის ძალწირებისგან};

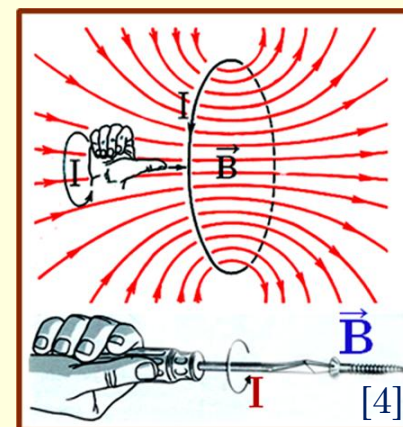
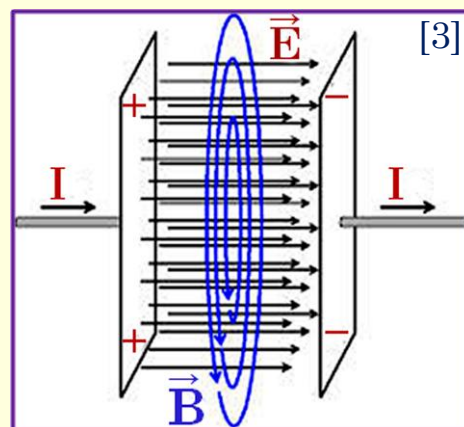
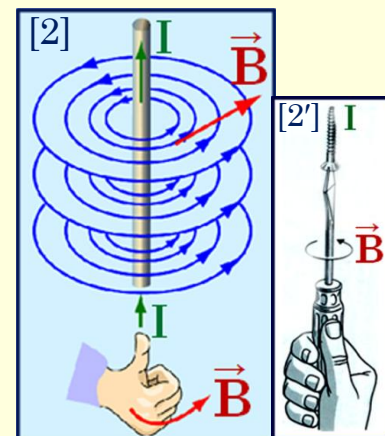
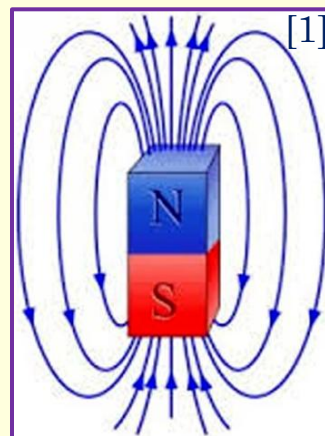
▪ **მაგნიტური წირები ჩაკეტილია** {არც დასაწყისი აქვთ, არც დასასრული} [1];

▪ მაგნიტური წირის ნებისმიერ წერტილში გავლებული მხები მაგნიტური **ინდუქციის** $\vec{B}$ ვექტორის მიმართულებას გვიჩვენებს [2];

▪ თუ ველის წირები ჩაკეტილია, მას **გრიგალური** ეწოდება;

▪ **გრიგალურია ელექტრული ველიც**, რომელიც მუხტებთან არაა დაკავშირებული, არამედ ინდუცირებულია დროში ცვლადი მაგნიტური ველით;

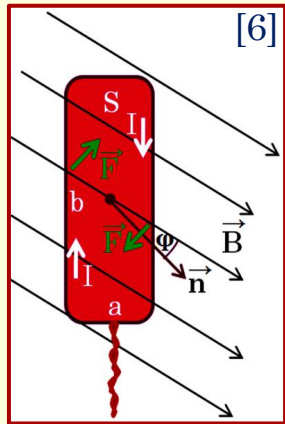
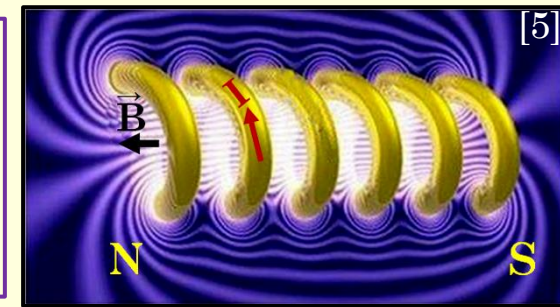
▪ გრიგალური ელექტრული და მაგნიტური ველები თანაარსებული ველებია [3]. ისინი ქმნიან ერთიან **ელექტრომაგნიტურ ველს**;



▪ წრფივი დენის მაგნიტური ველი არ არის ერთგვაროვანი და ცენტრიდან დაშორებისას ინდუქციის წირების სიხშირე მცირდება. მაგნიტური ველის მიმართულების დასადგენად მარჯვენა ხელის ან მარჯვენა ხრახნის [2],[2'] წესები გამოიყენება;

▪ წრიული დენის (დენიანი ხვიის, კოჭას) მაგნიტური ველი ხვიის სიბრტყის მართობულია. მაგნიტური ველის მიმართულების დადგენა იგივე მეთოდების (მარჯვენა ხელი და მარჯვენა ხრახნი) გამოყენებით ხდება [4];

▪ **სოლენოიდის** (გრძელი კოჭას) ინდუქციის წირები კონცენტრულ წრეწირებს აღარ წარმოადგენენ. სოლენოიდის შიგნით მაგნიტური ველი **ერთგვაროვანია**. გარეთ წირების განაწილება მუდმივი მაგნიტის წირების მსგავსია, ანუ შეკრული წირებია, რომლებიც **გამოდიან** ჩრდილოეთი პოლუსიდან და **შედიან** სამხრეთში) [5];



▪ დენიან კონტურზე მაგნიტური ველის მოქმედება დამოკიდებულია ამ კონტურის გამჭოლი მაგნიტური წირების რიცხვზე ე.ი.: **1. B** მაგნიტური ინდუქციის სიდიდეზე; **2. S** კონტურის ფართობზე; **3. phi** კუთხეზე კონტურის ნორმალსა და **B** ინდუქციის ვექტორს შორის [6];

▪ რაიმე ფართობის გამჭოლი მაგნიტური ინდუქციის წირების რაოდენობას განსაზღვრავს მაგნიტური ინდუქციის ნაკადი (Φ):

$$d\Phi = B dS \cos\varphi = B_n dS \quad (2.1) \quad \text{ერთგვაროვანი ველისას} \quad \Phi = B_n S \quad (2.2)$$

✓ {(2.1), (2.2)}:

▪ Φ მაქსიმალურია, როდესაც კონტურის ნორმალი $\vec{B}$ ვექტორის პარალელურია;
 ▪ $[\Phi] = [B][S] = 1 \text{ ტლ} \cdot \text{მ}^2 = 1 \text{ ვბ}$. ერთი ვებერი ისეთი მაგნიტური ინდუქციის ნაკადია, რომელსაც ქმნის 1 ტლ ინდუქციის ერთგვაროვანი მაგნიტური ველი მის მართობულად მოთავსებულ 1 მ² ფართობის კონტურზე;

• **შეკრული ზედაპირისას** მისი გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი **ნულია**, რადგან [7]:

• გამომავალი ნაკადი **დადებითია** (კუთხე φ მახვილია და (2.1) $\Rightarrow \Phi_{\rightarrow} > 0$);

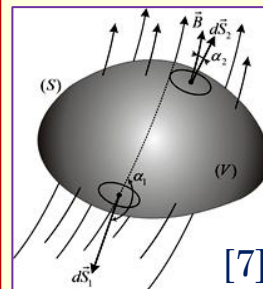
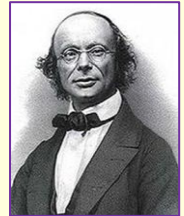
• შემომავალი ნაკადი **უარყოფითია** (კუთხე φ ბლაგვია და (2.1) $\Rightarrow \Phi_{\leftarrow} < 0$);

▪ ამრიგად: $\oint B_n dS = 0 \quad (2.3)$ ანუ, $\text{div } \vec{B} = 0 \quad (2.4)$

• (2.3), (2.4) ასახავს

გაუს-ოსტროგრადსკის თეორემას მაგნიტური ინდუქციის ნაკადისთვის;

W. Weber
1804–1891



3. ბიო-სავარ-ლაპლასის კანონი

✓ ბიოს და სავარის ცდების შედეგები კანონის სახით ლაპლასმა ჩამოაყალიბა. კანონი ადგენს დენით (ან მოძრავი მუხტით) ადრული მაგნიტური ველის **ინდუქციის ვექტორს**. სივრცის მოცემულ წერტილში $\vec{B}$ -ს განსაზღვრავს:

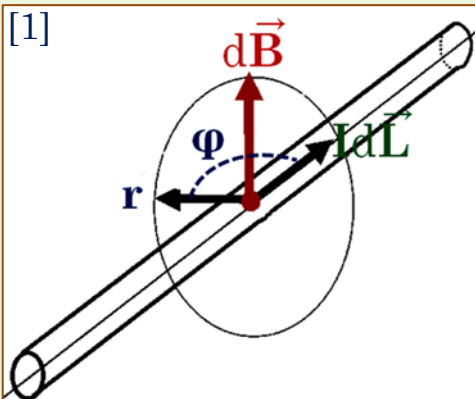
1. I დენის ძალა; 2. $\vec{r}$ მანძილი დენიან გამტარამდე; 3. გამტარის ადებული სიგრძის $d\vec{L}$ ელემენტი, ანუ ($I d\vec{L}$) დენის ელემენტი; 4. φ კუთხე დენის ელემენტსა და $\vec{r}$ -ს შორის

$$d\vec{B} = \mu_0(4\pi)^{-1} [I d\vec{L} \cdot \vec{r}] / r^3 \quad (3.1)$$

(3.1) $\Rightarrow$

$$d\vec{B} = \mu_0(4\pi)^{-1} IdL \sin\varphi / r^2 \quad (3.2)$$

[1]



▪ უსასრულო სიგრძის წრფივი დენიანი გამტარის **მაგნიტური ველი**, გამტარიდან r მანძილზე [1]:

$$\vec{B} = \mu_0 I / 2\pi r \quad (3.3)$$

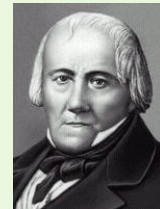
▪ წრიული (R რადიუსის) დენის **ველი**:

• წრის ცენტრში [2]: $\vec{B} = \mu_0 I / 2R \quad (3.4)$

• ცენტრიდან r მანძილზე [3]: $\vec{B} = \mu_0 I R^2 / 2(R^2 + r^2)^{3/2} \quad (3.5)$

▪ სოლენოიდის (ხვიათა რიცხვი n) **მაგნიტური ველი** [4]:

$$\vec{B} = \mu_0 n I \quad (3.6)$$



J-B. Biot
1774–1862



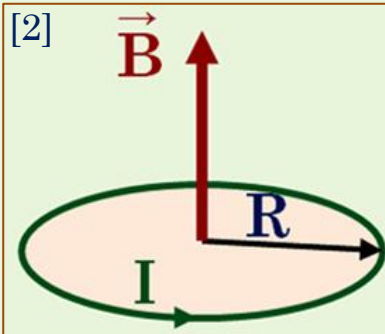
F. Savart
1791–1841



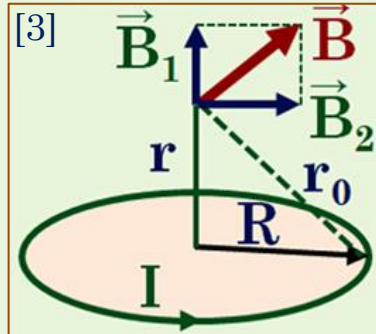
P-S. de Laplace
1749–1827

μ_0 - მაგნიტური მუდმივა,
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ ჰმ/მ}$
 {1 ჰენრი - ინდუქციურობის ერთეული}

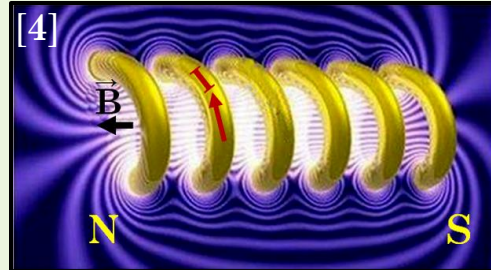
[2]



[3]



[4]



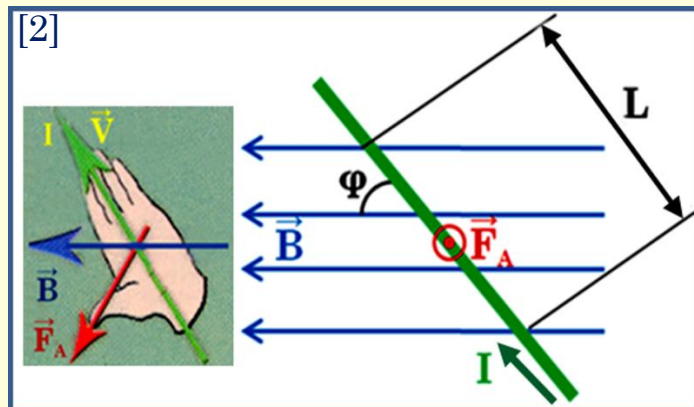
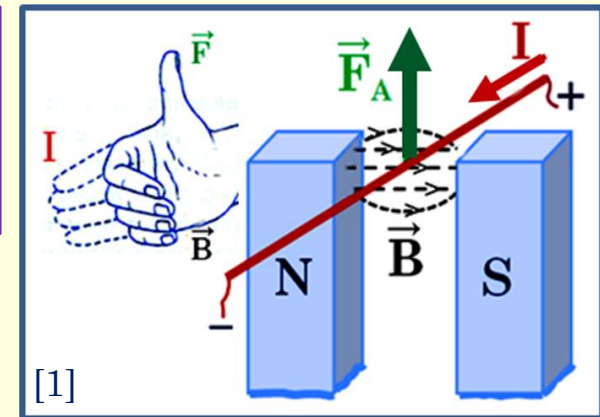
4. მაგნიტური ველის მოქმედება დენიან გამტარზე (ამპერის ძალა)



A. Ampère
1775-1836

- ✓ მაგნიტური ველი დენიან გამტარზე მოქმედებს $\vec{F}_A$ ძალით {ამპერის ძალით}, რომელიც $\vec{B}$ ინდუქციის ვექტორის და I დენის მართობია ყოველთვის;
- $\vec{F}_A$ მაქსიმუმს *მიაღწევს*, თუ დენიანი გამტარი მაგნიტური წირებისადმი მართობულად იქნება განლაგებული;
- დენის მიმართულების საპირისპიროზე შეცვლისას $\vec{F}_A$ 180° -ით შემობრუნდება;
- ნახ. [1]-ზე ამპერის ძალის მიმართულებას {ვერტიკალურად $\uparrow$, თუ $\downarrow$ ვადგენთ მარჯვენა ხელის წესით};

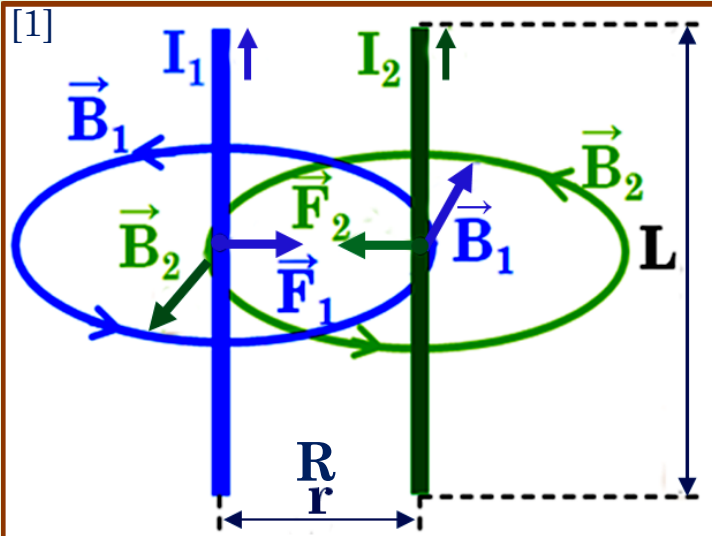
• **მარჯვენა** ხელი, გაშლილი თითებით, გამტარის გასწვრივ, დენის მიმართულებითაა განლაგებული და მოღუნული ისე, რომ $\vec{B}$ -ს ორიენტაციას შეესაბამებოდნენ. 90° -ით გაშლილი ცერი თითი $\vec{F}_A$ -ს მიმართულებას ასახავს [1];



- $F_A = IBL \sin \varphi$ (4.1) თუ $\varphi = 90^\circ \Rightarrow F_{Amax} = IBL$;
L-ველში მოთავსებული გამტარის ნაწილის სიგრძეა;
- φ კუთხეა $\vec{B}$ ვექტორსა და I -ს მიმართულებას შორის;
- L ან B-ს არაერთგვაროვნებისას $dF_A = IdLB \sin \varphi$ (4.2)

▪ **მარცხენა** ხელის წესი: გაშლილი 4 თითი დენის მიმართულებას ემთხვევა. დენისადმი $\vec{B}$ -ს მართობული მდგენელი ხელის გულში შედის [2]. 90° -ით გაშლილი ცერი თითი $\vec{F}_A$ -ს მიმართულებას ასახავს {ნახაზის სიბრტყის მართობულად, ჩვენსკენ ან ჩვენგან};

5.პარალელური დენების ურთიერთქმედება



▪ დენიანი გამტარები ურთიერთქმედებენ მათ მიერ შექმნილი მაგნიტური ველების მეშვეობით. **ერთი მიმართულების** დენები იწვევენ გამტარების **მიზიდვას**, **საპირისპირო** – **განზიდვას**;

▪ **თითოეული** დენიანი გამტარი გრძნობს **მეორე** დენით შექმნილი მაგნიტური ველის მხრიდან მოქმედ **ამპერის** ძალას [1];

$$\mathbf{F}_{A1} = I_1 \mathbf{B}_2 L \quad (5.1) \quad \mathbf{F}_{A2} = I_2 \mathbf{B}_1 L \quad (5.2) \quad \{\varphi = 90^\circ \Rightarrow \sin \varphi = 1\}$$

• ბიო-სავარ-ლაპლასის კანონის შესაბამისად:

$$\mathbf{B}_1 = \mu_0 I_1 / 2\pi R \quad (5.3) \quad \mathbf{B}_2 = \mu_0 I_2 / 2\pi R \quad (5.4)$$

$$\{ (5.3), (5.4) \Rightarrow (5.1), (5.2) \} \Rightarrow \mathbf{F}_{A1} = \mu_0 I_1 I_2 L / 2\pi R \quad (5.5) \quad \mathbf{F}_{A2} = \mu_0 I_2 I_1 L / 2\pi R \quad (5.6) \Rightarrow$$

პარალელური დენიანი გამტარები **მიიზიდებიან** ან **განიზიდებიან** ძალით

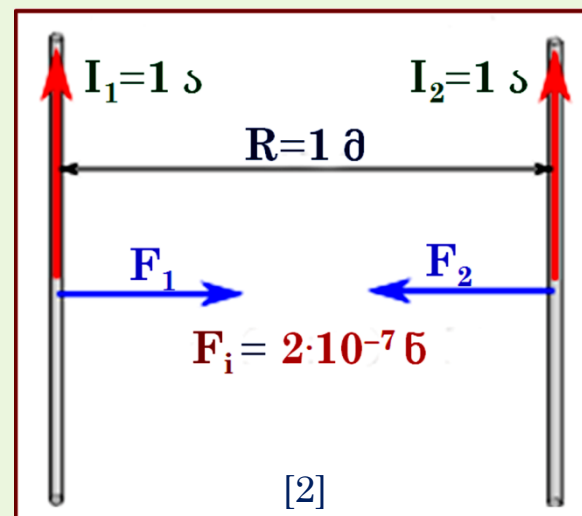
$$\mathbf{F}_{Ai} = \mu_0 I_2 I_1 L / 2\pi R \quad (5.7)$$

▪ (5.7) უდევს საფუძვლად დენის ძალის ერთეულის – ამპერის განმარტებას:

$$F_{Ai}/L = 4\pi 10^{-7} I_1 I_2 / (2\pi R) = 2 \cdot 10^{-7} I_1 I_2 / R$$

$$\{ \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ ჰნ/მ (მაგნიტური მუდმივა); } R = 1\text{მ}; L = 1\text{მ} \}$$

ორ უსასრულოდ გრძელ, წვრილ, პარალელურ, ერთმანეთის-აგან **1 მ**-ით დაშორებულ გამტარებში გამავალი დენის ძალა **1 ამპერის** ტოლია, თუ გამტარის თითოეულ მეტრზე მოქმედებს **$2 \cdot 10^{-7}$ ნ** ძალა [2];





“ისტორია - ეს უზრალოდ სიურპრიზების ნუსხაა . მას შესწევს უნარი მხოლოდ ერთი რამ გვასწავლოს : მოვემზადოთ მორიგი სიურპრიზისთვის.” Kurt Vonnegut



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1918 - 1988

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 7

თემა:

სემესტრი III

მაგნიტური ველის მოქმედება ნივთიერებასა და მუხტებზე

83.

49

1. მაგნიტური ველის მახასიათებელი სიდიდეები და გარემო

052

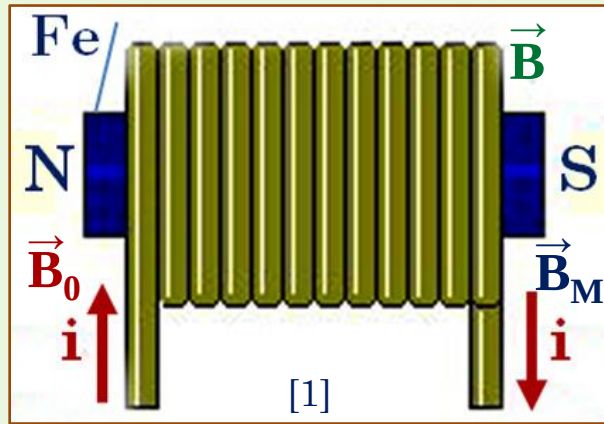
2. ლორენცის ძალა

054

3. ჰოლის ეფექტი

1. მაგნიტური ველის მახასიათებელი სიდიდეები და გარემო

✓ მაგნიტური ველის ძირითადი ძალური მახასიათებელი - $\vec{B}$
 მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი - განსაზღვრავს არსებული
 მაგნიტური ველის სიდიდესა და მიმართულებას;



▪ კოჭას [1] გრაფიკებში გამავალი დენი ქმნის მაგნიტურ ველს “ბაზისური” ინდუქციით B_0 ;

• რკინის (ფერომაგნიტური) გულარი აყალიბებს მაგნიტური ინდუქციის B_M “ნამატს” ($B_M < B_0$ დია- და პარა-, თუმცა $B_M \gg B_0$ ფერომაგნეტიკისთვის);

• მაგნიტური ველის სრული (ჯამური) ინდუქცია B ტოლია: $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_M$ (1.1)

• ფარდობითი მაგნიტური შეღწევადობა
 $\mu = B / B_0$ (1.2)

▪ ნებისმიერი გარემო გავლენას ახდენს ელექტრული და მაგნიტური ველების ძალურ მახასიათებლებზე;

▪ ელექტრული ველი ნებისმიერ იზოტროპულ გარემოში ვაკუუმთან შედარებით ყოველთვის **სუსტდება** { ϵ -ჯერ, ϵ - ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობა};

▪ მაგნიტური ველი გარემოში μ -ჯერ **იძვლება** { μ -ფარდობითი მაგნიტური შეღწევადობა}. მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი (ელექტრული ველის დამახულობისგან განსხვავებით), შეიძლება, ან **გაიზარდოს**, ან **შემცირდეს** ვაკუუმში მის მნიშვნელობასთან შედარებით;

• ველის **მნიშვნელოვანი ზრდისას** ($\mu \gg 1$) გარემოს **ფერომაგნეტიკს** უწოდებენ {Fe-ის მსგავსი თვისებების შესაბამისად};

• ნივთიერება მიკუთვნება **დიამაგნეტიკებს**, თუ მისი $\mu < 1$;

• **პარამაგნეტიკებს** $\mu > 1$ შემთხვევაში;

▪ მაგნიტური ველის “სუფთა” მახასიათებლად - **ნივთიერებათა ზეგავლენის გაუთვალისწინებლად** - გამოიყენება ველის $\vec{H}$ დამაბულობაც

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H} \quad (1.3)$$

• დამაბულობის ერთეულია $[H] = 1\text{ა/მ}$, მაგნიტური მუდმივა $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ჰნ/მ}$;

▪ მაგნიტური ველის დამაბულობაში **ნივთიერების** B_M წვლილს ახასიათებენ $\vec{M}$ **დამაგნიტების** ვექტორით

$$\vec{B}_M = \mu_0 \vec{M} \quad (1.4)$$

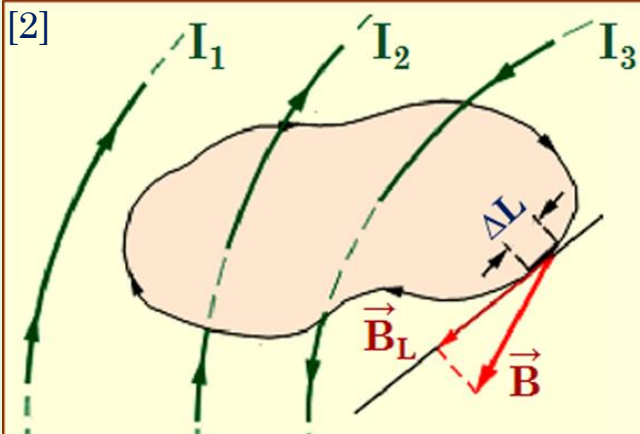
• დამაგნიტების ერთეულია $[M] = [H] = 1\text{ა/მ}$;

▪ **მაგნიტური ველი:**

• იქმნება **დენით** - მუხტების მიმართული მოძრაობით {მუდმივ მაგნიტშიც კი - **ელექტრონების** მოძრაობით ატომურ დონეზე};

• მოქმედებს **დენზე** - მიმართულად მოძრავ მუხტებზე;

• გრიგალურია, ანუ მაგნიტური ინდუქციის წირები **ჩაკეტილი წირებია** {არც დასაწყისი აქვთ და არც დასასრული}. დასკვნა: მაგნიტური **მონოპოლი** {მაგნიტური “მუხტი”} **არ არსებობს**;



▪ რადგან მაგნიტური ველი გრიგალური (არაპოტენციური) ველია, **მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის** **ცირკულაცია** {ელექტრული ველის დამაბულობისგან განსხვავებით} ნებისმიერ ჩაკეტილ წირზე ნულის ტოლი არ არის და ველის წარმომშობი **I** **დენის სიდიდით** განისაზღვრება [2]:

$$\oint (\vec{B} \cdot d\vec{L}) = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i \quad (1.5)$$

✓(1.5) ➔ **სრული დენის კანონი** მაგნიტური ველისთვის ვაკუუმში: მაგნიტური ველის ინდუქციის ცირკულაცია ჩაკეტილი კონტურის გასწვრივ ტოლია მაგნიტური მუდმივას ნამრავლისა იმ დენების ალგებრულ ჯამზე, რომელსაც ეს კონტური მოიცავს;

შესაბამისობა ელექტრული და მაგნიტური ველების მახასიათებელ პარამეტრებს შორის

✓**ელექტრული ველი:**

1.E დამაბულობის ვექტორი - ველის ძირითადი მახასიათებელი, ითვალისწინებს ელექტრული ველის შექმნაში **ყველა მუხტის** (თავისუფალის, ბმულის) წვლილს;

2.D ელექტრული წანაცვლების ვექტორი - აღწერს ველის შექმნაში მხოლოდ **თავისუფალი მუხტების** მონაწილეობას;

3.P პოლარიზაციის ვექტორი - აღწერს ველში მხოლოდ **ბმული მუხტების** წვლილს;

✓**მაგნიტური ველი:**

1.B მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი - ველის ძირითადი მახასიათებელი, ითვალისწინებს როგორც **დენის**, ასევე **მაგნიტური ნივთიერების** წვლილს ველის შექმნაში;

2.H დამაბულობის ვექტორი - ასახავს ვაკუუმში მხოლოდ **დენით** განპირობებულ ველს;

3.M დამაგნიტების ვექტორი - აღწერს **მაგნიტური ნივთიერების** წვლილს ველში;

2. ლორენცის ძალა

- F_A ამპერის ძალა მოქმედებს გამტარზე, როდესაც მასში გადის დენი, ანუ არსებობს დამუხტულ ნაწილაკთა ერთობლიობის მიმართული მოძრაობა;
- მაშასადამე, მაგნიტური ველი **ცალკეულ მიმართულად მოძრავ მუხტზეც** უნდა მოქმედებდეს ძალით და ამ ძალას F_L ლორენცის ძალა ეწოდება;

• F_L ლორენცის ძალის მუხტზე მოქმედების შედეგი $\vec{V}$ და $\vec{B}$ ვექტორების ურთიერთგანლაგებით განისაზღვრება:

1. $\vec{V} \parallel \vec{B}$ მაგნიტური ველი მუხტზე არავითარ გავლენას არ ახდენს [2], რადგან $\varphi=0$ და (2.2) $\Rightarrow F_L=0$ {ისევე, როგორც უძრავი მუხტის შემთხვევაში};

2. $\vec{V} \perp \vec{B}$ ლორენცის ძალა სიდიდით **მაქსიმალურია** და სიჩქარის ვექტორის **მართობია**. მისი (როგორც ცენტრისკენული ძალის) გავლენით მუხტი იმოძრავებს წრეწირზე. ამ წრეწირის R რადიუსი [3] და მუხტის ბრუნვის T პერიოდი F_c და F_L ძალების გატოლებით დგინდება {(2.2)-ში $\varphi=90^\circ$ }:

$$F_c = F_L \Rightarrow mV^2/R = qVB \Rightarrow R = mV/qB \quad (2.5)$$

სიჩქარისა და პერიოდის კავშირი $V=2\pi R/T \Rightarrow (2.5) \Rightarrow$

$$T = 2\pi m/qB \quad (2.6)$$

პერიოდი სიჩქარეზე დამოკიდებული არ არის;

• F_A ამპერის ძალის (5.4.1) ფორმულაში I დენის ძალის (1.1.3) ჩასმით:

$$F_A = IBL \sin \varphi = (qnV_d S) BL \sin \varphi \quad (2.1)$$

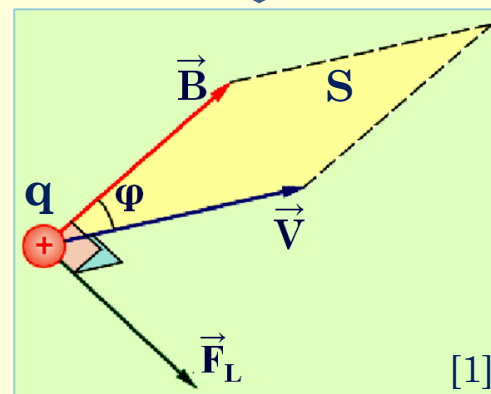
• მუხტების n კონცენტრაციის ნამრავ-ლი გამტარის აქტიური ნაწილის მოცულობაზე ამ ნაწილში მუხტების რაოდენობის ტოლია $N=nSL \Rightarrow (2.1)$

$F_A = NqV_d B \sin \varphi$ და N -ზე გაყოფით

$$F_L = F_A/N = qV_d B \sin \varphi \quad (2.2)$$

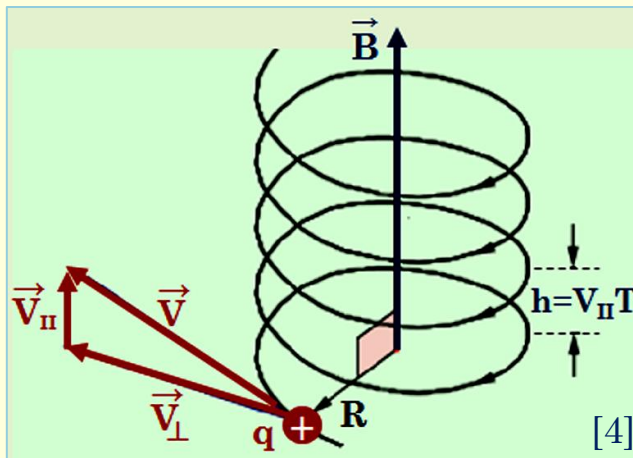
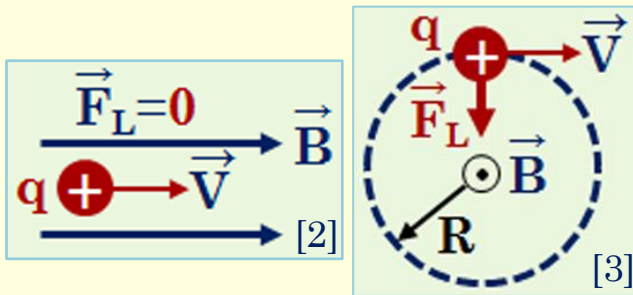
• ვექტორულად: $\vec{F}_L = q[\vec{V}\vec{B}] \quad (2.3)$

• თუ $q \neq \text{const} \Rightarrow d\vec{F}_L = dq[\vec{V}\vec{B}] \quad (2.4)$



• რიცხობრივად F_L პარალელოგრამის S ფართობის ტოლია [1];

• F_L -ის მიმართულება $\{F_A$ -ს მსგავსად} დგინდება მარცხენა ხელის წესით;



3. კუთხე $\vec{V}$ და $\vec{B}$ ვექტორებს შორის ($0 < \phi < 90^\circ$) მახვილია;

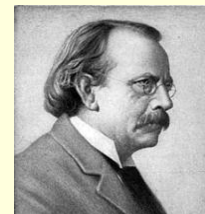
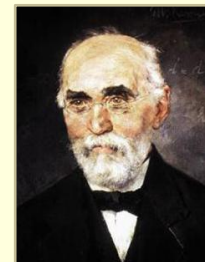
- დამუხტული ნაწილაკი მაგნიტური ველის ზემოქმედებას თავისი სიჩქარის ინდუქციის ვექტორისადმი **მხოლოდ მართობული** $\vec{V}_\perp$ მდგენელის წყალობით განიცდის;
- ლორენცის ძალა ნაწილაკს $\vec{V}_\perp$ სიჩქარით **აბრუნებს**, წრეწირზე, ხოლო ველისგან დამოუკიდებელი სიჩქარის $\vec{V}_\parallel$ მდგენელი უზრუნველყოფს ნაწილაკის **გადატანით** მოძრაობას $\vec{B}$ -ს გასწვრივ;
- ერთიანად, **ეს ორი დამოუკიდებელი მოძრაობა** განსაზღვრავს ნაწილაკის ტრაექტორიის სახეს, რომელიც ხრახნწირს (სპირალს) წარმოადგენს [4];

▪ ლორენცის ძალა, ამოძრავებს რა ნაწილაკს წრეწირზე, ცვლის სიჩქარის ვექტორის **მხოლოდ მიმართულებას**. ის **მუშაობას არ ასრულებს** (ვინაიდან სიჩქარის მართობია) და, ამდენად, **არ ცვლის ნაწილაკის კინეტიკურ ენერგიას** (სიჩქარის სიდიდეს);

▪ ვინაიდან ლორენცის ძალა ცენტრისკენული ძალის როლს ასრულებს $\{(2.5) \ mV^2/R = eVB\}$, შესაძლებელი ხდება მუხტის გადამტანის **კუთრი მუხტის** (მუხტის მასასთან ფარდობის) განსაზღვრა $[e/m, \text{ტომსონი}, 1897]$:

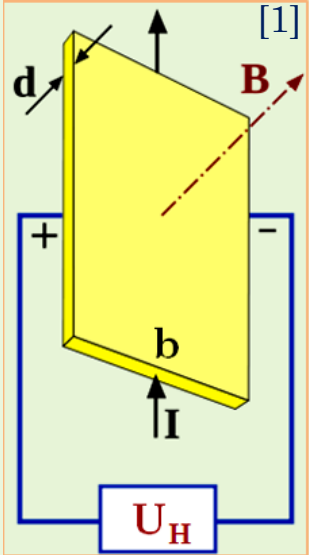
$$e/m = V/RB = 1.7588 \cdot 10^{11} \text{ კ/კგ} \quad (2.7)$$

H.Lorentz
1853-1928

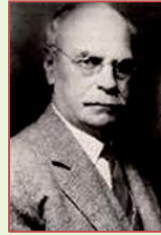


J.J.Thomson
1856-1940

3. ჰოლის ეფექტი



✓ მაგნიტური ველის არაორდინალური გავლენა ელექტრულ დენზე და F_L ლორენცის ძალის განმსაზღვრელი წვლილი მუხტების სივრცული გადანაწილების პროცესში უკავშირდება 1879 წელს ჰოლის მიერ აღმოჩენილ **მაგნეტო-ელექტრულ** მოვლენას (ჰოლის ეფექტი);



E. Hall
1855-1938

■ გამტარი (ნახევრად გამტარი) დენიანი ფირფიტის **დენისადმი მართობული** მიმართულების მაგნიტური ნაკადით განჭოლვისას, გვერდით წახნაგებს შორის ჩნდება [1] პოტენციალთა სხვაობა $\{U_H$ ჰოლის ძაბვა};

■ F_L ლორენცის ძალის გავლენით დენის შესაბამისი მიმართულებიდან ელექტრონების გადახრა, მათი ფირფიტის გვერდით წახნაგზე დაგროვება და ჰოლის U_H ძაბვის ზრდა გაგრძელდება მანამ, სანამ აღძრული **ელექტრული** ველის F_E ძალა არ გააკომპენსირებს F_L -ს:

$$F_L = F_E \Rightarrow eV_d B = eU_H / b \Rightarrow (I / enS) B = U_H / b \Rightarrow U_H = IBb / enbd \Rightarrow U_H = (en)^{-1} IB / d \quad (3.1)$$

$$I = enV_d S \Rightarrow V_d = I / enS$$

■ (3.1)-ში $(en)^{-1} \equiv R_H$ (3.2) ჰოლის მუდმივაა. ე.ი., $R_H = U_H d / IB$ (3.3)
• ცდის საფუძველზე და {(3.2), (3.3)} გამოყენებით, საკმაოდ მაღალი სიზუსტით დგინდება მუხტის გადამტანების {ელექტრონების, ხვრელების} კონცენტრაცია;

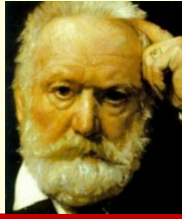
■ R_H -ს და σ ელექტროგამტარობის $\{\sigma = en\mu$ (4.1.4)} გაზომვით შესაძლებელი ხდება მუხტის გადამტანების μ ძვრადობის განსაზღვრა: (4.1.4) $\Rightarrow \mu = \sigma / en = \sigma / R_H$ (3.4)



“ნებისმიერ ადამიანს უკავშირდება სამი ხასიათი: ის, რომელსაც მიაწერენ; ის, რომელსაც თავად მიიწერს; და ბოლოს, ის, რომელიც სინამდვილეში გააჩნია.” Victor Hugo

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1802 - 1885



სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 8

თემა:

სემესტრი III

ელექტრომაგნიტური ინდუქცია

გვ.

056

1.ელექტრომაგნიტური ინდუქცია. ლენცის წესი

058

2.ინდუქციის ე.მ.ძალა. ფარადეის კანონი

060

3.ელექტრომაგნიტური ველი

1. ელექტრომაგნიტური ინდუქცია. ლენცის წესი

✓ ელექტრომაგნიტური მოვლენების შესწავლის პირველ ორ შედეგს {1. დენი ქმნის მაგნიტურ ველს; 2. მაგნიტური ველი მოქმედებს დენზე} მოჰყვა უმნიშვნელოვანესი აღმოჩენა - 3. გარკვეულ პირობებში მაგნიტური ველი ქმნის დენს (ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენა);

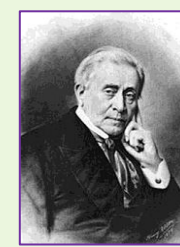
▪ ცდებით {1820 – 1831 წწ., მ. ფარადეი, ჯ. ჰენრი, ჰ. ერსტედი} დადგინდა:

• დენს **მუდმივი** მაგნიტური ველი **ვერ** აღძრავს;

• ჩაკეტილ კონტურში დენი - **ინდუქციური** დენი - აღიძვრება ამ კონტურის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის **ნებისმიერი** გზით **ცვლილებისას**;



M. Faraday
1791-1867
1 ფარადა
(C)



J. Henry
1797-1878
1 ჰენრი
(L)



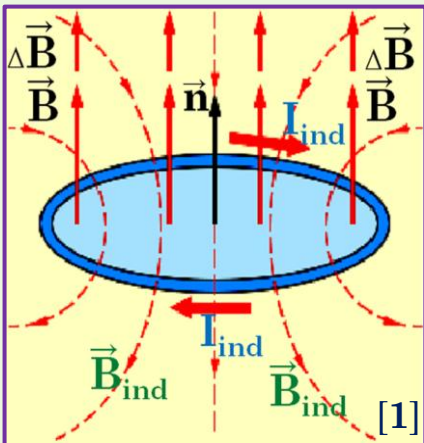
H. Ersted
1777-1851
1 ერსტედი
(H)

▪ მაგნიტური ნაკადის ცვლილებისას კონტურში ინდუქციური დენის გაჩენა ფაქტიურად **მეორადი ეფექტია**. ის არის **ინდუქციის ემ ძალის** აღძვრის გამოძახილი;

▪ **ინდუქციის ემ ძალა** კონტურის გამჭოლი ნაკადის ცვლილებას **ყოველთვის** ახლავს თან, ხოლო ინდუქციური დენი **არ გაჩნდება** თუ, მაგალითად, კონტური **არ არის შევრული**;

• **ღია** კონტურის (გამტარის) გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის **ცვლილება** კონტურის ბოლოებს შორის აღძრავს პოტენციალთა სხვაობას (**ძაბვას**);

• ორივე მოვლენა წრედში **ინდუქციის ემ ძალის** არსებობაზე მეტყველებს, რომელსაც გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის **ცვლილება** განაპირობებს;



▪ ინდუქციის ემ ძალის აღძვრის შესაძლო პროცესებია:

1. კონტური მოძრაობს მაგნიტურ ველში;
2. კონტური უძრავია, მაგრამ მოძრაობს მაგნიტური ველის წყარო;
3. კონტურიც და წყაროც უძრავია, მაგრამ ადგილი აქვს მაგნიტური ველის დროში ცვლილებას;
4. კონტურიც და წყაროც უძრავია, მაგნიტური ველი მუდმივი, მაგრამ რაიმე გზით იცვლება კონტურის ის ფართობი, რომელსაც მაგნიტური ველი განჭოლავს;

▪ აღძრული ინდუქციის ემ ძალა (ინდუქციური დენი) –

- იარსებებს ნაკადის ცვლილების პროცესის მთელი დროის განმავლობაში;
- ემ ძალის პოლარობას, დენის მიმართულებას (ამ მიმართულების შესაძლო ცვლილებას) კი პროცესის მიმდინარეობის ხასიათი განსაზღვრავს;



H. Lenz
1804-1865

▪ არსებული ცდების შედეგებზე დაყრდნობით, ინდუქციური დენის მიმართულებასა და ამ მიმართულების განმსაზღვრელ პირობებზე დასაბუთებული დასკვნა ჰ. ლენცმა ჩამოაყალიბა:

▪ უძრავ კონტურში დროში მზარდი მაგნიტური ველი ისეთი მიმართულების I_{ind} ინდუქციურ დენს ქმნის [1], რომ მისი $\vec{B}_{ind}$ მაგნიტური ველი ეწინააღმდეგება ძირითადი $\vec{B}$ მაგნიტური ველის ზრდას;

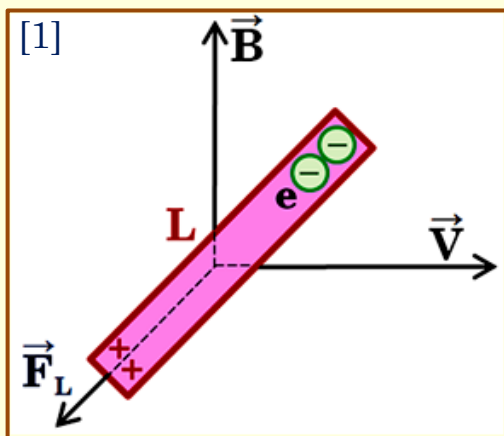
• მაგნიტური ველი კლებადი რომ ყოფილიყო, ინდუქციური დენის მიმართულება საპირისპიროზე შეიცვლებოდა და მისი მაგნიტური ველი ეცდებოდა გაეკომპენსირებინა ძირითადი $\vec{B}$ ველის ამჯერად უკვე შემცირება;

✓ ინდუქციურ დენს ყოველთვის ისეთი მიმართულება აქვს, რომ თავისი მაგნიტური ველით ეწინააღმდეგება იმ მაგნიტური ნაკადის ყოველგვარ ცვლილებას, რომელიც ამ დენის აღძვრის მიზეზია (ლენცის წესი)

2. ინდუქციის ე.მ.ძალა. ფარადეის კანონი

✓ ინდუქციური წარმოშობის ემ ძალის ($\mathcal{E}_i$) აღძვრის მოვლენა აღმოაჩინა, შეისწავლა და კანონის სახით ჩამოაყალიბა მ.ფარადეიმ 1831 წ.;

▪ (2.1) $\Rightarrow [\Phi] = [\mathcal{E}][t] = 1 \text{ ვ}\cdot\text{წმ} = 1 \text{ ვბ; } 1 \text{ ვებერი}$ კონტურით შემოსაზღვრული ფართობის გამჭოლი ისეთი მაგნიტური ინდუქციის ნაკადია, რომლის 1 წამში თანაბარი შემცირებით ნულამდე კონტურში აღიძვრება 1 ვ-ს ტოლი ინდუქციის ემ ძალა;



$$\mathcal{E}_i = - d\Phi/dt \quad (2.1)$$

• კონტურში აღძრული ინდუქციის ემ ძალა კონტურის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის ცვლილების სიჩქარის ტოლია;
 • ინდუცირებული ემ ძალა ისეთი პოლარობისაა, რომ აღძრული (მეორადი) მაგნიტური ნაკადი, ლენცის წესის შესაბამისად, საწყისის ცვლილების საპირისპიროდ მოქმედებს (ამას ასახავს “-“ ნიშანი (2.1)-ში);

• ემ ძალის აღძვრა Φ -ს ცვლილებას ყოველთვის ახლავს თან, დენი კი იარსებებს მხოლოდ შეკრულ კონტურში;

• (2.1)-ით განსაზღვრული ემ ძალა ჩნდება კონტურის თითოეულ ხვიაში. ე.ი., კონტურში N ხვიათა რიცხვისას, სრული ემ ძალა N-ის ჯერადად იზრდება

$$\mathcal{E}_i = - N \Delta\Phi/\Delta t \quad (2.2)$$

▪ ინდუქციის ემმ აღიძვრება მუდმივ მაგნიტურ ველშიც, გამტარის $\vec{V} \perp \vec{B}$ სიჩქარით მოძრაობისას [1]. მიზეზი - გამტართან ერთად მოძრავ ელექტრონებზე $\vec{F}_L = e[\vec{V}\vec{B}]$ (2.3) ლორენცის ძალის მოქმედება, რომელიც L სიგრძის გამტარის ერთ ბოლოზე თავისუფალი ელექტრონების სიჭარბეს, ხოლო მეორეზე - მათ ნაკლებობას განაპირობებს;

▪ამრიგად, გამტარის შიგნით ჩნდება მუხტების განცალკევებით განპირობებული ელექტრული ველი, რომელიც ელექტრონებზე იმოქმედებს **ლორენცის** ძალის **მაკომპენსირებელი** ელექტრული ძალით $\vec{F}_E = e\vec{E}$ (2.4) და გარკვეული დროის შემდეგ გამტარის ბოლოებზე ჭარბი მუხტების რიცხვის **ზრდა** შეწყდება ($\vec{F}_E = -\vec{F}_L$);

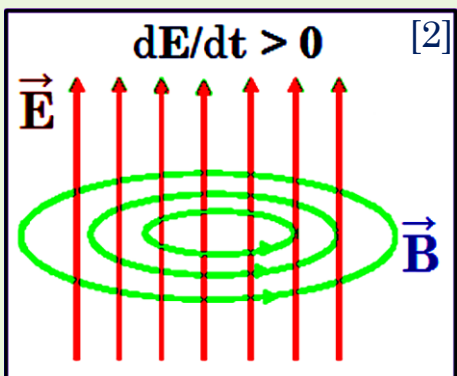
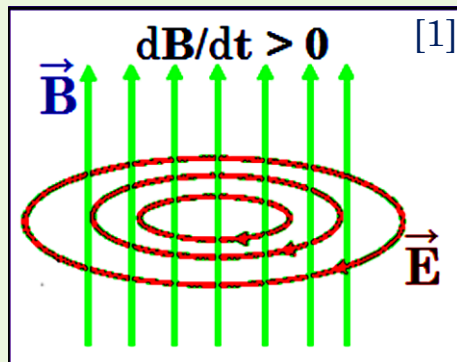
▪ F_L ლორენცის ძალის {როგორც გარე ძალის} ერთეულოვანი მუხტის განცალკევებაზე შესრულებული **მუშაობა**

$$A = F_L L = qVBL \quad (2.5)$$

განსაზღვრავს $\mathcal{E}_i$ ინდუქციის ემ ძალას **მოძრა** გამტარში:

$$\mathcal{E}_i = A / q = VBL \quad (2.6)$$

3. ელექტრომაგნიტური ველი



✓ მაქსველმა 1864 წ. დაასაბუთა:

▪ მაგნიტური ველის ნებისმიერი ცვლილება გარემომცველ სივრცეში აღძრავს გრიგალურ ელექტრულ ველს [1];

• ეს ელექტრული ველი არაა დაკავშირებული ელექტრულ მუხტთან და მის ძალწირებს არც დასაწყისი აქვთ, არც დასასრული;

• ამ ველის ძალწირები, მაგნიტური წირების მსგავსად, შეკრულ წირებს წარმოადგენენ;

• ელექტრული ველის ძალწირები მაგნიტური წირებისადმი მართობ სიბრტყეში თავსდებიან და მოიცავენ მათ. $\vec{E}$ -ს მიმართულება $d\vec{B}/dt$ ვექტორთან მარცხენა ხრახნს ქმნის;

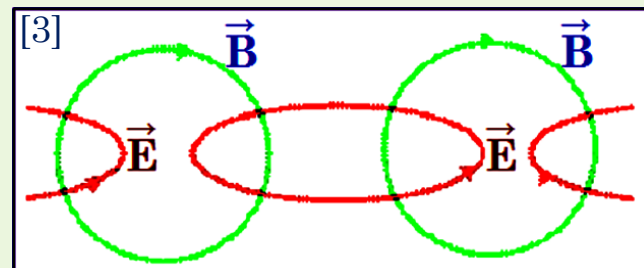
• გრიგალურ ველში ჩაკეტილ წირზე შესრულებული მუშაობა ნულის ტოლი არ არის. ის გარე ძალთა დაძაბულობის ველია;

▪ ელექტრული ველის ნებისმიერი ცვლილება გარემომცველ სივრცეში აღძრავს გრიგალურ მაგნიტურ ველს [2];

• მაგნიტური წირები ელექტრული ველის ძალწირებისადმი მართობ სიბრტყეში თავსდებიან და მოიცავენ მათ. $\vec{B}$ -ს მიმართულება $d\vec{E}/dt$ ვექტორთან მარჯვენა ხრახნს ქმნის;

▪ ცვლადი ელექტრული და მაგნიტური ველები სივრცეში (ვაკუუმის ჩათვლით) თანაარსებული ველებია;

• ერთერთი ველის აღძვრისას, გარემომცველ სივრცეში ჩნდება მათი ურთიერთაღძვრის თანმიმდევრული პროცესი [3];



J. Maxwell
1831-1879

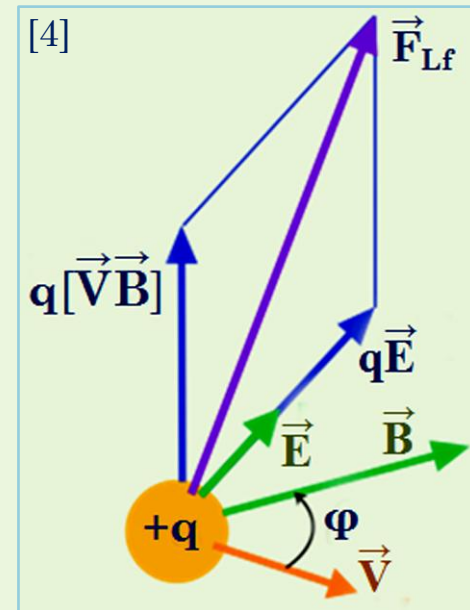
▪ამრიგად, ელექტრომაგნიტური (ემ) ველი **ფუნდამენტური** ფიზიკური ველია, რომელიც ელექტრული და მაგნიტური ველების ურთიერთაღმავრის უნარის მქონე {თანაარსებულ} **ერთობლიობას** წარმოადგენს;

▪ემ ველი **ურთიერთქმედებს** დამუხტულ სხეულებთან, ელექტრულ და მაგნიტურ დიპოლებთან;

▪ურთიერთქმედების აღწერა ეფუძნება **ლორენცის** {სრული} ძალის ცნებას [4]

$$\vec{F}_{Lf} = q(\vec{E} + [\vec{V} \vec{B}]) \quad (3.1)$$

რომელიც ითვალისწინებს, როგორც მაგნიტურ, ასევე ელექტრულ მდგენელებს;



▪ერთი ინერციული სისტემიდან მეორეში გადასვლისას, **თითოეული** ველი (ელექტრულიც და მაგნიტურიც) ახალ სისტემაში “გენეტიკურად” დამოკიდებულია ძველი სისტემის **ორივე** ველზე (როგორც ელექტრულზე, ასევე მაგნიტურზე), რაც ადასტურებს მათი **ერთიანი ემ ველის** შემადგენელ კომპონენტებად აღქმის მართებულობას;

▪ემ ველის კომპონენტების ურთიერთაღმავრის პროცესის **გავრცელებას** სივრცეში ეწოდება **ელექტრომაგნიტური ტალღა**;

▪ნებისმიერი ემ ტალღა (მაგ.: სინათლე) ვრცელდება ვაკუუმში სიჩქარით { $c = 3 \cdot 10^8$ მ/წმ}, რომელიც ბუნებაში **სიჩქარის მაქსიმალურად** შესაძლო სიდიდეა;



“ჩვენ მხოლოდ იმ ბედნიერებას ვფლობთ, რომლის გაგების უნარი გაგვაჩნია.”
Maurice Maeterlinck



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1862 - 1949

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 9

თემა:

სემესტრი III

ინდუქციური მოვლენები

ზზ.

063

1. ელექტრომაგნიტური მოვლენები - ურთიერთინდუქცია

065

2. ტრანსფორმატორი

067

3. თვითინდუქცია და მაგნიტური ველის ენერგია

1. ელექტრომაგნიტური მოვლენები - ურთიერთინდუქცია

✓ ელექტრომაგნიტური მოვლენების არსი:

1. დენი (მუდმივიც და ცვლადიც) ქმნის **მაგნიტურ ველს**;

2. მაგნიტური ველი (მუდმივიც და ცვლადიც) მოქმედებს **დენზე**, ანუ მიმართულად **მოძრავ მუხტზე**;

3. **მხოლოდ ცვლადი** მაგნიტური ველი აღძრავს კონტურში **ემ ძალას**, რომელიც ღია კონტურის ბოლოებზე ქმნის **ძაბვას**, ჩაკეტილ კონტურში კი **დენსაც** (ელექტრომაგნიტური ინდუქცია);

4. ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენა ვლინდება კონტურის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის **ნებისმიერი გზით ცვლილებისას**;

5. ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კერძო გამოვლინებებია:

▪ ურთიერთინდუქცია;

▪ თვითინდუქცია;

▪ $\mathcal{E}_i = -d\Phi/dt$ (1.1) ინდუქციის ემ ძალა აღიძვრება თუ:

1. კონტური მოძრაობს მაგნიტურ ველში;

2. კონტური უძრავია, მაგრამ მოძრაობს მაგნიტური ველის წყარო;

3. კონტურიც და წყაროც უძრავია, მაგრამ ადგილი აქვს მაგნიტური ველის დროში ცვლილებას;

4. კონტურიც და წყაროც უძრავია, მაგნიტური ველი მუდმივი, მაგრამ რაიმე გზით იცვლება კონტურის ის ფართობი, რომელსაც განჭოლავს მაგნიტური ველი;

- აღძრული ინდუქციის **ემ ძალა** (ინდუქციური **დენი**) –
 - იარსებებს ნაკადის ცვლილების {პროცესის} **მთელი დროის** განმავლობაში;
 - მის მიმართულებას (და ამ მიმართულების შესაძლო ცვლილებას) კი, პროცესის **მიმდინარეობის ხასიათი** განსაზღვრავს;

✓ {მოვლენა} **ურთიერთინდუქცია** - ერთ გამტარში ინდუქციის **ემ ძალის** (დენის) **აღძვრა** მეორე გამტარში დენის ძალის ცვლილების, ან გამტარების ურთიერთგანლაგების ცვლილების შედეგად;

▪ ცხადია, **ურთიერთინდუქციის** შედეგად აღძრული დენის მიმართულება ექვემდებარება **ლენცის** წესს: ერთ-ერთ კონტურში დენის ცვლილებას ყოველთვის **ეწინააღმდეგება** მეორე კონტურთან დაკავშირებული პროცესები;



J. Henry
1797-1878
1 ჰენრი (35)

(1.4) $\Rightarrow [L_u] = 1 \text{ ვ} \cdot \text{წმ} / \text{ა} = 1 \text{ ჰნ}$
• 1 ჰენრი ისეთი ორი კონტურის ურთიერთინდუქციის კოეფიციენტია, რომელთაგან ერთ-ერთში დენის ძალის 1 წამში 1 ამპერით შეცვლა მეორეში აღძრავს 1 ვ ურთიერთინდუქციის ემ ძალას;

▪ ფარადეის (1.1) კანონის შესაბამისად, ერთ კონტურში I_0 დენით აღძრული $B_0 \sim I_0$ მაგნიტური ინდუქციის $\Phi_0 \sim B_0$ ნაკადის გარკვეული Φ_u სიდიდე განჭოლავს რა მეორე კონტურს, აღძრავს მასში $\mathcal{E}_{iu}$ **ურთიერთინდუქციის ემძ**-ს

$$\mathcal{E}_{iu} = -d\Phi_u/dt \quad (1.2)$$

▪ Φ_u დამოკიდებულია კონტურების ფორმაზე, ზომაზე, მათ ურთიერთგანლაგებაზე, გარემოს მაგნიტურ თვისებებზე, რომელთა გათვალისწინება ხდება **ამ კონტურების** L_u ურთიერთინდუქციის {პროპორციულობის} კოეფიციენტით

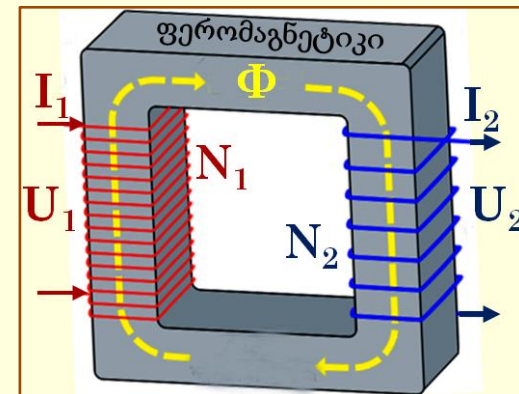
$$\Phi_u = L_u I_0 \quad (1.3) \Rightarrow \mathcal{E}_{iu} = -L_u dI_0/dt \quad (1.4)$$

• ორი კონტურის L_u ურთიერთინდუქციის კოეფიციენტი რიცხობრივად იმ **ემ ძალის** ტოლია, რომელიც აღიძვრება ერთ-ერთ კონტურში, მეორეში **დენის ძალის** 1 წამში 1 ამპერით ცვლილებისას;

2. ტრანსფორმატორი

✓ ელექტროენერგიის გადაცემა-მოხმარებისთვის აუცილებელია **ძაბვის** ფართო საზღვრებში **ცვლილება**, თანაც, ენერგიის მცირე დანაკარგებით; ამ ფუნქციას ასრულებს **ტრანსფორმატორი**;

▪ **ტრანსფორმატორის** მოქმედებას საფუძვლად უდევს ურთი-ერთინდუქციის მოვლენა;



- ტრანსფორმატორი სამი ძირითადი ნაწილისგან შედგება:
- **რკინის გულარი** -
 1. აძლიერებს რომელიმე გრაგნილში შემავალი ცვლადი დენით შექმნილ **მაგნიტურ ველს**;
 2. უზრუნველყოფს ორივე გრაგნილის თანაბარ განჭოლვას ერთი-ანი ცვლადი მაგნიტური ნაკადით;
- **პირველადი გრაგნილი** - ის გრაგნილია, რომელსაც უერთებენ ცვლადი დენის წყაროს და ამ გრაგნილში გამავალი დენის პარამეტრები ექვემდებარება ცვლილებას;
- **მეორადი გრაგნილი** - ის გრაგნილია, რომლიდანაც **სასურველი სიდიდის ძაბვით** მიეწოდება მომხმარებელს დენი;

- გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის ცვლილება ორივე გრაგნილის თითოეულ ხვიაში გააჩენს **ტოლი მნიშვნელობების** $\mathcal{E}_i = -d\Phi/dt$ ემ ძალას;
- გრაგნილში სრული ემძ - მასში N_i ხვიათა რიცხვის პროპორციული იქნება $\mathcal{E}_1 = N_1 \mathcal{E}_i$ და $\mathcal{E}_2 = N_2 \mathcal{E}_i$ ანუ $\mathcal{E}_1 / \mathcal{E}_2 = N_1 / N_2$ (2.1)

▪(2.1) -ს ანალოგიური გამოსახულება სამართლიანია გრაგნილების ბოლოებზე არსებული U_1, U_2 ძაბვებისთვისაც. ამდენად, საბოლოოდ

$$\mathcal{E}_2/\mathcal{E}_1 = N_2/N_1 = U_{a2}/U_{a1} = K \quad (2.2)$$

▪ K -ს ტრანსფორმატორის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი ეწოდება;

• $K > 1$ - ამამდლებელი ტრანსფორმატორი;

• $K < 1$ - დამადაბლებელი ტრანსფორმატორი;

▪“იდეალურ” ტრანსფორმატორში დანაკარგებს ადგილი არა აქვს, ანუ პირველად და მეორად გრაგნილებში სიმძლავრეთა ტოლობაა დაცული

$$P_1 = P_2 \quad \Rightarrow \quad I_1 U_1 = I_2 U_2 \quad (2.3)$$

▪რეალურ ტრანსფორმატორშიც დანაკარგები მეტად მცირეა (1-3 %) და, ამდენად:

$$U_2 / U_1 \approx I_1 / I_2 \quad (2.4)$$

რამდენჯერაც გაიზრდება ძაბვა გრაგნილის ბოლოებზე იმდენჯერვე შემცირდება გრაგნილში დენი;

▪ამ ფარდობის {ტრანსფორმატორის გამოყენების} საფუძველზე გახდა შესაძლებელი მცირე დანაკარგებით ელექტრული ენერგიის დიდ მანძილზე გადაცემა;

3. თვითინდუქცია და მაგნიტური ველის ენერგია

■ ნებისმიერ კონტურში დენის ცვლილები-სას იცვლება ამ დენით შექმნილი მაგნიტური ველი, რომელიც თავისი ცვლადი მაგნიტური ნაკადით განჰოლავს მახლობლად მყოფ კონტურებს და აღძრავს თითოეულში ინდუქციის **ემ ძალას** (ურთიერთინდუქცია);



■ თვითინდუქციის ემ ძალას (ინდუქციის ემ ძალის ანალოგიურად) მაგნიტური ნაკადის ცვლილების სისწრაფე განსაზღვრავს:

$$\mathcal{E}_{is} = -d\Phi/dt \quad (3.1)$$

■ {ვინაიდან} $\Phi \sim B \sim I$ $\Rightarrow \Phi = LI \quad (3.2) \Rightarrow (3.1)$

$$\mathcal{E}_{is} = -LdI/dt \quad (3.3)$$

{“-“ ნიშნავს:} ემ ძალას ისეთი პოლარობა ექნება, რომ **შეეწინააღმდეგოს** დენის ცვლილებას {შესაბამისობაშია ლენცის წესთან};

■ თუმცა, ინდუქციის **ემ ძალა** (და **დენიც**) გაჩნდება არა მარტო სხვა კონტურებში, არამედ იმ კონტურშიც, რომელიც ცვლად მაგნიტურ ნაკადს **ქმნის**, ვინაიდან **ისიც** ხომ აღმოჩნდება საკუთარ ცვლად მაგნიტურ ველში;

■ კონტურში დენის ცვლილების შედეგად **ამავე** კონტურში ინდუქციური დენის აღძვრას **თვითინდუქცია** ეწოდება (1831 წელს აღმოაჩინა ჰენრიმ);

• თვითინდუქციისას პროცესის გამომწვევი დენი გადის **იმავე კონტურში**, რომელიც ინდუქციური დენი აღიძვრება;

■ **L - ინუქციურობა** (თვითინდუქციის კოეფიციენტი) **კონკრეტული კონტურის მახასიათებელი** სიდიდეა { $\mathcal{V}$ მოცულობის, N ხვიათა რიცხვის და μ მაგნიტური შეღწევადობის მქონე გულარიანი კოჭას {სოლენოიდის} $L = \mu_0 \mu N^2 \mathcal{V} \quad (3.4)$ };

■ **L** რიცხობრივად **ტოლია** ემ ძალის, რომელიც **აღიძვრება კოჭაში დენის ძალის 1 ამპერით 1 წამში თანაბარი ცვლილებისას**;

$$[L] = [\mathcal{E}][t] / [I] = 1 \text{ ვ წმ} / \text{ა} = 1 \text{ ჰნ} \text{ (ჰენრი)}$$

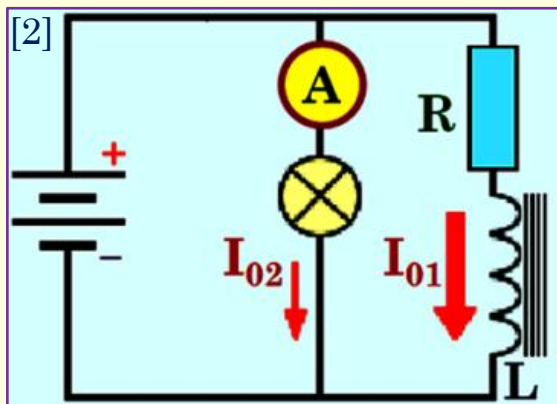
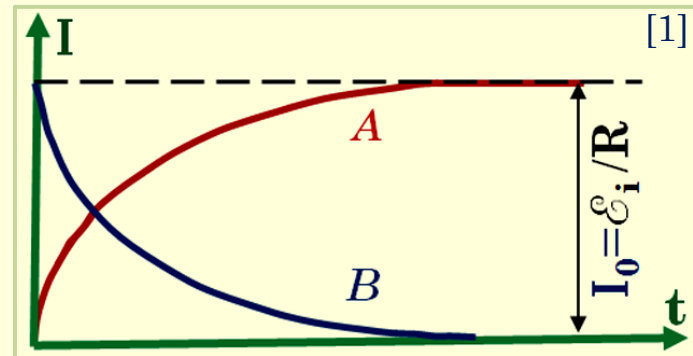
• 1 ჰნ ისეთი კოჭას ინდუქციურობაა, რომელშიც დენის ძალის 1 ამპერით 1 წამში თანაბარი ცვლილებისას 1 ვ **თვითინდუქციის** ემ ძალა აღიძვრება;



J. Henry
1797-1878

▪ თვითინდუქციის მოვლენის გამო, დენის ნებისმიერ ცვლილებას **გარკვეული დრო** [1] სჭირდება {**A**- ჩართვა, **B** - გამორთვა};

▪ რაც მეტია კონტურის **L ინდუქციურობა** და ნაკლებია **R აქტიური წინაღობა**, მით უფრო **გაიწელება დროში** დენის შეცვლის პროცესი, ანუ მით უფრო დიდია წრედის “ელექტრომაგნიტური **ინერტულობა**”;



▪ წრედის გამორთვისას (**B**)

$$I = I_0 e^{-(R/L)t} \quad (3.4)$$

• (3.4) ⚡ დენის ძალის 2-ჯერ შემცირება მოითხოვს დროს $\tau = (L/R) \ln 2$ (3.5)

▪ წრედის ჩართვისას (**A**)

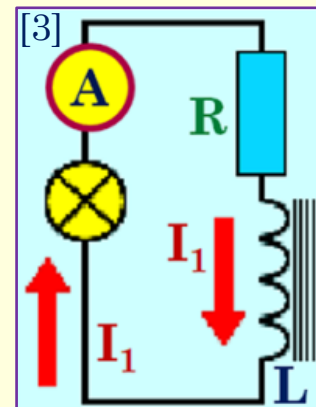
$$I = I_0 [1 - e^{-(R/L)t}] \quad (3.6)$$

▪ დენის წყარო წრედის [2] ორ შტოში განსხვავებული სიდიდის, მაგრამ ერთი მიმართულების დენებს ქმნის;

▪ წრედის განართვისას, ორივე შტოში დენს ინარჩუნებს **L ინდუქციურობის კოჭაში** აღძრული **თვითინდუქციის ემ ძალა**;

▪ შედეგად, ამპერმეტრში გაივლის საწყისი I_{02} -ის **საწინააღმდეგო** მიმართულების I_1 დენი [3];

▪ ასევე, წრედის პარამეტრებიდან გამომდინარე, I_1 დენი სიდიდით შეიძლება I_{02} -ზე მეტ აღმოჩნდეს, რის გამოც **მოიმატებს** ნათურის სიკაშკაშე;



▪ დენის წყაროს გათიშვისას, დენის ნულამდე შემცირება, წრედის “ინერტულობის” გამო, გარკვეულ t დროს მოითხოვს;

▪ ამ დროის განმავლობაში წრედში გაივლის q მუხტი, რომლის სიდიდე დენის ძალის საშუალო მნიშვნელობით განისაზღვრება

$$q = I_a t = (I/2)t \quad (3.7)$$

• q მუხტის გადატანაზე **მუშაობას თვითინდუქციის ემ ძალა** შეასრულებს

$$A = q\mathcal{E}_{is} \quad (3.8)$$

• $\{(3.3), (3.7)\} \Rightarrow (3.8)$ და მუშაობისთვის მივიღებთ

$$A = (I/2)t L(I/t) = (LI^2)/2 \quad (3.9)$$

▪ ვინაიდან დენის წყარო გათიშულია, **მუშაობა სრულდება** კონტურის (კოჭას) **W_M მაგნიტური ენერგიის** ხარჯზე და მისი სიდიდე:

$$W_M = A = (LI^2)/2 \quad (3.10)$$

• კოჭას **მაგნიტური ველის ენერგია** მისი **ინდუქციურობის** და **დენის კვადრატის ნამრავლის ნახევრის ტოლია**;

▪ მაგნიტური ველის ენერგია შეიძლება ჩაიწეროს ველის {და არა გამტარის (3.10)} მახასიათებელი სიდიდეებითაც;

• სოლენოიდში მაგნიტური ველი ერთგვაროვანია და

$$W_M = 0.5\mathcal{V}B^2/\mu_0\mu = 0.5\mathcal{V}\mu_0\mu H^2 = 0.5BH\mathcal{V} \quad (3.11)$$

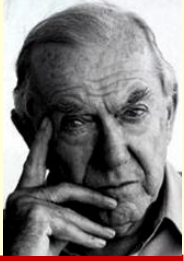
აქ: $\mathcal{V}$ - სოლენოიდის მოცულობაა, H - მაგნიტური ველის დაძაბულობა;

• მაგნიტური {ერთგვაროვანი} ველის ენერგიის სიმკვრივე

$$w_M = W_M/\mathcal{V} = 0.5BH \quad (3.12)$$



“ხანგრძლივი ცხოვრება სულაც არ ნიშნავს მრავალწლიან ცხოვრებას.”
Henry Greene



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1904 - 1991

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 10

თემა:

სემესტრი III

მაგნეტიზმის ბუნება

ზვ.

071

1. მაგნეტიკები

072

2. დამაგნიტების ფიზიკური საფუძვლები

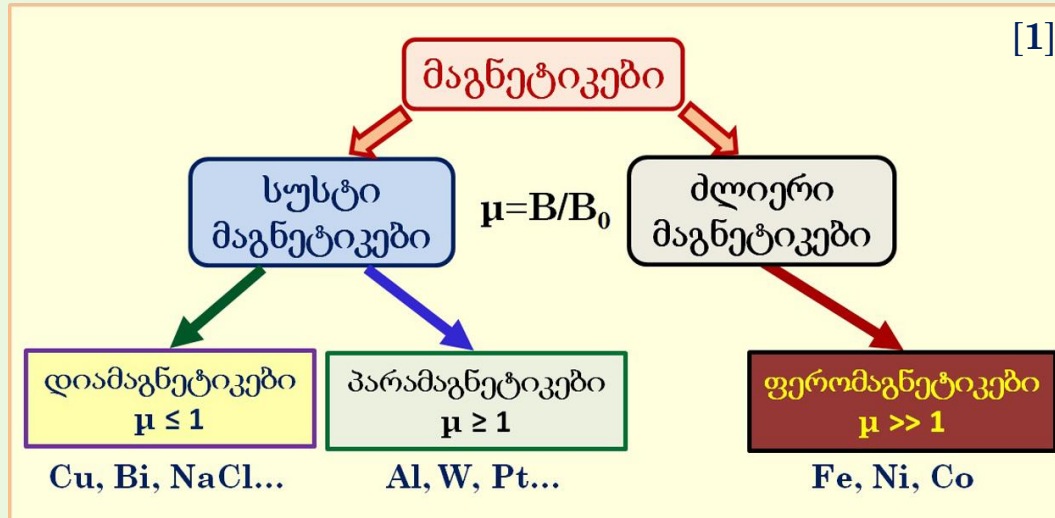
073

3. დამაგნიტების ვექტორი და მაგნიტური ამთვისებლობა

1.მაგნეტიკები

✓ ყველა ნივთიერება გარეშე $\vec{B}_0$ მაგნიტურ ველში მაგნიტდება (ქმნის საკუთარ B_M მაგნიტურ ველს). ნივთიერების მაგნიტური თვისებების მიხედვით, სრული (ჯამური) ველის სიდიდე $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_M$ (1.1) აღმოჩნდება ველის საწყის მნიშვნელობაზე რამდენადმე: ან ნაკლები, ან მეტად, ან მნიშვნელოვნად მეტი (6.1.2);

■ ნივთიერების B_M წვლილს მაგნიტურ ველში აღწერენ (6.1.4) M **დამაგნიტების** ვექტორით $\vec{B}_M = \mu_0 \vec{M}$ (1.2), მაგნიტური მუდმივა $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ ჰნ/მ;



■ ნებისმიერი გარეშე გავლენას ახდენს მაგნიტური ველის სიდიდეზე. ამცირებს ან აძლიერებს მას ვაკუუმთან შედარებით μ -ჯერ { μ - ფარდობითი მაგნიტური შეღწევადობა (6.1.2)}:

$$\mu = B / B_0 \quad (1.3)$$

■ მაგნიტურ ველზე ზეგავლენის მიხედვით ანსხვავებენ სუსტ { $\mu \leq 1$; $\mu \geq 1$ } და ძლიერ { $\mu \gg 1$ } მაგნიტურ ნივთიერებებს (მაგნეტიკებს) [1]:

■ სუსტად ამცირებენ - **დიამაგნეტიკები** $\mu < 1$;

■ სუსტად აძლიერებენ - **პარამაგნეტიკები** $\mu > 1$;

■ ძლიერად ზრდიან - **ფერომაგნეტიკები** $\mu \gg 1$;

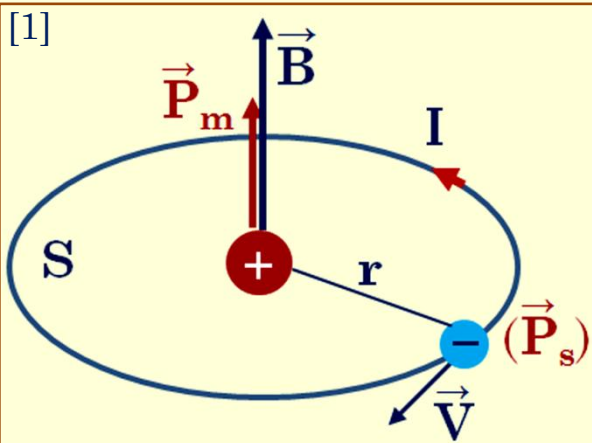
■ ასევე გამოყოფენ - **ანტიფერომაგნეტიკებს** {Dy, Eu, Sm, Tm...} და **ფერი-მაგნეტიკებს** {შედარებით რთული შენაერთები, მაგალითად: $CsNiF_3$, $TiNiF_3$, $CsFeF_3$...};

2. დამაგნიტების ფიზიკური საფუძვლები

- ✓ სხეულთა მაგნიტური თვისებების **ბუნებაზე** ჩამოყალიბებული ხედვა 1820 წ. წარმოადგინა ამპერმა და მაგნიტური მახასიათებლები ატომის შიგნით ელემენტარული **ელექტრული დენების** არსებობას {ცირკულაციას} დაუკავშირა;
- ნივთიერების მაგნიტური თვისებები განისაზღვრება ელექტრონების (ატომების) მაგნიტური მახასიათებლებით;



A. Ampere
1775-1836



- ელექტრონის ორბიტაზე ბრუნვა ეკვივალენტურია ჩაკეტილი კონტურისა, რომელშიც გადის ორბიტალური I დენი და განაპირობებს **ორბიტალურ** მაგნიტურ მომენტს

$$\vec{P}_m = IS = 0.5eVr \quad (2.1)$$

- ელექტრონს გააჩნია **საკუთარი** (სპინური) მაგნიტური მომენტი

$$\vec{P}_s = e\hbar/2m_e \quad (2.2)$$

- ამდენად, ელექტრონის **სრული** მაგნიტური მომენტი

$$\vec{P}_{em} = \vec{P}_m + \vec{P}_s \quad (2.3)$$

- ატომის მაგნიტური მომენტი $\vec{P}_{Am}$ ტოლია მისი ყველა Z {რიგობრივი ნომერი} ელექტრონის $\vec{P}_{em}$ სრული მაგნიტური მომენტების ჯამისა

$$\vec{P}_{Am} = \sum_{i=1}^Z (\vec{P}_{em})_i \quad (2.4)$$

- მაგნიტურ მახასიათებლებში პროტონების წვლილი ელექტრონულზე $\sim 10^3$ -ჯერ **მცირეა** და, როგორც წესი, არ განიხილება;

3. დამაგნიტების ვექტორი და მაგნიტური ამთვისებლობა

- ატომის $\vec{P}_{Am}$ მაგნიტური მომენტის საფუძველზე შეიძლება განისაზღვროს ნივთიერების დამაგნიტების ვექტორი $\vec{M}$;
- დამაგნიტების ვექტორს უწოდებენ მაგნეტიკის ერთეულ მოცულობაში მოთავსებული ატომების {ან მოლეკულების} მაგნიტური მომენტების ვექტორულ ჯამს;

$$\vec{M} = (\Delta V)^{-1} \sum_{i=1}^N (\vec{P}_{Am})_i \quad (3.1)$$

- ერთგვაროვანი და იზოტროპული მაგნეტიკისას ყველა N ატომს ერთნაირი $\vec{P}_{Am}$ მაგნიტური მომენტი აქვს და (3.1) ➡

$$\vec{M} = (N/V) \vec{P}_{Am} = n \vec{P}_{Am} \quad (3.2)$$

n - ატომების კონცენტრაცია;

- $\mu = B/B_0$ ფარდობითი მაგნიტური შეღწევადობა მაგნიტურ ველში კონკრეტული ნივთიერების დამაგნიტების უნარის მახასიათებელი χ_m მაგნიტური ამთვისებლობით განისაზღვრება

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (3.3)$$

- მართლაც, {(1.1), (6.1.3), (1.2), (3.3)} საფუძველზე:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_M = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (\vec{H} + \chi_m \vec{H}) = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} = \mu_0 \mu \vec{H} = \mu \vec{B}_0 \quad (3.4)$$

- ამრიგად,

$$\mu = (1 + \chi_m) \quad (3.5)$$



“ქვეყნად არაფერი იწვევს იმდენ მსჯელობას, რამდენსაც უაზრობა.”
Umberto Eco

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რაზე ?!

1932-2016



სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 11

თემა:

სემესტრი III

მაგნიტური ნივთიერებები

ზვ.

075

1.დიამაგნეტიკი და პარამაგნეტიკი

077

2.ფერომაგნეტიკი

1. დიამაგნეტიკი და პარამაგნეტიკი

✓ **დიამაგნეტიკები** - ნივთიერებებია, რომელთა ატომების მაგნიტური მომენტები $\vec{P}_{am} = 0$ {ანუ, დიამაგნეტიკის **ჯამური მაგნიტური მომენტი** $\sum_i (\vec{P}_{Am})_i = 0$ }, თუ მათზე **არ მოქმედებს** გარეშე მაგნიტური ველი;

• $B_0 = 0$ პირობებში **დიამაგნეტიკი დამაგნიტებული არ არის**;

▪ თუ $B_0 \neq 0$, ლორენცის ძალის გავლენით ელექტრონის ორბიტალური მოძრაობა იცვლება და ჩნდება ატომის მაგნიტური მომენტი და სხეულის დამაგნიტება;

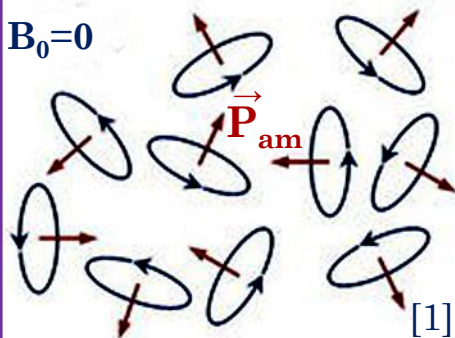
• **ინდუცირებული მაგნიტური მომენტი** {ე.ი., $\vec{B}_M$ -იც} $\vec{B}_0$ -ს **საპირისპიროდ**აა მიმართული, ანუ ამცირებს ჯამურ $\vec{B}$ -ს და ის $\vec{B}_0$ -ზე **ნაკლები** აღმოჩნდება;

• ამდენად, დიამაგნეტიკების $\chi_m < 0$ { $\chi_m \approx -10^{-6}$ და $\mu < 1$ }, ის პრაქტიკულად არ არის დამოკიდებული არც B_0 ველის სიდიდეზე და არც T ტემპერატურაზე;

• **დიამაგნიტური** თვისებები ყველა ნივთიერებას ახასიათებს. თუმცა, უმეტეს შემთხვევაში, ის **არ ვლინდება**, ვინაიდან დიამაგნეტიზმს **ფარავს** უფრო ძლიერი პარამაგნეტიზმი;

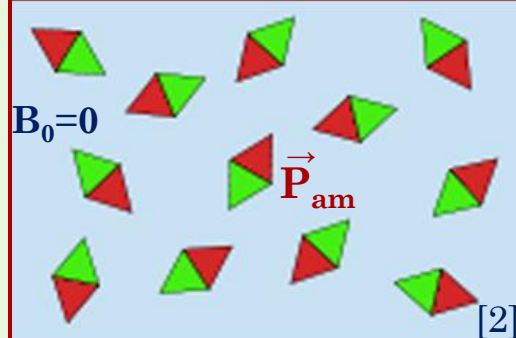
✓ **პარამაგნეტიკები** - ნივთიერებებია, რომელთა მაგნიტური ამთვისებლობა **დადებითია** $\chi_m > 0$, თუმცა დიამაგნეტიკების მსგავსად, ისიც მცირეა { $\chi_m \sim 10^{-5}$ და $\mu > 1$ };

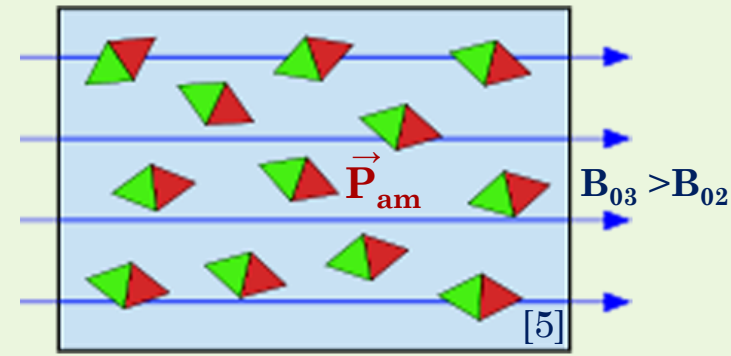
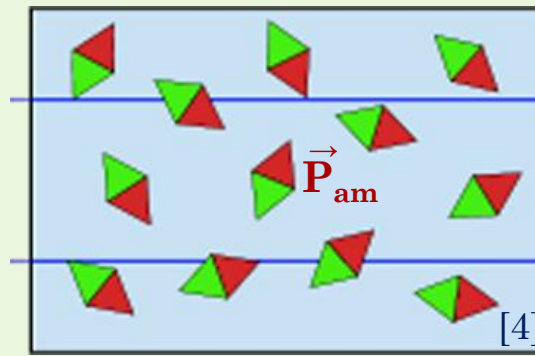
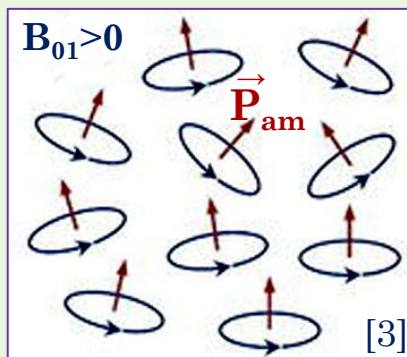
$B_0 = 0$



▪ თითოეული ატომის მაგნიტური მომენტი $\vec{P}_{am} \neq 0$, მაგრამ მომენტების ქაოსური ორიენტაციის გამო {[1],[2]}, გარეშე მაგნიტური ველის ნულოვანი მნიშვნელობისას პარამაგნეტიკის **ჯამური მაგნიტური მომენტი ნულის** ტოლია $\sum_i (\vec{P}_{Am})_i = 0$;

$B_0 = 0$





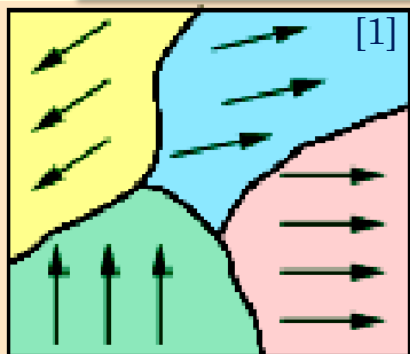
- რაც უფრო ძლიერია გარეშე მაგნიტური ველი მით უფრო მნიშვნელოვანია მისი **მაორიენტირებელი ზეგავლენა** ატომთა მაგნიტურ მომენტებზე [3],[4],[5];
- გარეშე ველი ცდილობს ატომების ისეთნაირად შემოზრუნებას, რომ მათი ველი, ანუ მათი მაგნიტური მომენტები განლაგდნენ გარეშე ველის **პარალელურად** [5];
- ნივთიერების $\vec{M}$ დამაგნიტების ვექტორი მაგნიტური ველის თანამიმართული აღმოჩნდება $\vec{M} \parallel \vec{H}$, რაც განაპირობებს **დადებით მაგნიტურ ამთვისებლობას** $\chi_m > 0$ და, ე.ი., $\mu > 1$;
- გარეშე ველის მიმართ მაგნიტური მომენტების **სრულყოფილ ორიენტაციას** აფერხებს ატომების სითბური მოძრაობა. შედეგად, პარამაგნეტიკის მაგნიტური χ_m ამთვისებლობა ავლენს **ტემპერატურაზე დამოკიდებულებას** და ტემპერატურის ზრდისას μ **მცირდება**

$$\chi_m = C/T \quad (1.1)$$

{კიური-ვეისის კანონი პარამაგნეტიკებისთვის}, C - კიურის მუდმივა;

- **ფერომაგნეტიკი** და **ანტიფერომაგნეტიკი** შეიძლება გადავიდეს **პარამაგნიტურ** მდგომარეობაში, თუ მათი T ტემპერატურა **გადააჭარბებს**, შესაბამისად, T_c კიურის, ან T_N ნეელის ტემპერატურებს;

2. ფერომაგნეტიკი



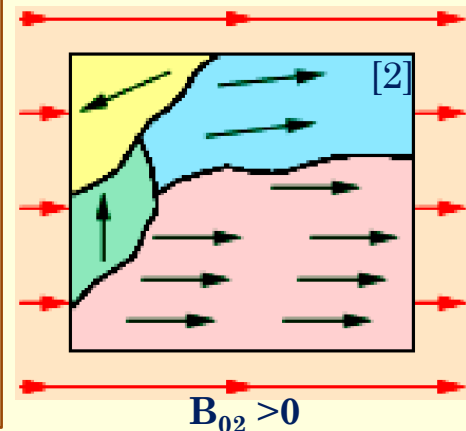
$B_{01} = 0$

✓ **ფერომაგნეტიკები** - მაგნეტიკები, რომლებიც მაგნიტური მომენტების შორი {ფერომაგნიტური} მოწესრიგების წყალობით ინარჩუნებენ მაღალ $\mu = 10^2 - 10^5$ მაგნიტურ მახასიათებლებს გარეშე მაგნიტური ველის არსებობისგან დამოუკიდებლად, ანუ **ინარჩუნებენ დამაგნიტებას** მაშინაც, როდესაც $B_0 = 0$;

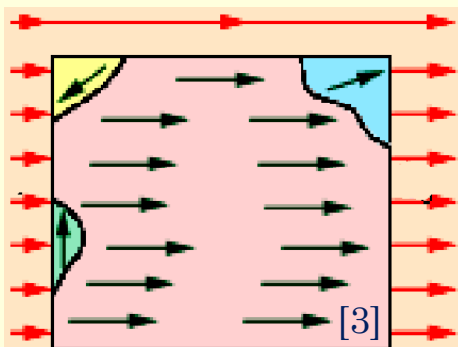
▪ {გარკვეულ} მაღალ ტემპერატურაზე (კიურის წერტილი T_c) **კარგავენ** ფერომაგნიტურ თვისებებს ($T_c, K =$: Co-1400; Fe-1040; Ni-630);

▪ ფერომაგნეტიზმი დასაბამს იღებს იმ მცირე ზომის $\{10^{-4} - 10^{-5} \text{ მ}\}$ სკონტანურად გაჩენილი დამაგნიტებული არეებისაგან {დომენებისგან} კრისტალში, რომლებშიც მაგნიტური მომენტები მკაცრად მოწესრიგებულია $\{B_0 = 0$ პირობებშიც} ატომებს შორის არსებული ურთიერთქმედების წყალობით [1];

▪ ამავე დროს, სხვადასხვა დომენში მოწესრიგება, ზოგადად, ორიენტირებად განსხვავებულია და დომენები არ არიან **ერთმანეთის მიმართ მოწესრიგებული** [1],[2];



$B_{02} > 0$



$B_{03} > B_{02}$

▪ გარეშე მაგნიტური ველის ზემოქმედებით {[2],[3]}, იწყება დომენების მაგნიტური მომენტების გადაწყობა. თუმცა, ატომების მდგომარეობის ცვლილების გარეშე, მხოლოდ ელექტრონების მოძრაობის ცვლილების გამო;

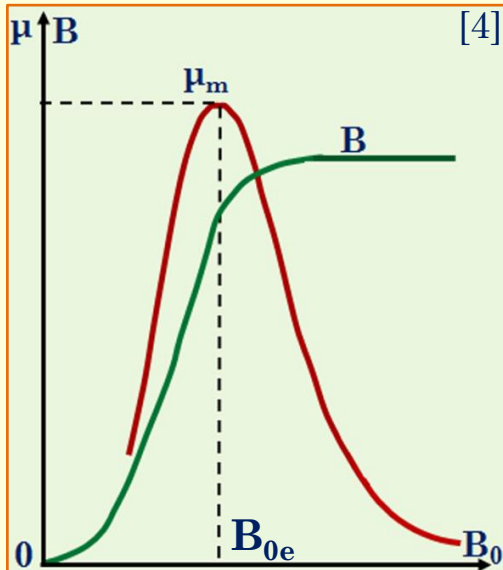
▪ გარეშე ველის მიმართ უკეთესად ორიენტირებული დომენების ზომები **იზრდება** ნაკლები სიზუსტით ორიენტირებული დომენების შთანთქმის ხარჯზე;

▪ დომენების გამსხვილებას თან ახლავს მაგნიტური ველის **ზრდაც**;

▪ სითბური მოძრაობა, ცხადია, არ უწყობს ხელს დომენების ორიენტაციას და χ_m მაგნიტური ამთვისებლობა მცირდება T-ს ზრდისას **კიური-ვეისის** კანონის {ფერომაგნეტიკებისთვის} შესაბამისად

$$\chi_m = C/(T - T_c) \quad (2.1)$$

• C - **კიურის** მუდმივაა, **T_c** **კიურის** ტემპერატურა {ამ ტემპერატურაზე **კარგავს** ფერომაგნეტიკი მახასიათებელ თვისებებს და ხდება **პარამაგნეტიკი**};



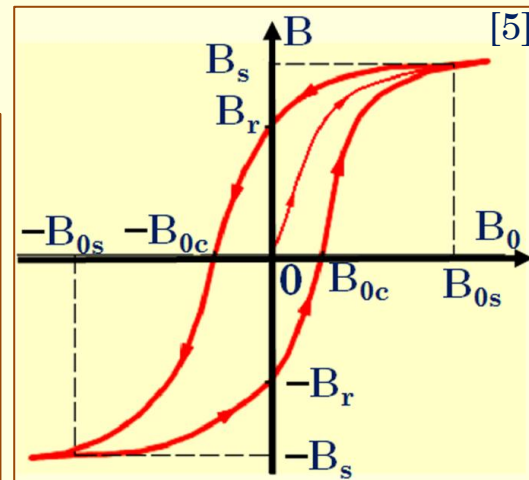
▪ **B₀** გარეშე მაგნიტური ველის სიდიდეზე მკვეთრად გამოხატულ დამოკიდებულებას ავლენენ ფერომაგნეტიკის μ მაგნიტური შეღწევადობა და **B** **სრული** {ჯამური} მაგნიტური ველის ინდუქცია [4];
 ▪ თავდაპირველად, **B** **ასწრებს** ზრდაში **B₀**-ს და, შედეგად, $\mu = B/B_0$ **იზრდება**. გარეშე ველის **B_{0e}** მნიშვნელობისას ფერომაგნეტიკის **B** ველის სიდიდე გადის **ნაჯერობაზე** [4], რის გამოც μ **მცირდება** და 1-კენ მიისწრაფვის;

▪ μ -ს ცვალებადობა, განსაზღვრას [5] ფერომაგნეტიკის **დამაგნიტების** პროცესში **ჰისტერეზის** გამოვლინებას;

▪ **დამაგნიტება-განმაგნიტების** წარმართვა ავლენს **კონკრეტული** ნიმუშისთვის ამ **პროცესის** მის **ისტორიაზე დამოკიდებულებას** (ჰისტერეზისის მარყუჟი) [5];

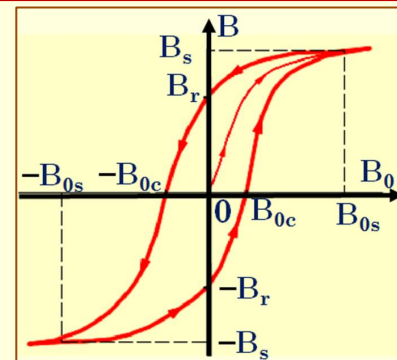
▪ გარეშე ველის **B_{0s}** მნიშვნელობაზე ნიმუშის ველის ინდუქცია **B_s** **ნაჯერ** სიდიდეზე გადის და **B₀**-ს **ნულამდე** შემცირებისას გამოავლენს **ნარჩენ დამაგნიტებას** {**B = B_r**};

▪ **ნარჩენი დამაგნიტების** ნულამდე შესამცირებლად საჭირო ხდება **საპირისპირო მიმართულების -B_{0c}** სიდიდის გარეშე ველი;

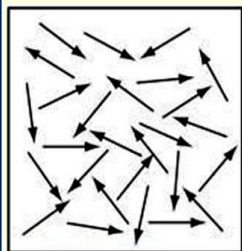


▪ უარყოფითი ნაჯერობის $-B_s$ სიდიდე მიიღწევა $-B_{0s}$ გარეშე ველისას;

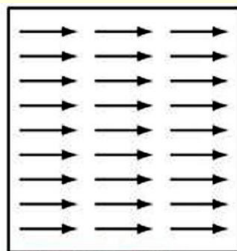
▪ გარეშე ველის კვლავ $\{-B_{0s}, B_{0s}\}$ საზღვრებში ცვლილებისას, თანმიმდევრულად გამოვლინდება ფერომაგნეტიკის ველის $\{-B_s, -B_r, 0, B_r, B_s\}$ მნიშვნელობანი და შეიკვრება ჰისტერეზისის მარყუჯი;



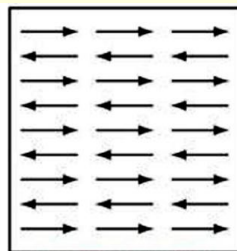
✓ ფერომაგნეტიზმის ბუნებაზე წარმოდგენილი მოსაზრებები ფაქტობრივად ხსნიან **ანტიფერომაგნეტიზმს** (მაგნიტური მომენტები მთლიანად **აბათილებენ** ერთმანეთს) და **ფერიმაგნეტიზმს** (მაგნიტური მომენტების **ნაწილობრივი კომპენსაცია**) [6];



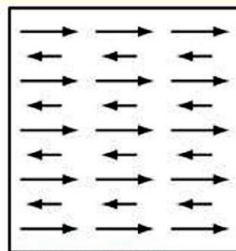
პარა-



ფერო-



ანტიფერო-



ფერი-

მაგნეტიკები

[6]

▪ **ფერიმაგნეტიკი** - განსხვავებული სიდიდის მაგნიტური მომენტების ერთობლიობა. მომენტები ეკუთვნის კრისტალის 2 შემადგენელ ქვემესერს {მაგ.: Fe^{2+} და Fe^{3+} };

▪ **ანტიფერომაგნიტური** მდგომარეობის არსებობა უკავშირდება გარკვეულ ტემპერატურულ ინტერვალს $T_1 < T < T_N$;

• თუ $T > T_N$ (T_N - **ნეელის** ტემპერატურა) **ანტიფერომაგნეტიკი** გადადის პარამაგნეტიკში;

• თუ $T < T_1$ (T_1 - მახასიათებელი ტემპერატურა) **ანტიფერომაგნეტიკი** გადადის ფერომაგნიტურ მდგომარეობაში;

• მაგ.: $85\text{K} < \text{Dy} < 174\text{K}$; $219\text{K} < \text{Tb} < 230\text{K}$;

• პრაქტიკული მნიშვნელობით გამოირჩევიან **ნ/გ** ფერიმაგნეტიკები - **ფერიტები** {მაგ.: $(\text{Me})\text{Fe}_2\text{O}_4$. აქ Me : Ni^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} , ..., ან - Gd^{3+} , Dy^{3+} , Sm^{3+} , ...};



“ყველა დანაკლისს შორის დრო - ყველაზე აუნაზღაურებელია,
შეუძლებელია მისი უკან შემობრუნება.” Henry VIII



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1491 - 1547

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 12

თემა:

სემესტრი III

ცვლადი დენის მახასიათებლები

ზვ.

081

1. ცვლადი დენის ფიზიკური საფუძვლები

084

2. სიმძლავრე. ემ ძალის და დენის ეფექტური მნიშვნელობა

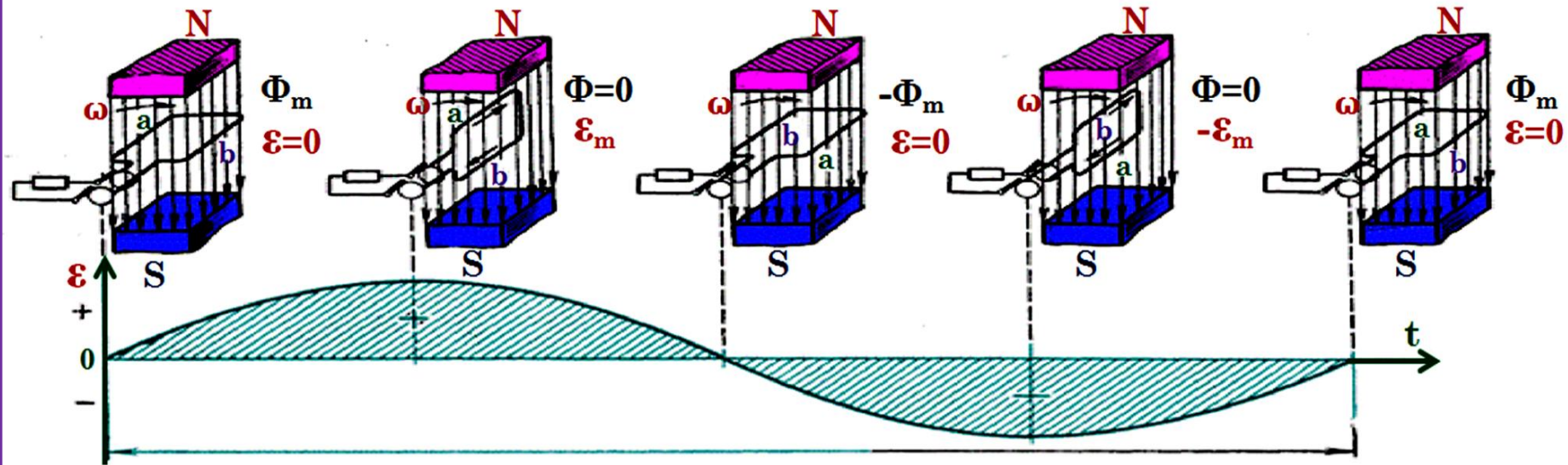
1. ცვლადი დენის ფიზიკური საფუძვლები

✓ **ცვლადი დენი** - იძულებითი ელექტრომაგნიტური რხევების კონკრეტული სახეა:

- ინდუქციის ემპ აღიძვრება {ცვლადი დენის გენერატორში} კონტურის გამჭოლი Φ მაგნიტური ნაკადის ჰარმონიული ცვლილებისას

$$\Phi = \Phi_0 \cos \omega t = BS \cos \omega t = \Phi_0 \cos 2\pi \nu t \quad (1.1)$$

- Φ , Φ_0 - მაგნიტური ნაკადის **მყისი** და **ამპლიტუდური** მნიშვნელობანია;



- ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონის (8.2.1) შესაბამისად, კონტურის თითოეულ ხვიაში აღიძვრება ინდუქციის ემ ძალა

$$\mathbf{e} = -d\Phi/dt = BS\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_0 \sin \omega t \quad (1.2)$$

$$\mathcal{E}_0 = BS\omega \quad (1.3)$$

მაქსიმალური სიდიდით;

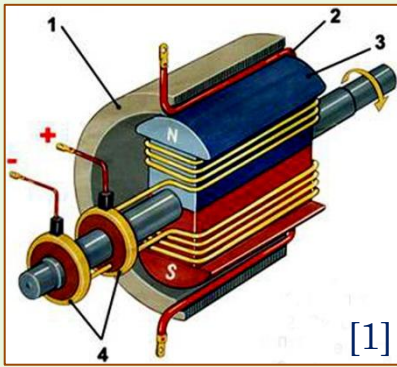
- ანალოგიური, ჰარმონიული კანონით აღიწერება ცვლადი დენის ძაბვა და დენის ძალა:

$$\mathbf{u} = U_0 \sin \omega t = U_0 \sin 2\pi \nu t \quad (1.4)$$

$$\mathbf{i} = \mathbf{e}/R = (\mathcal{E}_0/R) \sin \omega t = I_0 \sin 2\pi \nu t \quad (1.5)$$

- $\nu = \omega/2\pi$ - ცვლადი დენის **სიხშირე** {ქვეყნების აბსოლუტურ უმრავლესობაში $\nu = 50$ ჰც, აშშ $\nu = 60$ ჰც};

➤ ცვლადი დენის უპირატესობანი {მუდმივ დენთან შედარებით}:



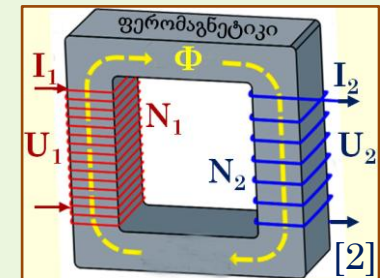
1. გამომუშავების თვალსაზრისით. საწარმოო სიმძლავრის (მილიონობით კვტ) ცვლადი დენის მიღების სიმარტივე - ორი {ძირითადი} ნაწილისგან შემდგარი გენერატორით [1];

• სტატორის (უძრავი ნაწილი - 1) გულარზე დახვეულ ხვიებში ჩნდება ცვლადი ინდუქციის ემპ, რადგან მას განჭოლავს სწრაფად მბრუნავი როტორით (ელექტრომაგნიტი - 3) შექმნილი **ცვლადი მაგნიტური ნაკადი**;

• ამ ტიპის გენერატორში ელექტრული ენერგიის გამომუშავება ხდება მექანიკური ენერგიის ხარჯზე;

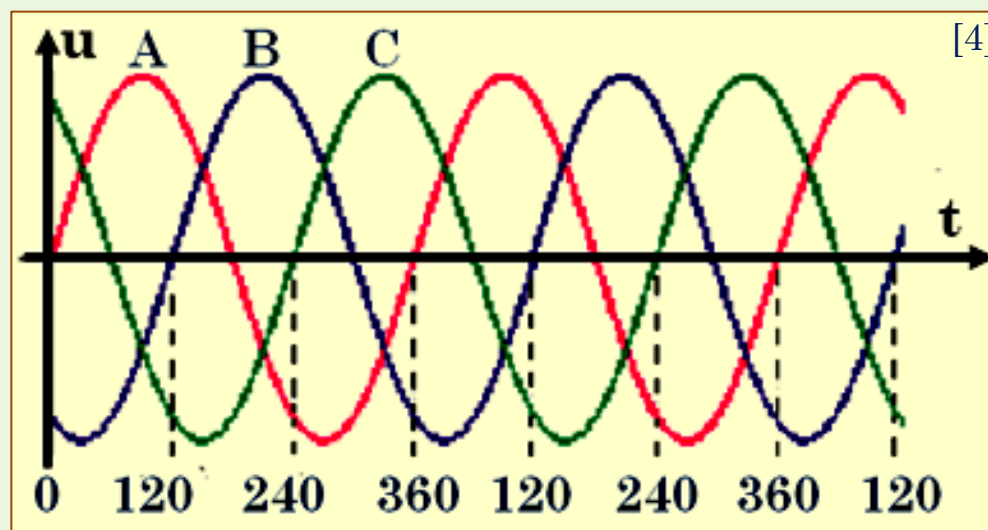
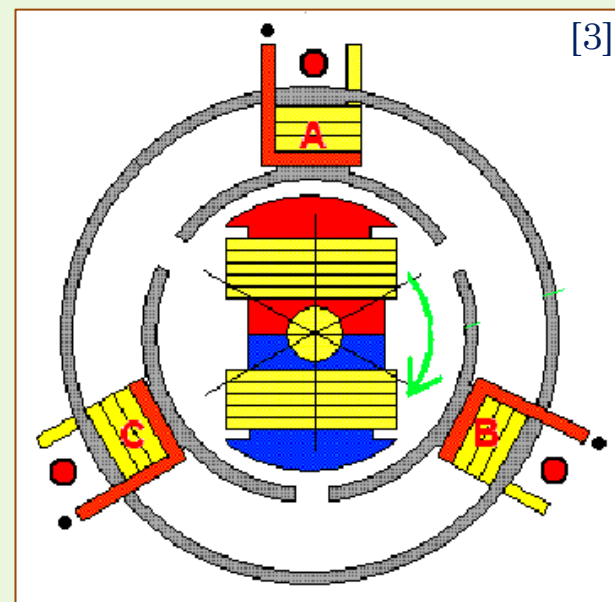
2. გადაცემის თვალსაზრისით. ელექტრული ენერგიის გადამცემი ხაზები პრაქტიკულად მსოფლიოს ყველა დასახლებულ ადგილამდეა გაჭიმული. ამ ვეებერთელა სიგრძის სადენებში დანაკარგები მისაღებ ფარგლებში რჩება მხოლოდ იმიტომ, რომ **ცვლადი** დენისას ხდება შესაძლებელი {ტრანსფორმატორით [2]} ძაბვის მრავალჯერადი გაზრდით მივალწიოთ დენის ძალის მნიშვნელოვან **შემცირებას** და ელექტრული ენერგიის დანაკარგების (უსარგებლოდ გამოყოფილი სითბოს $Q = I^2 R t$) მინიმუმამდე დაყვანა;

3. ტრანსფორმაციის შესაძლებლობით და გამოყენების თვალსაზრისით. ტრანსფორმატორის გამოყენებით, ცვლადი დენი მარტივად, პრაქტიკულად შეუზღუდავ ფარგლებში და **უდანაკარგოდ**, ექვემდებარება ძაბვის და, ე.ი., დენის ძალის ცვლილებას. საწარმოო თუ ყოფითი მოხმარების მოწყობილობების აბსოლუტური უმრავლესობა ცვლად დენზე მუშაობს;

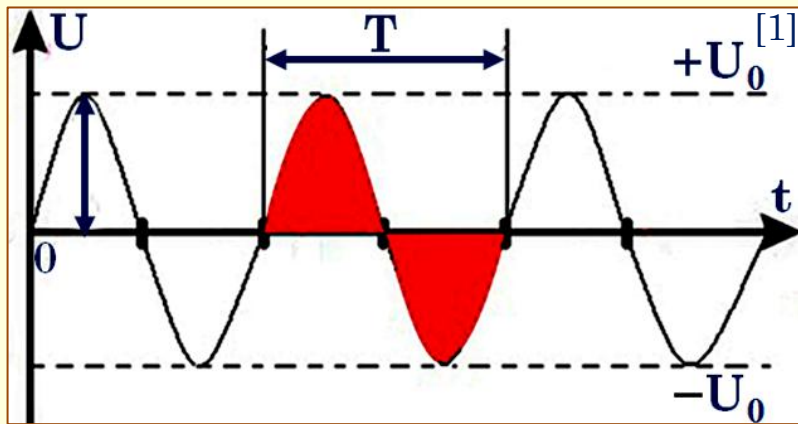


4.სამფაზა დენის ეფექტიანობით. მსოფლიოში ძირითადად გამოიყენება {გენერაცია, გადაცემა, საწარმოო მოხმარება} ელექტრომომარაგების ეფექტიანი სამფაზა სისტემა {გამოიგონა ნ.ტესლამ};

▪ერთი (საერთო) წყაროთი [3] იქმნება ერთნაირი სიხშირის ემ ძალა $2\pi/3$ ფაზური კუთხით {დროში წანაცვლებით} [4];



2. სიმძლავრე. ემ ძალის და დენის ეფექტური მნიშვნელობა



▪ ცვლადი დენის მახასიათებელი მყისი (დროზე დამოკიდებული) მნიშვნელობების მაგივრად **მოსახერხებელია** გამოყენებული იყოს დროზე **დამოუკიდებელი** სიდიდეები;

▪ ეს სპეციფიურ მიდგომას მოითხოვს, ვინაიდან პერიოდის განმავლობაში e , u , i სიდიდეთა **საშუალო** მნიშვნელობანი **ნულს** უტოლდება {**ნიშნის ცვლილების** გამო, მყისი მნიშვნელობების ალგებრული ჯამი **ნულია**} [1];

▪ **დროისგან** დამოუკიდებელი სიდიდეების შემოტანა ეყრდნობა წრედში არსებულ R წინაღობაზე გამოყოფილი p მყისი **სიმძლავრის** გამოსახულებას. $p > 0$ ყოველთვის, რადგან დენის მყისი მნიშვნელობის **კვადრატით** განისაზღვრება;

▪ სიმძლავრის მყისი სიდიდე $p = i^2 R = I_0^2 R \sin^2 \omega t$ (2.1)

საშუალო მნიშვნელობა კი: $\overline{p} = \overline{i^2 R} = I_0^2 R \overline{\sin^2 \omega t}$ (2.2)

• ფუნქციებს შორის არსებულ კავშირზე

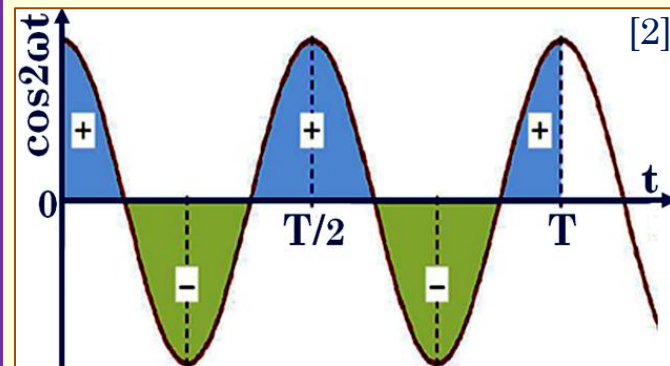
$$\sin^2 \omega t = (1 - \cos 2\omega t) / 2 \quad (2.3)$$

და $\overline{\cos 2\omega t} = 0$ საშუალო მნიშვნელობაზე [2] დაყრდნობით

$$\overline{\sin^2 \omega t} = (1 - \overline{\cos 2\omega t}) / 2 = (1 - 0) / 2 = 1/2 \quad (2.4)$$

▪ ამრიგად, სიმძლავრის საშუალო მნიშვნელობა

$$\overline{p} = (1/2) I_0^2 R \quad (2.5)$$



▪(2.5) გამოსახულების საფუძველზე განსაზღვრულია ცვლადი დენის დროზე დამოუკიდებელი მახასიათებელი სიდიდეები:

✓ კვადრატულ ფესვს ცვლადი დენის დენის ძალის {ძაბვის, ემ ძალის} კვადრატის საშუალო მნიშვნელობიდან $I_a = (\overline{i^2})^{1/2}$ დენის ძალის $\{U_a = (\overline{u^2})^{1/2}$ ძაბვის, $E_a = (\overline{e^2})^{1/2}$ ემ ძალის} ეფექტური (მოქმედი) მნიშვნელობა ეწოდება;

▪ანუ, {(1.2), (1.4), (1.5)} ➔

$$I_a = I_0 / \sqrt{2} \quad (2.6) \quad U_a = U_0 / \sqrt{2} \quad (2.7) \quad E_a = E_0 / \sqrt{2} \quad (2.8)$$

▪ცვლადი დენის სიმძლავრე, მუშაობა, გამოყოფილი სითბო ზუსტად უტოლდება მუდმივი დენის ამავე მახასიათებლებს, თუ ცვლადი დენის ჩასაწერად გამოიყენება მისი მოქმედი მნიშვნელობანი;

•(2.6) =>(2.5) ➔ საშუალო სიმძლავრე $\overline{p} = I_a^2 R \quad (2.7)$

✓ ხმარებაშია ცვლადი დენის ძაბვის შემდეგი მოქმედი და ამპლიტუდური მნიშვნელობანი:

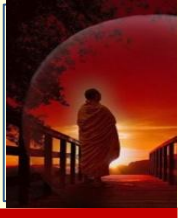
• ჩვენი ქსელი - $U_a = 220$ ვ, $U_0 = 310$ ვ;

• ევროპა - $U_a = 240$ ვ, $U_0 = 340$ ვ;

• აშშ და კანადა - $U_a = 120$ ვ, $U_0 = 170$ ვ;



“ჭკვიან ადამიანებს ყოველთვის ესმით, რომ მოსმენილიდან მხოლოდ ნახევარს თუ დაეჯერება. მაგრამ, მხოლოდ მთლად ჭკვიანებმა იციან, თუ რომელია **ეს ნახევარი**.”
აღმოსავლური სიბრძნე



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 13

თემა:

სემესტრი III

ცვლადი დენის წრედები

ზვ.

087

1. აქტიური და რეაქტიული წინაღობის წრედები

090

2. ცვლადი დენის სრული წრედი

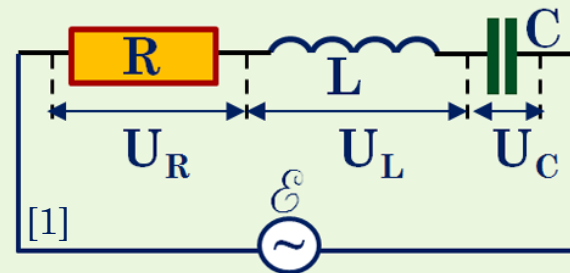
091

3. რეზონანსი {ცვლადი ძაბვის წრედებში}

1. აქტიური და რეაქტიული წინაღობის წრედები

✓ ელექტრული წრედი სამი {დენის წყაროს გარდა} ძირითადი ელემენტის ერთობლიობაა: 1. რეზისტორი - R აქტიური წინაღობა; 2. კონდენსატორი - C ელექტროტევადობა; 3. კოჭა - L ინდუქციურობა [1];

▪ მუდმივი დენის წყაროსთან RLC წრედის მიერთებისას, პროცესების მიმდინარეობა მეტად შეზღუდულია და კონდენსატორის დამუხტვის დროით განისაზღვრება;



▪ ცვლადი დენის წყაროს სინუსოიდალური $e = E_0 \sin \omega t$ ემ ძალისას დენიც იქნება სინუსოიდალური $i = I_0 \sin(\omega t + \varphi)$, მაგრამ მათ შორის φ ფაზათა შესაძლო სხვაობა დამოკიდებული იქნება ჩართული RLC ელემენტების შემადგენლობასა [1] და მათ რიცხოვრივ მახასიათებლებზე;

▪ ფაზათა სხვაობის გამო, ზოგადად, ძაბვათა ეფექტური თუ ამპლიტუდური მნიშვნელობების ჯამი არ გაუტოლდება ემ ძალის შესაბამის მნიშვნელობებს

$$E \neq U_R + U_L + U_C \quad (1.1) \quad E_0 \neq U_{R0} + U_{L0} + U_{C0} \quad (1.2)$$

ტოლობა დაცული იქნება მხოლოდ მყისი სიდიდეებისთვის

$$e = u_R + u_L + u_C \quad (1.3)$$

▪ დენსა და ძაბვას შორის გარკვეული ფაზათა სხვაობის არსებობის შესაძლებლობა უკავშირდება წრედის შემადგენელ ელემენტებზე განსხვავებულ ენერგეტიკულ გარდაქმნებს. ანუ, თითოეული ეს ელემენტი $\{R, L, C\}$ “თავისებურად ეწინააღმდეგება” ცვლადი დენის აღძვრასა და “ფუნქციონირებას”;

ელექტრული წინაღობა

აქტიური {R}

რეაქტიული {X}

ტევადური {X_C}

ინდუქციური {X_L}

▪ **აქტიურია** ის ელექტრული წინაღობა, რომელიც **განაპირობებს** ელექტრული ენერგიის სხვა სახის ენერგიად (სითბური, მექანიკური, ქიმიური, გამოსხივება) **შეუქცევად** გარდაქმნას (ელექტრულ წრედს ენერგია აკლდება);

▪ **რეაქტიულია** ის ელექტრული წინაღობა, რომელიც **განპირობებულია** ელექტრული დენის მიერ ელექტრული ველისთვის ან მაგნიტური ველისთვის ენერგიის **შექცევადი** მიწოდებით (და უკან დაბრუნებით);
• რეაქტიული წინაღობა სისტემის ენერგიას არ ამცირებს;

▪ წრედში [1] **მხოლოდ** R აქტიური წინაღობის ჩართვა {R>0, C=0, L=0}:

• არ აღძრავს ფაზათა სხვაობას {φ=0} ცვლად ძაბვასა $u=U_0 \sin \omega t$ და დენს $i=I_0 \sin \omega t$ შორის [2];

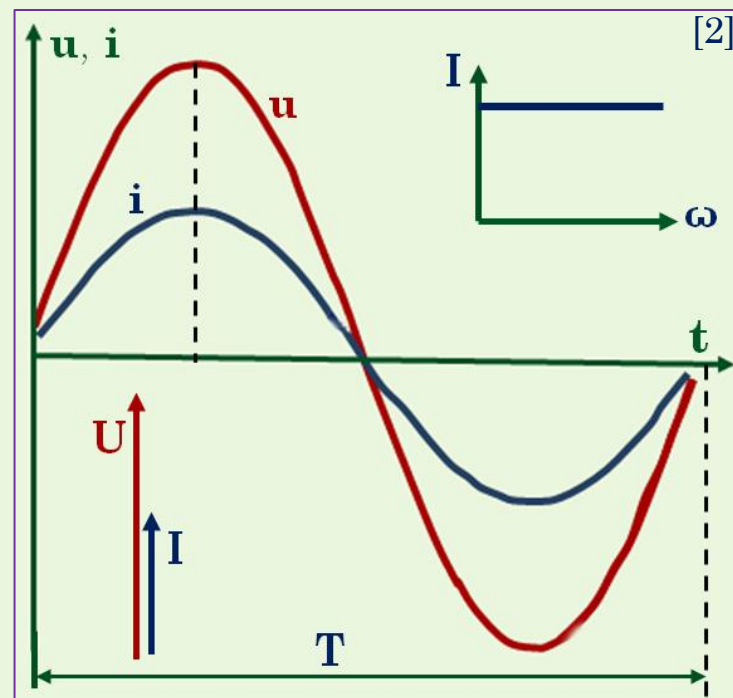
• დენის სიდიდე სიხშირეზე დამოკიდებული [2] არ არის;

• დენის ამპლიტუდური და მოქმედი მნიშვნელობები ომის კანონით განისაზღვრებიან

$$\{I_0 = U_0/R = \mathcal{E}_0/R \quad I_a = U_a/R = \mathcal{E}_a/R\} \quad (1.4)$$

• ვინაიდან φ=0, მარტივად დგინდება სიმძლავრეც

$$\overline{P} = I_a^2 R = U_a^2 / R \quad (1.5)$$



▪ წრედში [1] **მხოლოდ** კონდენსატორის - X_C ტევადური წინაღობის - ჩართვა $\{C>0, R=0, L=0\}$:

• განაპირობებს ფაზათა სხვაობას $\{T/4, \varphi=\pi/2\}$ ცვლად ძაბვასა $u=U_0 \sin \omega t$ და დენს $i=I_0 \cos \omega t$ შორის [3].
 დენი წინ უსწრებს ძაბვას $\pi/2$ -ით;

• ცვლადი დენი კონდენსატორში ასახავს, ცვლადი ემ ძალის $e=\mathcal{E}_0 \sin \omega t$ გავლენით, კონდენსატორის პერიოდული გადამუხტვის პროცესს

$$i = I_0 \cos \omega t = (\mathcal{E}_0 / X_C) \cos \omega t = I_0 \sin(\omega t + \pi/2) \quad (1.6)$$

• დენის სიდიდე მატულობს სიხშირის ზრდასთან ერთად [3], რაც ნიშნავს, რომ რეაქტიული ტევადური წინაღობა **სიხშირის უკუპროპორციულია**

$$X_C = 1/\omega C \quad (1.7) \Rightarrow (1.6) \rightarrow$$

$$i = \omega C \mathcal{E}_0 \cos \omega t \quad (1.8)$$

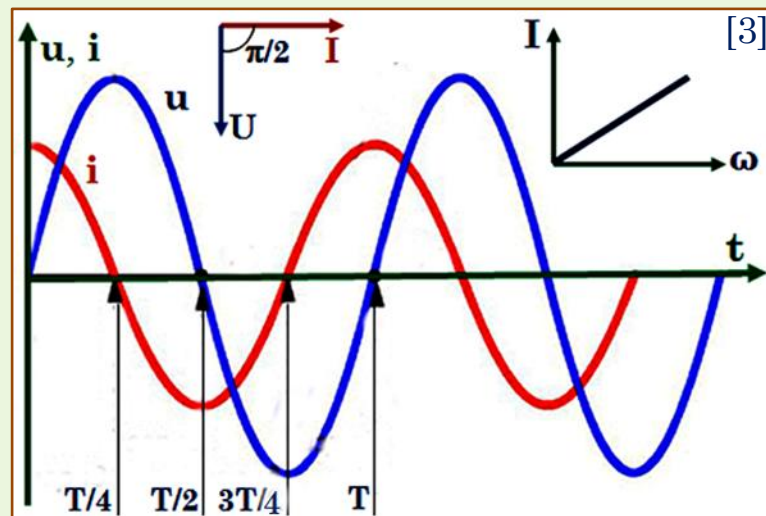
$$I_a = U_a / X_C = \omega C U_a \quad (1.9)$$

• (1.9)-ის ანალოგიურად, ომის კანონის ჩაწერა მყისი სიდიდეებისთვის **არაკორექტულია** i -სა და u -ს შორის არსებული ფაზათა სხვაობის გამო;

▪ როდესაც წრედი არ შეიცავს R აქტიურ წინაღობას, წრედის სიმძლავრეს ახასიათებენ **P რეაქტიული სიმძლავრით**, რომლის სიდიდე φ ფაზათა სხვაობაზეა დამოკიდებული

$$P = U_a I_a \sin \varphi \quad (1.10)$$

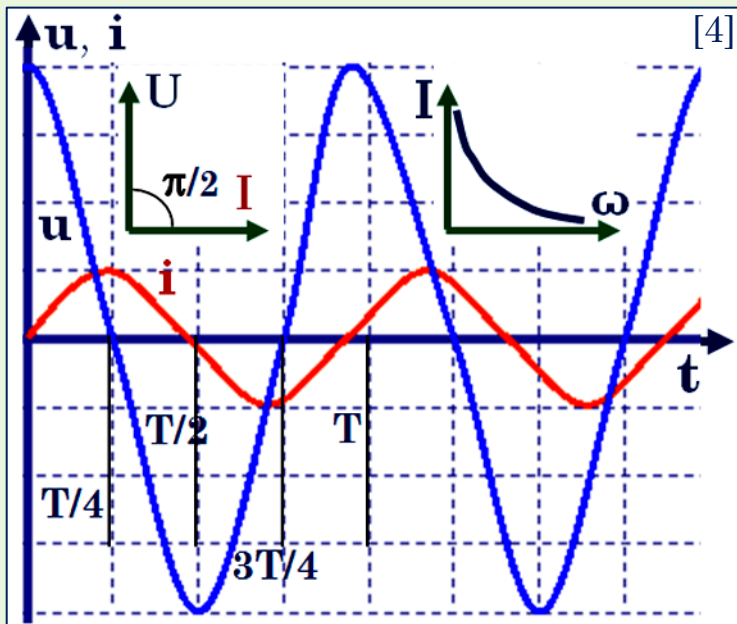
• თუ დენი **ჩამორჩება** ძაბვას ფაზათა სხვაობა დადებითად ითვლება, თუ **უსწრებს** - უარყოფითად;



▪ ω და C სიდიდეებთან X_C ტევადური წინაღობის **უკუპროპორციული** (1.7) კავშირი ფიზიკურად ცხადია:

• დიდია C - მეტია მუხტის დაგროვების უნარი და წრედი მუხტის მოძრაობას **ნაკლებად ეწინააღმდეგება**;

• დიდია ω - მცირეა მუხტის დაგროვების დრო. ამდენად, **ნაკლები** მუხტი ასწრებს დაგროვებას და **მცირეა** წრედში მუხტების გადაადგილებაზე მათი **ზეგავლენა**;



•მარტივ ფიზიკურ ახსნას ექვემდებარება ω და L სიდიდეებთან χ_L ინდუქციური წინაღობის პირდაპირპროპორციული კავშირი (1.15):

•დიდია L - (1.11) $\Rightarrow$ **ნაკლებია** dt დროში di დენის ცვლილება და ე.ი. **ნაკლებია** i **დენიც** ნებისმიერ t მომენტში {მოცემულ სიხშირეზე};

•დიდია ω - კოჭაში **სწრაფად** იცვლება მაგნიტური ნაკადი. მაგრამ, უნდა სრულდებოდეს $|e_L| = |e|$, ე.ი. დენი უნდა **შემცირდეს**;

•წრედში [1] მხოლოდ კოჭას - χ_L ინდუქციური წინაღობის ჩართვა $\{L>0, R=0, C=0\}$:

•განაპირობებს ფაზათა სხვაობას $\{T/4, \varphi=\pi/2\}$ ცვლად ძაბვასა u და დენს i შორის (დენი **ჩამორჩება** ძაბვას $\pi/2$ -ით) [4];

•ცვლადი დენი კოჭაში აღძრავს **თვითინდუქციის ემძალას** $e_L = -L di/dt$ (1.11), რომელიც აკომპენსირებს დენის წყაროს ემძალას $e = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$ (1.12);

$$\text{ანუ,} \quad \mathcal{E}_0 \sin \omega t - L di/dt = 0 \quad (1.13) \quad \Rightarrow$$

$$i = (\mathcal{E}_0/L) \cdot \int \sin \omega t \cdot dt = -(\mathcal{E}_0/\omega L) \cos \omega t \quad (1.14)$$

•დენის სიდიდე მცირდება სიხშირის ზრდასთან ერთად [4], რაც ნიშნავს, რომ რეაქტიული ინდუქციური წინაღობა **სიხშირის პირდაპირპროპორციულია**

$$\chi_L = \omega L \quad (1.15) \Rightarrow (1.14) \quad \Rightarrow$$

$$i = -(\mathcal{E}_0/\chi_L) \cos \omega t = -I_0 \cos \omega t = -I_0 \sin(\omega t - \pi/2) \quad (1.16)$$

•ომის კანონი მოქმედი მნიშვნელობებისთვის

$$I_a = U_a / \chi_L = U_a / \omega L \quad (1.17)$$

2. ცვლადი დენის სრული წრედი

✓ რეალური ცვლადი დენის წრედები ზუმეტესად შედგებიან მიმდევრობით შეერთებული სამივე RLC {აქტიური, ინდუქციური, ტევადური წინაღობები} ელემენტისგან [1];

▪ RLC წრედში **დენის სიდიდე** განისაზღვრება მისი სრული {ექვივალენტური} **Z** წინააღობით - **იმპედანსით**, ხოლო **φ** **ფაზათა სხვაობა** მეტად მგრძნობიარეა **L ინდუქციურობისა** და **C ტევადობის** მიმართ;

▪ **Z** **იმპედანსში** და **φ** **ფაზათა სხვაობაში**, ცხადია, წვლილი შეაქვს, როგორც **χ** რეაქტიულ, ასევე **R** აქტიურ წინააღობებს:

$$Z = (R^2 + \chi^2)^{1/2} = [R^2 + (\chi_L - \chi_C)^2]^{1/2} = [R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2]^{1/2} \quad (2.1)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \chi/R = (\chi_L - \chi_C)/R = (\omega L - 1/\omega C)/R \quad (2.2)$$

▪ დენი:

$$I_0 = \mathcal{E}_0/Z \quad (2.3) \quad I_a = \mathcal{E}_a/Z \quad (2.4) \quad i = (\mathcal{E}_0/Z) \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.5)$$

$$(2.2) \Rightarrow \varphi = \operatorname{arctg}(\chi/R) \quad (2.6) \Rightarrow (2.5) \Rightarrow$$

$$i = (\mathcal{E}_0/Z) \sin[\omega t - \operatorname{arctg}(\chi/R)] \quad (2.7)$$

▪ მუდმივი დენის წრედში **სიმძლავრე** $P = I\mathcal{E}$. ცვლადი ძაბვის სრულ წრედში **საშუალო სიმძლავრის** ფორმულაში გათვალისწინებულია ფაზათა შესაძლო სხვაობაც $\bar{P} = I_a \mathcal{E}_a \cos \varphi \quad (2.8);$

▪ **სიმძლავრის კოეფიციენტის** $\cos \varphi = R/Z \quad (2.9)$ სიდიდე წრედის კონკრეტულ ელემენტებზეა დამოკიდებული:

• **R** აქტიური წინააღობისთვის $\cos \varphi = 1$;

• ნებისმიერი რეაქტიული $\{\chi_L \text{ ან } \chi_C\}$ წინააღობისთვის $\cos \varphi = 0$, ანუ **ნულს უტოლდება** მათზე გამოყოფილი სიმძლავრე;

3. რეზონანსი {ცვლადი ძაბვის წრედებში}

✓ მექანიკური რხევითი პროცესების ანალოგიურად, ცვლადი ელექტრული დენის შემთხვევაშიც, წრედის მახასიათებელ ω_0 სიხშირეზე შეიძლება ადგილი ჰქონდეს **რეზონანსს** – დენის ამპლიტუდური მნიშვნელობის მკვეთრ ზრდას [1];

▪ ω_0 სიხშირის განსაზღვრა შესაძლებელია (2.3), (2.1)-ის საფუძველზე:

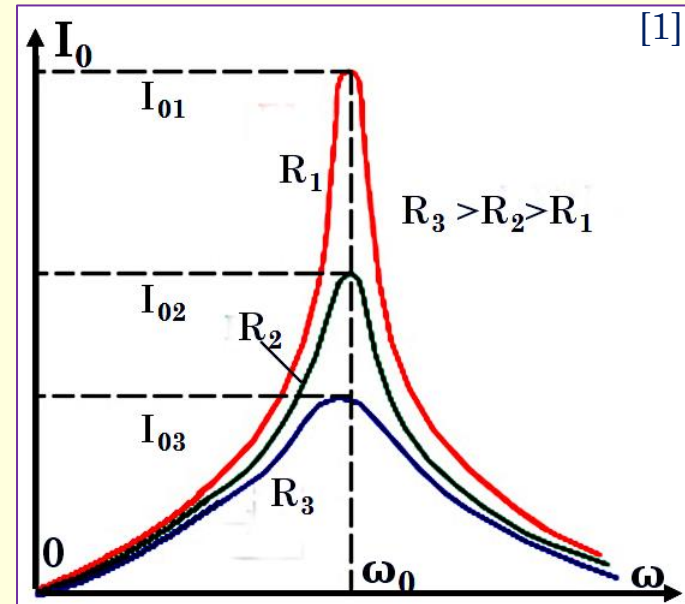
$$I_0 = \mathcal{E}_0 / Z = \mathcal{E}_0 / [R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2]^{1/2} \quad (3.1)$$

▪ I_0 მიაღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას როდესაც

$$\omega L - 1/\omega C = 0 \quad (3.2)$$

• ამრიგად, (3.2)-დან განსაზღვრული სიხშირე იქნება სიხშირის ω_0 **რეზონანსული მნიშვნელობა**:

$$\omega_0 = (LC)^{-1/2} \quad (3.3)$$



▪ ვინაიდან რეზონანსულ სიხშირეზე $\chi = 0$ (ანუ, $Z=R$) **სიმძლავრის კოეფიციენტი $\cos\varphi=1$** ;

• რეზონანსისას **ძაბვები L კოჭასა და C კონდენსატორზე შეიძლება მნიშვნელოვნად აჭარბებდნენ ძაბვას წრედის ბოლოებზე**;



“ცხოვრება მეტისმეტად ხანმოკლეა, ამიტომ დაიწყეთ დესერტით.” Barbra Streisand



რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1942

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 14

თემა:

სემესტრი III

ელექტრომაგნიტური ტალღები

ზვ.

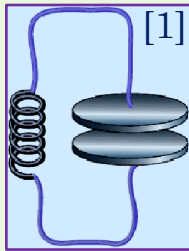
094

1.რხევითი კონტური

097

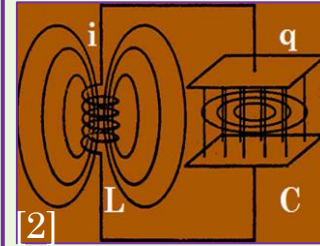
2.ელექტრომაგნიტური ტალღა

1.რხევითი კონტური

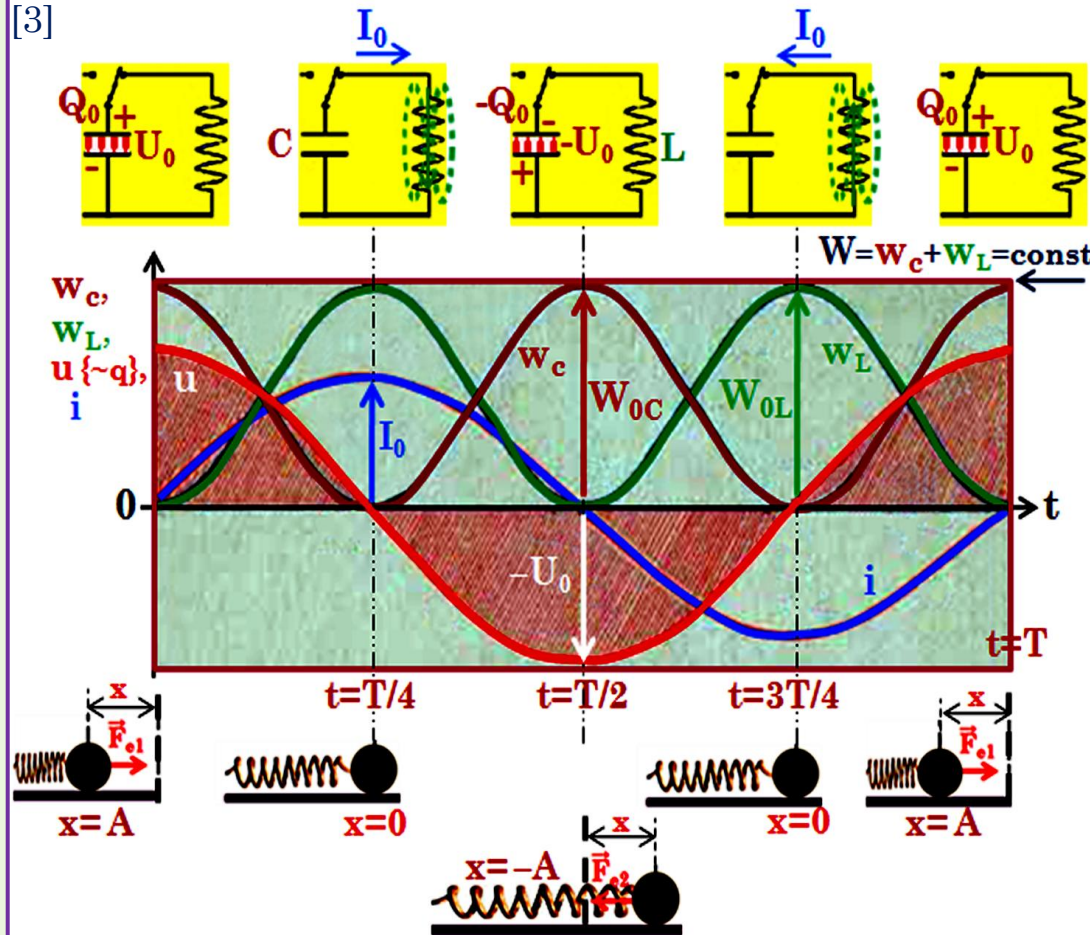


✓ ელექტრული პარამეტრების (მუხტის, ძაბვის, დენის) რხევების აღძვრა მარტივია **რხევით კონტურში** (ერთმანეთთან შეერთებული C ტევადობის კონდენსატორი და L ინდუქციურობის კოჭა) [1] [2];

▪ საწყისი ენერგია $W = q^2/2C$ კონტურს მიეწოდება კონდენსატორის დამუხტვით, რხევები კი აღიძვრება კონდენსატორთან კოჭას მიერთებით;



[3]



▪ $\Delta t = 0 - T/4$ დროში, განმუხტვის გამო:

• **კონდენსატორის** q მუხტი, u ძაბვა, ელექტრული ველი და მისი ენერგიის w_c მყისი სიდიდე **ნულამდე** ეცემა [3];

• **კოჭაში** i დენი, მის მიერ შექმნილი მაგნიტური ველი და მაგნიტური ველის w_L ენერგია **მაქსიმუმამდე** იზრდება;

• თვითინდუქციის შედეგად კონდენსატორზე მუხტის შემცირება და კოჭაში დენის ზრდა **მყისიერად არ** ხდება;

▪ $t = T/4$ მომენტისთვის ელექტრული ველის W_{0c} ენერგია მთლიანად გარდაიქმნება კოჭას მაგნიტური ველის W_{0L} ენერგიად. სრული ენერგია კი:

$$W = w_c + w_L = \text{const};$$

▪ $\Delta t = (T/4 - T/2)$: თვითინდუქცია ინარჩუნებს კლებად, უცვლელი მიმართულების დენს;
 • $t = T/2$ მომენტისთვის კონდენსატორზე **საპირისპირო** ნიშნის *საწყისი* მაქსიმალური $(-Q_0)$ მუხტი და ამპლიტუდური $(-U_0)$ ძაბვა აღდგება, კოჭაში $i=0$. კონტურის მთელი ენერგია ისევ კონდენსატორშია თავმოყრილი ($W = W_{0C}$);
 • პერიოდის II ნახევარში იდენტური პროცესები $t=T$ მომენტისთვის სრულად აღადგენენ კონტურის საწყის მდგომარეობას;

▪ რხევით კონტურში ელექტრული რხევები უშუალო კავშირშია **ელექტრული** {კონდენსატორში} და **მაგნიტური** {კოჭაში} ველების **ენერგიის** ურთიერთგარდაქმნასთან;
 ▪ პროცესის საფუძველს ცვლადი {გრიგალური} ელექტრული და მაგნიტური ველების **ურთიერთაღმგზავნის** თვისება ქმნის;
 ▪ ელექტრული და მაგნიტური ველების პერიოდულ ცვლილებას **ელექტრომაგნიტურ** {ან - ელექტრულ} რხევებს უწოდებენ;

▪ რხევით კონტურში მიმდინარე პროცესები ადასტურებენ ნებისმიერი წარმოშობის **ოსცილაციების** მახასიათებელ ბაზისურ წარმოდგენებს შორის ღრმა **კორელაციას**;
 ▪ თავისუფალი ელექტრული რხევების **T** პერიოდის {და **ω_0** **საკუთარი სიხშირის**} კავშირი კონტურის მახასიათებელ L, C სიდიდეებთან დაადგინა ლორდმა კელვინმა:

$$T = 2\pi(LC)^{1/2} \quad (1.1)$$

$$\omega_0 = (LC)^{-1/2} \quad (1.2)$$

ელექტრული რხევები

კონდენსატორის დამუხტვა ემპ-ით
 კონდენსატორის მუხტი q (ძაბვა u)
 კონდენსატორის ტევადობა $1/C$
 ელექტრული ველის ენერგია
 მუხტზე მოქმედი ელექტრული ძალა
 ელექტრული დენი i
 კოჭას ინდუქციულობა L
 მაგნიტური ველის ენერგია
 თვითინდუქცია
 აქტიური წინაღობა

მექანიკური რხევები

1 საწყისი გადახრა გარეშე ძალით
 2 წონასწორობიდან გადახრა x
 3 გამბარის სიხისტე k
 4 პოტენციური მექანიკური ენერგია
 5 გამბარის დრეკადობის ძალა
 6 სხეულის სიჩქარე V
 7 სხეულის მასა m
 8 კინეტიკური მექანიკური ენერგია
 9 ინერცია
 10 ხახუნი

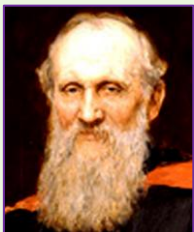
q, u, i პარამეტრები იცვლება ჰარმონიული კანონით:

$$q = Q_0 \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (1.3)$$

$$u = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (1.4)$$

$$i = I_0 \cos(\omega_0 t + \varphi + \pi/2) \quad (1.5)$$

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



▪თავისუფალი მექანიკური რხევების {I.11.3.1} ანალოგიურად განხილული ელექტრული რხევებიც **მიღევადია** [4];

▪**მიღევადი ელექტრული რხევის განტოლებაა -**

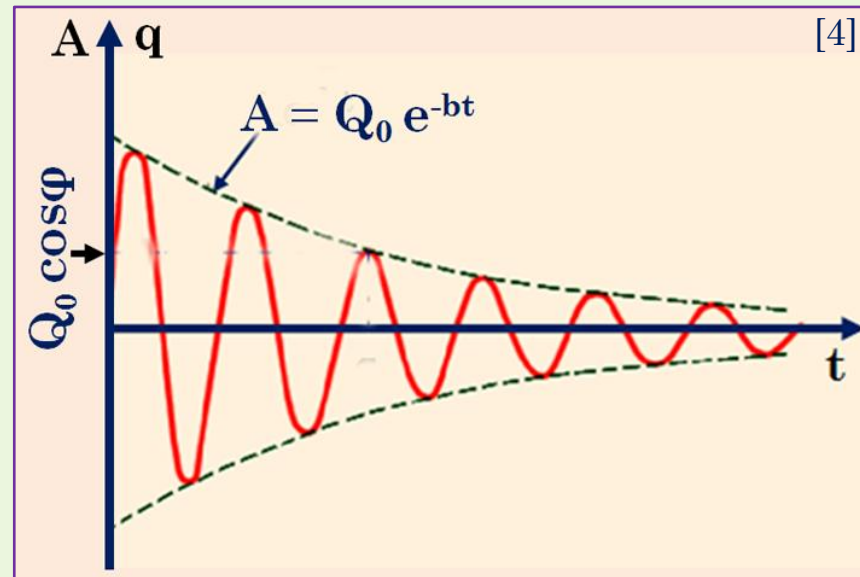
$$q = Q_0 e^{-bt} \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.6) \quad \text{აქ}$$

▪ $b=R/2L$ (R -წინაღობა, L -ინდუქციურობა);

▪ $\omega=(\omega_0^2-b^2)^{1/2}$ **მიღევადი რხევის** სიხშირე;

▪ $A=Q_0 e^{-bt}$ **მიღევადი რხევის** ამპლიტუდა;

▪ $T=2\pi/\omega = 2\pi(\omega_0^2-b^2)^{-1/2}$ **მიღევადი რხევის** პერიოდი {თუ $b \Rightarrow \omega_0 \Rightarrow T \Rightarrow \infty \Rightarrow$ რხევა არ ხდება};



▪**იძულებითი ელექტრული** რხევები განპირობებულია პერიოდულად ცვლადი გარეშე ზემოქმედებით;

▪განხილული **ცვლადი დენი**

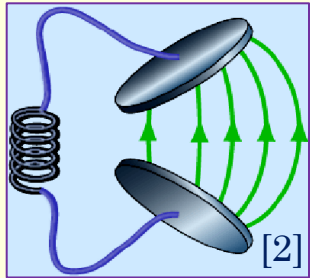
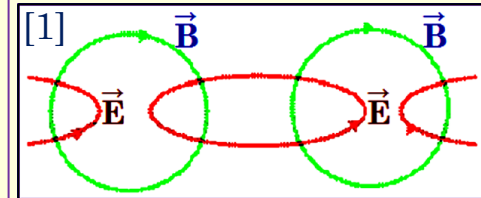
$$e = \mathcal{E}_0 \sin \omega t \quad \text{და} \quad i = I_0 \sin \omega t$$

იძულებითი ელექტრული რხევების კონკრეტული (და მნიშვნელოვანი) მაგალითია:

2. ელექტრომაგნიტური ტალღა

■ ცვლადი ელექტრული და მაგნიტური ველების ურთიერთაღმზრავლობა {8.3}, ერთიანი ელექტრომაგნიტური ველის არსებობა, ქმნის **სივრცეში ენერგიის გადაცემის შესაძლებლობას** [1] ყოველგვარი სადენების, საერთოდ მატერიალური გარემოს **გარეშე** (ე.ი. **ვაკუუმში**);

• ჯ.მაქსველმა თეორიულად დაასაბუთა, ხოლო ჰ.ჰერცმა ცდებით დაამტკიცა, რომ ელექტრომაგნიტური ველი სივრცეში ელექტრომაგნიტური **ტალღის** სახით ვრცელდება;



■ **ელექტრომაგნიტური (ემ) ტალღის** გამოსხივებისა და გავრცელების შესაძლებლობას ქმნის სახეშეცვლილი რხევითი კონტური;

■ კონტურში სინუსოიდალური ემ რხევების არსებობა **არ არის საკმარისი** ემ ტალღის **გამოსხივებისთვის**, ვინაიდან ელექტრული ველი (და მაგნიტურიც) “ჩაკეტილია” კონტურში (კონდენსატორსა და კოჭაში);

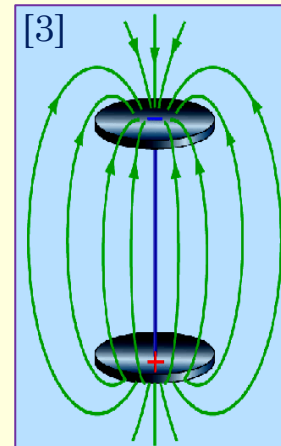
■ ელექტრული ენერგიის გამოსხივების შესაძლებლობა ჩნდება კონდენსატორის ფირფიტების ერთმანეთისგან **დაშორებით** [2];

■ **ემ ტალღის** დიდ მანძილზე გავრცელებისთვის, ტალღას საკმარისი **ენერგია** უნდა გააჩნდეს;

■ ტალღის ენერგია **ω სიხშირის** მე-4 ხარისხის პროპორციულია. **ω -ს** ზრდა კი კონტურის **L** და **C** პარამეტრების შემცირებით მიიღწევა ($\omega^2 \sim (1/LC)$);

• **L** ინდუქციურობის **შესამცირებლად** უნდა შემცირდეს **ხვიათა რიცხვი** (კოჭა ფაქტიურად სწორი გამტარის სახეს იღებს) [3];

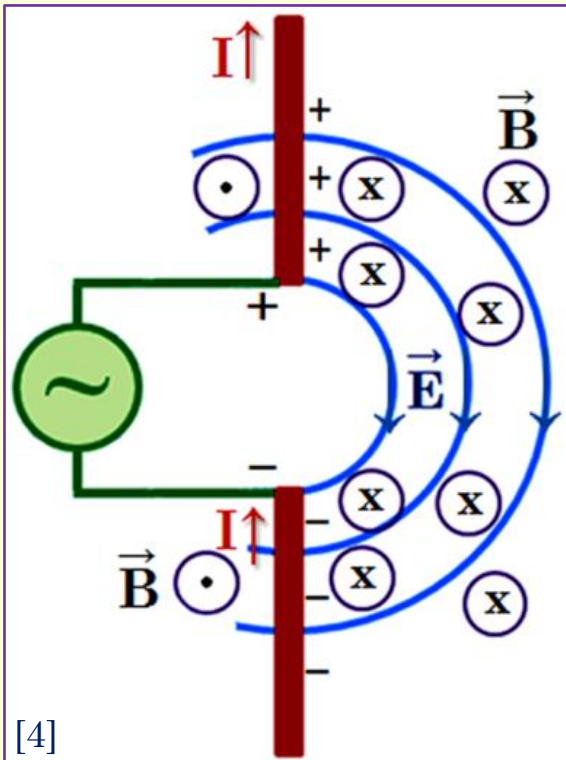
• **C** ტევადობის **შემცირება** კონდენსატორის ($C \sim S/d$) შემონაფენების დაცილებით და მათი ფართობის შემცირებით მიიღწევა. საბოლოოდ, მიიღება **ღია რხევითი კონტური**, რომელიც ანტენის პრიმიტიულ ვარიანტს წარმოადგენს;



▪ **ემ ტალღის** {ხანგრძლივი} გამოსხივებისთვის კონტურის ენერგიის შევსებაა საჭირო;

• ამისთვის, კონტურთან აერთებენ მაღალი სიხშირის **გენერატორს**, რომელიც იძულებით სინუსოიდალურ რხევებს **შეინარჩუნებს** კონტურში;

▪ “ანტენაში” მიმდინარე პროცესები მარტივად აღიქმება გენერატორთან მიერთებული ორი გამტარი ღეროს (**დიპოლური ვიბრატორის**) მაგალითზე [4];



▪ გენერატორის ჩართვისას ერთ-ერთი ღერო იძენს უარყოფით მუხტს, მეორე – დადებითს;

▪ **დამუხტვისას** [4], სანამ გრძელდება ღეროებზე მუხტის მიწოდება:

1. არსებობს ზრდადი $\vec{E}$ დამახულობის ელექტრული ველი {მისი ძალწირები ნახაზის სიბრტყეშია ნაჩვენები};

2. ორივე ღეროში ერთი მიმართულების **დენი** გადის და ღეროების ირგვლივ ჩნდება მაგნიტური ველი $\vec{B}$, რომლის წრიული {ღეროების მომცველი} ინდუქციის წირები ელექტრული ველის მართობულ სიბრტყეში არიან განლაგებული [4];

▪ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი მიმართულია:

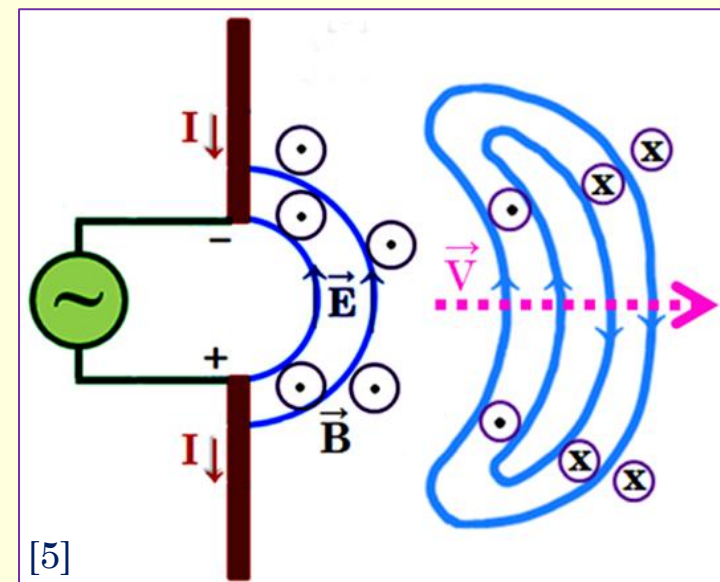
• ნახაზის მარჯვენა ნაწილში მისი სიბრტისკენ $\odot$;

• ნახაზის მარცხენა ნაწილში სიბრტყიდან $\otimes$;

▪გენერატორის ცვლადმა ემმ-მ მიაღწია მაქსიმალურ მნიშვნელობას და დაიწყო შემცირება. დენის მიმართულება საწინააღმდეგოზე შეიცვალა, შესაბამისად [5] საპირისპიროზე შეიცვალა ველების მიმართულებაც;

▪მაგრამ, მიმართულების ცვლილებამდე **არსებული** ველები **არ ქრებიან**, ისინი, ანტენისგან მოშორებით იღებენ მისგან უკვე დამოუკიდებელი **ჩაკეტილი კონტურების** სახეს და სივრცეში გარკვეული სიჩქარით ვრცელდებიან;

▪**ერთიანი** ველი პრაქტიკულად ყველა მიმართულებით ვრცელდება. თუმცა, ველის სიდიდე **მაქსიმალურია** მუხტის ოსცილაციების **მართობული** მიმართულებით, ხოლო მუხტის მოძრაობის **გასწვრივ**, ანტენის ქვეშ და ზევით ნულს უტოლდება;



▪ამრიგად, რხევით კონტურში ცვლადი ელექტრული და მაგნიტური გრიგალური ველების ურთიერთაღმკრა გარკვეულ პირობებში (ღია რხევითი კონტური, ანტენა) განაპირობებს სივრცეში ელექტრომაგნიტური ტალღის გარკვეული სიჩქარით გავრცელებას (სიჩქარე **მაქსიმალურია** ვაკუუმში $c = 3 \cdot 10^8$ მ/წმ);

▪ელექტრომაგნიტურ ტალღას ასხივებს მერხევი – აჩქარებით მოძრავი მუხტი;



“მითხრეს, რომ თითოეული განტოლება, რომელსაც წიგნში ვამატებ, გაყიდვებს ორჯერ ამცირებს.” Stephen Hawking



1942

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

ლექცია 15

თემა:

სემესტრი III

ელექტრომაგნიტური ტალღები

გვ.

101

1. ელექტრომაგნიტური ტალღის მახასიათებლები

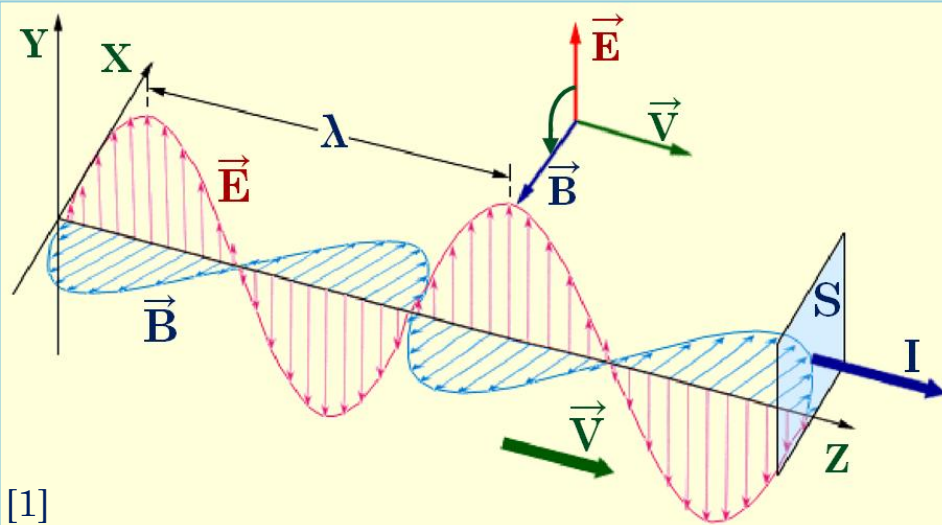
102

2. ელექტრომაგნიტური ტალღების სკალა

103

3. წანაცვლების დენი. მაქსველის განტოლებები

1. ელექტრომაგნიტური ტალღის მახასიათებლები



✓ ელექტრომაგნიტურ ტალღას [1] შემდეგი მნიშვნელოვანი თვისებები გააჩნია:

▪ სივრცის ნებისმიერ წერტილში ტალღის მახასიათებელი სამივე ვექტორი ერთმანეთთან მართ კუთხეს ადგენს:

$$\vec{E} \perp \vec{B} \perp \vec{V}$$

▪ $\vec{E}$ და $\vec{B}$ ვექტორების მიმართულება იცვლება სივრცესა და დროში, ტალღის გავრცელების მიმართულება კი რჩება უცვლელი;

▪ ელექტრომაგნიტური ტალღა განივი ტალღაა. მექანიკური ტალღის გავრცელებისას ნივთიერება ირხევა, აქ კი – ველები;

▪ ელექტრული და მაგნიტური ველების ფაზები ემთხვევა ერთმანეთს - ერთად აღწევენ მაქსიმუმს და მინიმუმს;

▪ ტალღის გავრცელების, ანუ $\vec{V}$ სიჩქარის ვექტორის მიმართულება განისაზღვრება მარჯვენა ხრახნის წესით: თუ ხრახნს ვაბრუნებთ $\vec{E}$ -დან $\vec{B}$ -სკენ უმოკლესი გზით, მისი გადაადგილება გვიჩვენებს $\vec{V}$ -ს მიმართულებას;

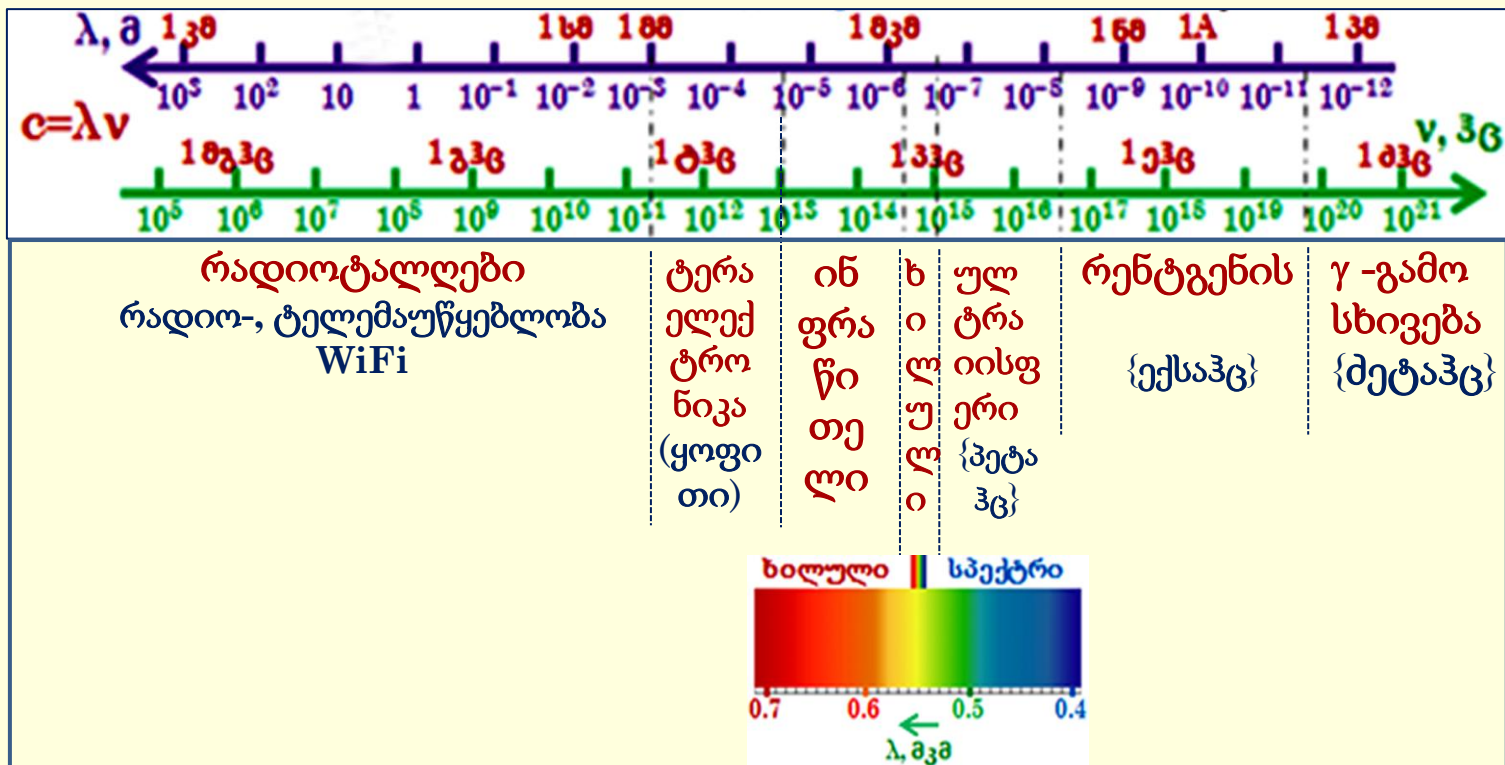
▪ გარემოს ფარდობითი დიელექტრიკული ϵ და მაგნიტური μ შეღწევადობები განსაზღვრავენ ამ გარემოში ელექტრომაგნიტური ტალღის V სიჩქარეს

$$V = c(\epsilon\mu)^{-1/2} \quad (1.1) \quad \text{და} \quad V < c \quad \text{ყოველთვის};$$

▪ ელექტრომაგნიტურ ტალღას ტალღური პროცესის შესაბამისი ყველა თვისება გააჩნია: არეკვლა, შთანთქმა, გარდატეხა, პოლარიზაცია, დიფრაქცია, ინტერფერენცია. ასევე, სხვადასხვა სახის (სიხშირის) ტალღა ინდივიდუალური თვისებებითაც ხასიათდება {იხ. ემ ტალღების სკალა};

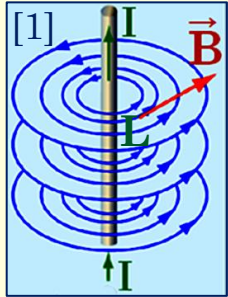
2. ელექტრომაგნიტური ტალღების სკალა

✓ ცდებმა ცხადყო, რომ არ არსებობს ფიზიკური შეზღუდვა და შესაძლებელია ნებისმიერი სიხშირის ემ ტალღის გამოსხივება. საკმარისია მოიძებნოს ელექტრონების საჭირო სიხშირით რხევის აღძვრის საშუალება, რაც, თავის მხრივ, სხვადასხვა ტიპის წყაროს შერჩევასთანაც არის დაკავშირებული;



▪ დღეს, ემ ტალღები სიხშირეთა ვეებერთელა დიაპაზონს $\Delta \nu = 10^{19}$ ჰც მოიცავენ ($10^3 - 10^{22}$ ჰც, ანუ შესაძლებელია 10^{22} -მდე რხევა წამში!). ეს დიაპაზონი რამდენიმე ნაწილად იყოფა გამოყენების და წყაროს ტიპის შესაბამისად;

3. წანაცვლების დენი. მაქსველის განტოლებები



■ ელექტრული I დენი L სიგრძის გამტარის ირგვლივ [1] ქმნის $\vec{B}$ ინდუქციის მაგნიტურ ველს {ამპერის კანონი}:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{L} = \mu_0 I \quad (3.1);$$

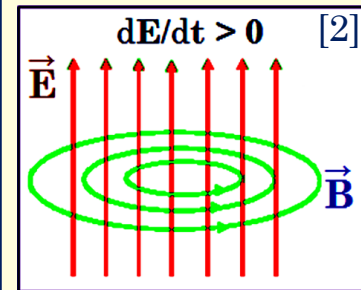
■ ასევე, გრიგალურ მაგნიტურ ველს აჩენს ელექტრული ველის $d\vec{E}/dt$ ცვლილება დროში [2]. ეს მოვლენა მაქსველმა *ფორმალურად* დაუკავშირა *გარკვეულ* დენს - I_D **წანაცვლების** დენს;

■ ორივე {გამტარობის და წანაცვლების} დენის $\Rightarrow$ (3.1) $\rightarrow$

$$\oint_L \vec{B} d\vec{L} = \mu_0 (I + I_D) \quad (3.2)$$

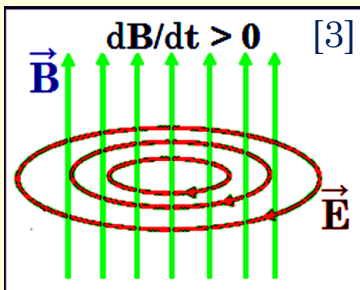
• **წანაცვლების** დენს არ გააჩნია გამტარობის დენის არც ერთი მახასიათებელი გამოვლინება (სითბური, ქიმიური) **მაგნიტური ველის შექმნის** გარდა [2]:

$$I_D = \epsilon_0 d\Phi_E / dt \quad (3.3)$$



■ მაქსველმა, არსებული კანონების განზოგადოებით, ჩამოაყალიბა და **ოთხ განტოლებიანი** სისტემის სახით წარმოადგინა ელექტრული და მაგნიტური მოვლენების **ერთიანი თეორია** {ოღონდ, განტოლებებში **არ განიხილება** დიელექტრიკების ან მაგნეტიკების მონაწილეობა};

მაქსველის **ინტეგრალური** და **დიფერენციალური** განტოლებები



1. ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონი, პრიორიტეტით სივრცეში ადრულ *გრიგალურ* ელექტრულ ველზე $\oint_L \vec{E} d\vec{L} = -\partial\Phi_B / \partial t$ (3.4 *ინტ.*)

დროში ცვლადი მაგნიტური ველი სივრცეში წარმოქმნის გრიგალურ ელექტრულ ველს [3];

$$\text{rot} \vec{E} = - \partial \vec{B} / \partial t \quad (3.5 \text{ დიფ.})$$

2. მაგნიტურ ველს განსაზღვრავს **სრული დენი**, ანუ გამტარობის და წანაცვლების დენების ჯამი

$$\oint_L \vec{H} d\vec{L} = I + I_D \quad (3.6 \text{ ინტ.})$$

მაგნიტური ველი იქმნება დენით [1] ან (და) ცვლადი ელექტრული ველით [2]

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \partial \vec{D} / \partial t \quad (3.7 \text{ დიფ.})$$

$\vec{H}$ მაგნიტური ველის დაძაბულობაა {იზოტროპულ გარემოში $\vec{H} = \vec{B} / \mu \mu_0$ };

$\vec{j}$ დენის სიმკვრივის, $\vec{D}$ ელექტრული წანაცვლების (*ინდუქციის*) ვექტორებია;

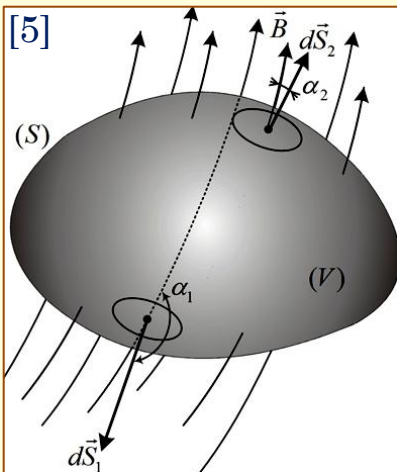
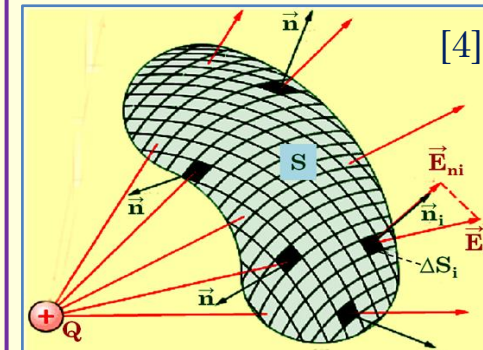
3. განტოლება *გაუსის* თეორემაა ელექტროსტატიკური ველისთვის

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = Q \quad (3.8 \text{ ინტ.})$$

ელექტროსტატიკურ ველს ჩაკეტილი ზედაპირის შიგნით მოთავსებული [4] თავისუფალ მუხტთა ალგებრული ჯამი განსაზღვრავს;

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (3.9 \text{ დიფ.})$$

ρ - მუხტის *მოცულობითი* სიმკვრივეა; {იზოტროპულ გარემოში ელექტრული წანაცვლების ვექტორი $\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$ };



4. განტოლება *გაუსის* თეორემაა მაგნიტური ველისთვის ვაკუუმში

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (3.10 \text{ ინტ.})$$

ნებისმიერი უძრავი ჩაკეტილი ზედაპირის გამჭოლი მაგნიტური ინდუქციის ნაკადი [5] ნულის ტოლია;

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (3.11 \text{ დიფ.})$$

$$\{\text{rot } \vec{b} = [\partial b_z / \partial y - \partial b_y / \partial z] \vec{i} + [\partial b_x / \partial z - \partial b_z / \partial x] \vec{j} + [\partial b_y / \partial x - \partial b_x / \partial y] \vec{k}\}$$

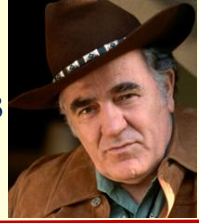
$$\{\text{div } \vec{b} = \partial b_x / \partial x + \partial b_y / \partial y + \partial b_z / \partial z\}$$



“მოვა დრო, როდესაც შენ ჩათვლი, რომ ყველაფერი დასრულდა.
და ეს იქნება დასაწყისი.” Louis L'Amour

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

1908 - 1988



სტუ-ს ფიზიკის კურსის (4 სემესტრი) ლექციების კონსპექტი

თემა:

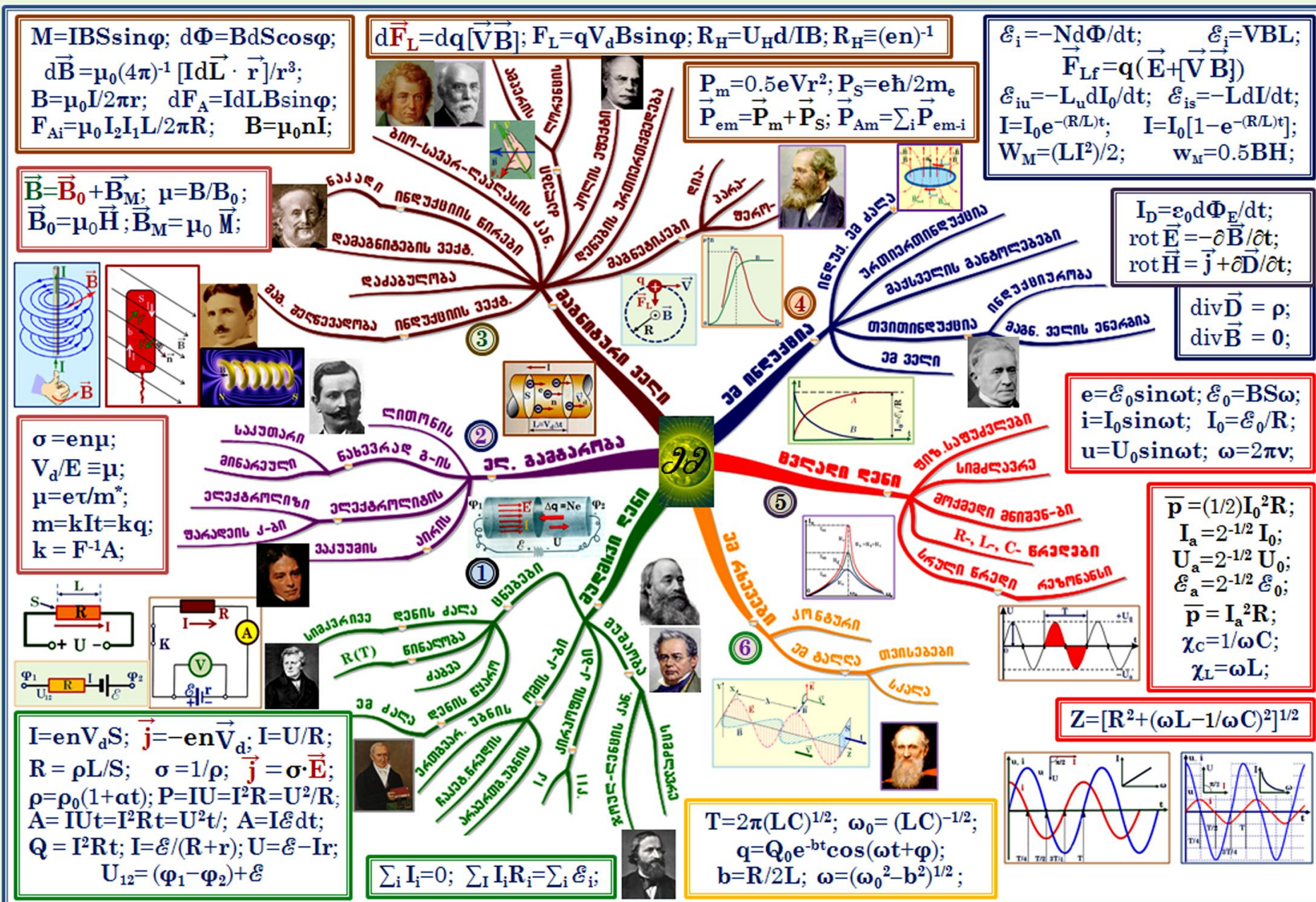
სემესტრი III

Supplement

ზვ.

106

ელექტრობის & მაგნეტიზმის Mind Map



Appendix I. ინფორმაცია (ცხრილები), რომელიც გამოგადგებათ

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

ერთეულთა თავსართები

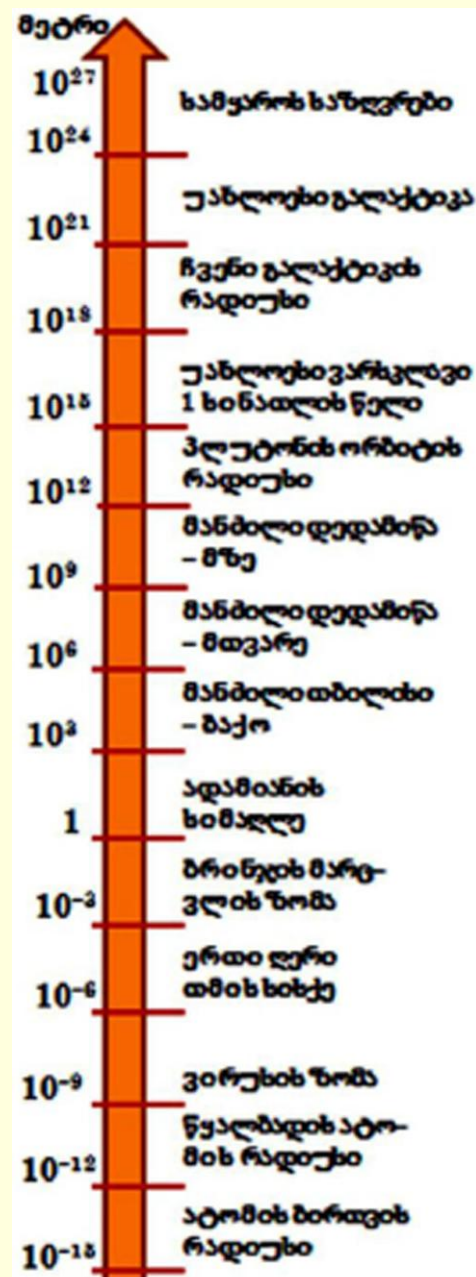
გამრავლი თავსართი აღნიშვნა

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

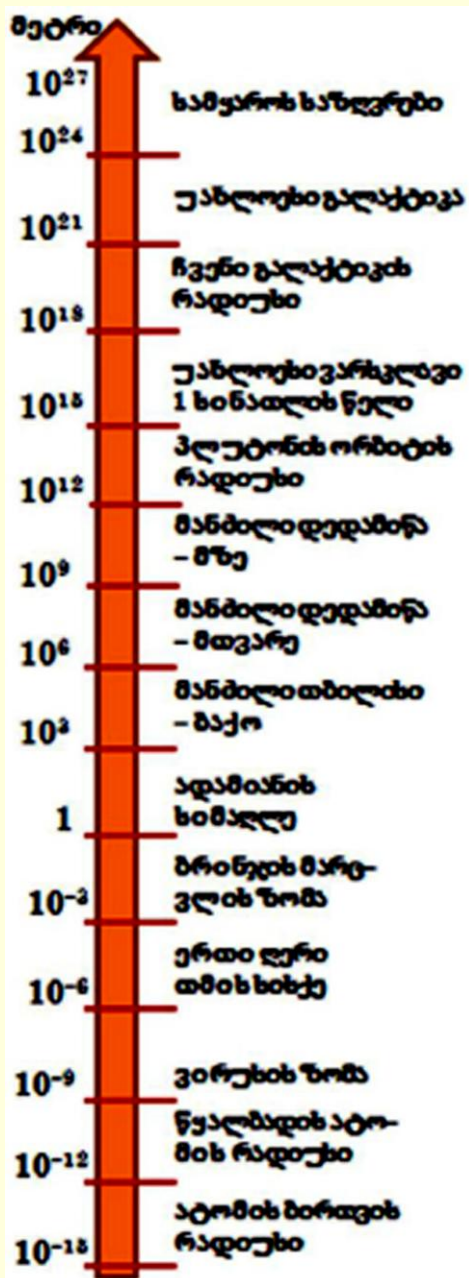
ფიზიკურ სიდიდეთა ნაჩვენავი ერთეულები

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, ენერგია	A, E	ჯოული	ჯ	ევ = $1.6 \cdot 10^{-19}$ ჯ
სიმძლავრე	N, P	ვატი	ვტ	ცხ.ძ = 735.5 ვტ
წნევა	P	პასკალი	პა	ვ.ს.გ.მმ = 133.3 პა
სითბოს რაოდენობა	Q	ჯოული	ჯ	კალორია = 4.187 ჯ

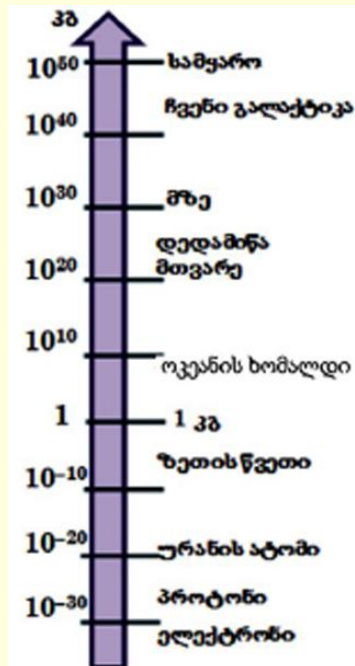
განმედილის ღირებულებები სპექტრში



ფიზიკურ სიდიდეთა ნაკრები პითეულები (გაგრძელება)				
სიდიდე	აღნიშ.	პითეული	აღნიშ.	სხვა პითეულები
კუთრი სიტოტევალობა	c	ჯოული კილოგრამ-კელვინზე	$\text{ჯ კგ}^{-1} \text{K}^{-1}$	
მოლური მასა	M	კილოგრამი მოლთან	კგ მოლი ⁻¹	
კონცენტრაცია	n	1 კუბურ მეტრთან	მ ⁻³	სმ ⁻³ = 10 ⁶ მ ⁻³
ელექტრული მუხტი	q	კულონი	კ	
დენის სიმკვრივე	J	ამპერი კვადრატულ-მეტრთან	ა მ ⁻²	
ძაბვა, ემმ	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 მმ ² მ ⁻¹ = 10 ⁻⁶ ომი მ
ელექტრო ტევადობა	C	ფარადა	ფ	
მაგნიტური ინდუქცია	B	ტესლა	ტლ	
მაგნიტური ნაკადი	F	ვებერი	ვბ	
ინდუქტივობა	L	ჰენრი	ჰნ	
სინათლის ნაკადი	F	ლუმენი	ლმ	
განათებულობა	E	ლუქსი	ლქ	
ოპტიკური ძალა	D	დიოპტრი	დპტრ	მ ⁻¹ ≡ დპტრ



მასის ლიანაზონი საყვაროში



ზოგიერთი ნივთიერების სიმკვრივე, კგ·მ⁻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 გიჟური სიჩქარე, მ·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	$3 \cdot 10^8$

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