	შეკითხვის, დავალების, საკითხის ან ტესტის შინაარსი	ტესტის შემთხვევაში ჩაწერეთ წერტილით გამოყოფილი პასუხები		
1.	ურთიერთქმედების რამდენი სახეა დღეისათვის ცნობილი (1 ქულა)	3 . 4. 5 . 6 .		
2.	ურთიერთქმედების სახეებია:(1 ქულა)	გრავიტაციული . ელექტრომაგნიტური, ძლიერი, სუსტი, ყველა ჩამოთვლილი .		
3.	ურთიერთქმედების რომელ სახეს მიეკუთვნება დრეკადობის ძალა? (1 ქულა)	ელექტრომაგნიტური. გრავიტაციული . ძლიერი . არცერთი პასუხი არაა სწორი .		
4.	ურთიერთქმედების რომელ სახეს მიეკუთვნება ხახუნის ძალა (1 ქულა)	ელექტრომაგნიტური. Gგრავიტაციული. ძლიერი. არცერთი პასუხი არაა სწორი .		
5.	რას ნიშნავს სიტყვა “ელექტრობა (1 ქულა)	ქარვას . შალი . Nნეილონი . Yყველა სწორია .		
6.	რამდენი სახის ელექტრული მუხტია ბუნებაში (1 ქულა)	2 . 3 . 4 . 10 .		
7.	როგორია გრავიტაციული ურთიერთქმედების ძალის ბუნება (1 ქულა)	მიზიდვის. განზიდვის . გარდაქმნის. გარდამავალი .		
8.	ელექტრონებისათვის ელექტრულ და გრავიტაციულ ურთიერთქმედე ბიდან რომელია დიდი და რამდენჯერ (1 ქულა)	10^{42} . 10^{4} . 10^{45} . 10^{32} . [illegible]		
9.	.რომელ ელემენტარულ ნაწილაკებს შორის ვლინდება ძლიერი ურთიერთქმედება (1 ქულა)	ნუკლონებს. ელექტრონებს . ზოგჯერ უცნობ ნაწილაკებს . არცერთი პასუხი არ არის სწორი .		
10.	ნიუტონის მექანიკაში როგორ ხდება ურთიერთქმედების გადაცემა (1 ქულა)	მყისიერად. Nნელა . ჩქარა . არცერთი პასუხი არ არის სწორი .		
11.	კლასიკურ მექანიკაში რა განაპირობებს ურთიერთქმედების გადაცემას . (1 ქულა)	პოტენციური ენერგია . კინეტიკური ენერგია . ორივე . არცერთი პასუხი არ არის სწორი .		
12.	კლასიკური მექანიკის თვალსაზრისით რას უდრის ურთიერთქმედების გადაცემის სიჩქარე (1 ქულა)	$c=\infty$. $c=\varphi$. $c=1000$. არცერთი პასუხი არ არის სწორი .		
13.	რას უდრის ურთიერთქმედების გადაცემის სიჩქარე ვაკუუმში (1 ქულა)	c≈300000კმ/წმ. c=300000კმ/სთ . c=1000 კმ/წმ . არცერთი პასუხი არ არის სწორი .		
14.	რას ეწოდება შორს ქმედება (1 ქულა)	სიცარიელეში დაშორებული სხეულები ერთმანეთზე მყისიერად		

		მოქმედებენ. ერთი წერტილიდან მეორეში სასრული სიჩქარით გადაცემას ველის საშუალებით. სიცარიელეში დაშორებული სხეულები ერთმანეთზე არ მოქმედებენ. არცერთი პასუხი არ არის სწორი .		
15.	რა კონცეფციას ეყრდნობა ნიუტონის მექანიკა (1 ქულა)	შორსქმედებას. ახლოქმედებას. ორივეს. არცერთი პასუხი არ არისსწორი .		
16.	რას ეწოდება ახლოქმედება (1 ქულა)	ერთი წერტილიდან მეორეში სასრული სიჩქარით გადაცემას ველის საშუალებით. ერთი წერტილიდან მეორეში სიგნალის გადაცემას უსასრულო სიჩქარით. ერთი წერტილიდან მეორეში ბგერის სიჩქარით გადაცემას ველის საშუალებით . არცერთი პასუხი არ არისსწორი .		
17.	როგორ მუხტზე (უძრავზე თუ მოძრავზე)მოქმედებსEელექტრომაგნიტური ველი (1 ქულა)	უძრავზე. მოძრავზე . ორივეზე. არცერთი პასუხი არ არისსწორი .		
18.	არსებობს თუ არა მაგნიტური მუხტი (1 ქულა)	არსებობს . Aარ არსებობს. ზოგჯერ კი . არცერთი პასუხი არ არის სწორი .		
19.	რა თვისებები ახასიათებს მუხტს (1 ქულა)	ორგვარობა. ადიტურობა. მუდმივობა. ინვარიანტობა . ყველა ჩამოთვლილი .		
20.	რომელი ძირითადი ერთეულებია გაუსის სისტემაში (1 ქულა)	სანტიმეტრი გრამი წამი . მეტრი კგ წმ . მეტრი კგ ამპერი . არცერთი პასუხი არ არის სწორი .		
21.	რას უდრის 1 კულონი (1 ქულა)	1კ=3 * $10^9$$CGSE_q$. 1კ=3 * 10-^{9} . 1კ=9 * 10^9 . 1კ=3 * 10^9ვ .		
22.	როგორ ველს ეწოდება სტაციონარული? (1 ქულა)	თუ ველი არ არის დამოკიდებული დროზე . თუ ველი არის დამოკიდებული დროზე . თუ ველი არ არის დამოკიდებული დაძაბულობაზე . არცერთი პასუხი არ არის სწორი .		
23.	რამდენი კომპონენტი გააჩნია ვექტორულ ველს? (1 ქულა)	1 . 2 . 3 . 4 .		
24.	. როგორ ველს ეწოდება სკალარული? (1 ქულა)	ველს ეწოდება სკალარული თუ ის სივრცის ყოველ წერტილში		

		ხასიათდება ერთი კომპონენტით. ველს ეწოდება სკალარული თუ ის სივრცის ყოველ წერტილში ხასიათდება სამი კომპონენტით. ველს ეწოდება სკალარული თუ ის სივრცის ყოველ წერტილში ხასიათდება ორი კომპონენტით . არცერთი პასუხი არ არის სწორი .		
25.	როგორი სიდიდეა სკალარული ფუნქციის გრადიენტი? (1 ქულა)	სკალარული . ვექტორული . ზოგჯერ სკალარული . არცერთი პასუხი არ არის სწორი .		
26.	რას ნიშნავს სუპერპოზიციის პრინციპი? (1 ქულა)	ვექტორულ შეკრებას . სკალარულ ნამრავლს . ვექტორულ ნამრავლს . არცერთი პასუხი არ არის სწორი .		
27.	ველის დაძაბულობის ფორმულაა (1 ქულა)	$E = F/q$. $E = Fq$. $E = \sqrt{Fq}$. $E = q/F$.		
28.	Si-სისტემაში ველის დაძაბულობის ერთეულია? (1 ქულა)	ნ/კ . კ/ნ . ფ . ა .		
29.	ნაკადის გამოსათვლელი ფორმულა A ვექტორული ველისთვის არის ? (1 ქულა)	$d\Phi = AdS \cos a$. $d\Phi = AdS \sin a$. $d\Phi = AdS \operatorname{tg} a$. არცერთი პასუხი არ არის სწორი .		
30.	ჩაკეტილი ზედაპირის შემთხვევაში A ვექტორული ველისთვის ნაკადის გამოსათვლელი ფორმულაა (1 ქულა)	$\Phi = \oint(\vec{A}\, \vec{dS})$. $\Phi = \oint(FdL)$. $\Phi = \oint(NdN)$. $\Phi = \oint(BdV)$.		
31.	არის თუ არა ნაკადის მნიშვნელობა დამოკიდებული ზედაპირის ფორმაზე? (1 ქულა)	არა . კი . ზოგჯერ კი . ზოგჯერ არა .		
32.	გაუსის თეორემის შესაბამისი ფორმულაა (1 ქულა)	$\Phi = q/\varepsilon_0$. $\Phi = {}^{\varepsilon_0}/_{q}$. $\Phi = q\varepsilon_0$. არცერთი პასუხი არ არის სწორი .		
33.	როგორ გამოითვლება რელატივის ტური იმპულსი (1 ქულა)	$P = \frac{mv}{(1-\frac{v^2}{c^2})^{1/2}}$. $P = \frac{mv}{\frac{v^2}{c^2}}$. $P = mv^2$. $P = mc^2$.		
34.	რომელი ფორმულიდან ჩანს მაგნიტური ველის რელატივის ტური ბუნება (1 ქულა)	$\vec{F}_m = \frac{q}{c}[\vec{V}\vec{B}]$ $F_m = c(\vec{v}\vec{b})$. $F_m = q(\vec{v}\vec{b})$. არცერთი პასუხი არ არის სწორი .		
35.	გაუსის სისტემაში ელ . დაძაბულობის ერთეულია (1 ქულა)	1დნ/$CGSE_q$. 1დნ/$CGSE_i$. ა/ვ . კ/ჯ .		
36.	Si სისტემაში ელექტრული დაძაბულობის ერთეულია (1 ქულა)	ნ/კ . ვ/მ . ორივე . არც ერთი .		
37.	მაგნიტური ინდუქციის ერთეულს გაუსის სისტემაში ეწოდება (1 ქულა)	გაუსი . ჰენრი . ტესლა . ომი .		

38.	Si სისტემაში მაგნიტური ინდუქციის ერთეულია (1 ქულა)	გაუსი . ჰენრი . ტესლა . ომი .		
39.	რა იწვევს დამუხტული ნაწილაკის ენერგიეს ცვლილებას (1 ქულა)	Eელექტრული ველი . მაგნიტური ველი . Oორივე სწორია . არც ერთი .		
40.	რას უდრის დამუხტული ნაწილაკის გადაადგილებაზე მაგნიტური ველის მუშაობა (1 ქულა)	ნულს . უსასრულობას . მაგნიტური ველი დამუხტულ ნაწილაკზე არ მოქმედებს . არცერთი პასუხი არ არის სწორი .		

1. რას ემყარება მუხტის მუდმივობის კანონი

მუხტის მუდმივობის კანონი ემყარება მრავალრიცხოვან ექსპერიმენტულ მონაცემს, რომელიც აჩვენებს, რომ ნებისმიერი ურთიერთქმედებისას სრული მუხტი უცვლელია.

2. რას ამტკიცებს კვანტებზე დაკვირვება

γ კვანტებზე დაკვირვება ამტკიცებს, რომ მატერიის ნაწილაკები (მაგ. ელექტრონ-პოზიტრონის წყვილი) შეიძლება დაიბადონ ან გაქრნენ, მაგრამ მათი ჯამური ელექტრული მუხტი ყოველთვის ნულის ტოლი რჩება, რაც ადასტურებს მუხტის შენახვის კანონს.

3. რატომაა საჭირო ველის მათემატიკური ენის გამოყენება

ველის მათემატიკური ენა საჭიროა მუხტის შენახვის კანონის სრულფასოვანი აღწერისთვის, რადგან ერთდროულობა ფარდობითია. ველის ცნების გარეშე, მუხტის ერთ წერტილში გაქრობა და მეორეში გაჩენა შეიძლება სხვადასხვა ათვლის სისტემაში კანონის დარღვევად აღიქმებოდეს.

4. რომელი ფიზიკური სიდიდეების შემოღებაა საჭირო ველის მათემატიკურ ენაზე გადასასვლელად

საჭიროა ლოკალური სიდიდეების შემოღება: მუხტის სიმკვრივე (მოცულობითი, ზედაპირული, წირითი) და დენის სიმკვრივე.

5. რაში მდგომარეობს მუხტის უწყვეტი განაწილების პრინციპი

მაკროსკოპულ მოვლენებში ელემენტარული მუხტების რაოდენობა ძალიან დიდია, ამიტომ მათი დისკრეტულობა არ იგრძნობა და შეგვიძლია ჩავთვალოთ, რომ მუხტი სივრცეში უწყვეტადაა განაწილებული.

6. რომელი ლოკალური სიდიდით ახასიათებენ მუხტის უწყვეტ განაწილებას

მუხტის უწყვეტ განაწილებას ახასიათებენ მუხტის სიმკვრივით (ρ).

7. რას ეწოდება მუხტის სიმკვრივე

მუხტის სიმკვრივე ეწოდება ფიზიკურად მცირე მოცულობაში მოქცეული მუხტის შეფარდებას ამ მოცულობასთან

$$\rho(\vec{r},t)=\sum_{\Delta V}\frac{e_i}{\Delta V}=\frac{dq}{dV}$$

8. როგორი სიდიდეა მუხტის სიმკვრივე

მუხტის სიმკვრივე სკალარული სიდიდეა.

9. რა ერთეულებში იზომება მუხტის სიმკვრივე

გაუსის სისტემაში: CGSE_q/სმ³, ხოლო SI სისტემაში: კ/მ³.

10. რა ერთეულებით იზომება მუხტის ზედაპირული სიმკვრივე

ზედაპირული სიმკვრივე იზომება მუხტის შეფარდებით ზედაპირის ფართობთან (dq/dS), SI სისტემაში კ/მ².

11. რა ერთეულებით იზომება მუხტის წირითი სიმკვრივე

წირითი სიმკვრივე იზომება მუხტის შეფარდებით სიგრძესთან (dq/dl), SI სისტემაში კ/მ.

12. რომელი ფორმულით გამოითვლება სრული მუხტი

სრული მუხტი გამოითვლება ინტეგრალით:

$$q = \int_V \rho(\vec{r}, t)\, dV$$

13. როგორ გამოითვლება მუხტის კონცენტრაცია

მუხტის კონცენტრაცია (n) გამოითვლება მცირე მოცულობაში ნაწილაკების რაოდენობის შეფარდებით მოცულობასთან:

$$n = \frac{dN}{dV}$$

14. როგორ გამოითვლება მუხტის სიმკვრივე კონცენტრაციის მიხედვით

$$\rho = \rho^+ + \rho^- = n^+ e^+ + n^- e^-$$

15. რას ეწოდება ელექტრული დენი

დამუხტული ნაწილაკების მოწესრიგებულ მოძრაობას ელექტრული დენი ეწოდება.

16. რას ეწოდება დენის სიმკვრივე

დენის სიმკვრივე არის ლოკალური სიდიდე (ვექტორი), რომელიც ახასიათებს მუხტის გადატანას დროის ერთეულში ფართობის ერთეულში.

17. როგორ გამოითვლება ელექტრული მუხტი დენის სიმკვრივით

$$dq = \left(\vec{j} \cdot d\vec{S}\right) dt$$

18. როგორი ვექტორია დენის სიმკვრივე

დენის სიმკვრივე (j) არის ნამდვილი ვექტორი.

19. რა ერთეულებით იზომება დენის სიმკვრივე

გაუსის სისტემაში: CGSE_I/სმ², SI სისტემაში: ა/მ².

20. როგორ გამოითვლება დენის სიმკვრივე კონცენტრაციის გათვალისწინებით

$$\vec{j} = \vec{j}^+ + \vec{j}^- = e^+ n^+ \vec{v}^+ + e^- n^- \vec{v}^-$$

21. რას ეწოდება დენის ძალა

დენის ძალა არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც ტოლია გამტარის განიკვეთში დროის ერთეულში გასული მუხტისა (I = dq/dt).

22. როგორ გამოითვლება სრული დენი

სრული დენი გამოითვლება დენის სიმკვრივის ვექტორის ნაკადის ინტეგრებით ზედაპირზე:

$$I = \int dI = \int \left(\vec{j} \cdot d\vec{S}\right)$$

23. რას წარმოადგენს დენის ძალა ველის მათემატიკურ ენაზე

დენის ძალა წარმოადგენს დენის სიმკვრივის (j) ვექტორული ველის ინტეგრალურ ნაკადს.

24. რა ერთეულებით იზომება დენის ძალა

გაუსის სისტემაში: CGSE_I, SI სისტემაში: ამპერი (ა).

25. რომელი კანონის საფუძველზეა დადგენილი დენის ძალის ერთეული–ამპერი

ამპერი დადგენილია დენების მაგნიტური ურთიერთქმედების (ამპერის კანონის) საფუძველზე.

26. რა იდეის საფუძველზე ხდება მუხტის მუდმივობის კანონის ინტეგრალური სახის დადგენა

იდეა მდგომარეობს იმაში, რომ თუ მოცულობაში მუხტი შეიცვალა, ამის ერთადერთი მიზეზი ამ მოცულობის შემომსაზღვრელი ჩაკეტილი ზედაპირიდან მუხტის გამოდინება (ან შესვლა) შეიძლება იყოს.

27. რა არის რაიმე მოცულობაში მუხტის ცვლილების მიზეზი

ცვლილების მიზეზია მოცულობის შემომსაზღვრელი ზედაპირიდან მუხტის გადინება, რაც მათემატიკურად დენის ძალით (ნაკადით) აღიწერება.

28. რომელი ფორმულით დგინდება მუხტის მუდმივობის კანონის ინტეგრალური სახე

$$-\frac{d}{dt}\int_V \rho(\vec{r},t)\,dV = \oint_S \left(\vec{j}(\vec{r},t)\cdot d\vec{S}\right)$$

29. როგორ გამოისახება მუხტის მუდმივობის კანონი დიფერენციალური სახით

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}\vec{j} = 0$$

35. რომელი ფორმულით გამოისახება გაუსის კანონის დიფერენციალური სახე

$$\operatorname{div}\vec{E} = 4\pi k\,\rho$$

36. რომელი კერძო შემთხვევები განიხილება გაუსის კანონის გამოყენებისას
განიხილება: 1) თანაბრად დამუხტული უსასრულო სიბრტყე, 2) მუხტთა სფერული განაწილება (ბირთვი), 3) ცილინდრული სიმეტრიის შემთხვევა.
37. რომელი ფორმულით ელექტრული ველი გამოითვლება უსასრულო სიბრტყის

$$E = 2\pi k\,\sigma \quad (\text{ზოგადი სახე}) \quad \text{ან} \quad E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} \quad (\text{SI სისტემაში}).$$

38. რა დასკვნების გაკეთება შეიძლება ერთგვაროვანი ბირთვის განხილვისას
მთავარი დასკვნაა, რომ ბირთვის გარეთ ველი ისეთია, თითქოს მთელი მუხტი თავმოყრილია ცენტრში (წერტილოვანი მუხტის მსგავსად).
39. როგორ იცვლება ბირთვის ველი მის შიგნით და გარეთ
ბირთვის შიგნით ველი იზრდება რადიუსის (r) პროპორციულად, ხოლო ბირთვის გარეთ მცირდება მანძილის კვადრატის უკუპროპორციულად ($1/r^2$).
40. როგორი სახე აქვს ელექტრული ველის ფორმულებს Si სისტემაში.
SI სისტემაში ერთგვაროვნად დამუხტული ბირთვისათვის ელექტრული ველის დაძაბულობის ფორმულებს აქვს შემდეგი სახე:

1. ბირთვის გარეთ ($r > R$):

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^3}\vec{r}$$

აქ ველი მცირდება მანძილის კვადრატის უკუპროპორციულად (რადგან $\vec{r}/r^3$ სიდიდეში ერთი r იკვეცება და გვრჩება $1/r^2$).

2. ბირთვის შიგნით ($r < R$):

$$\vec{E} = \frac{1}{3\varepsilon_0}\rho\vec{r}$$

ამ შემთხვევაში ველი რადიუს-ვექტორის პროპორციულად იზრდება.

ეს კითხვები სავალდებულო არ იქნება. $\boxed{\text{თეორიაზე გადასვლა}}$

1. საიდან წარმოიშვა სიტყვა "მაგნიტი"

— ქალაქ მაგნეზიის მახლობლად აღმოჩენილი მინერალის, მაგნიტიტის, სახელწოდებიდან

2. დამუხტულ ელემენტარულ ნაწილაკებს შორის ელექტრული ურთიერთქმედების გარდა რა ურთიერთქმედება არსებობს

— გრავიტაციული მიზიდვის ძალა

3. რა მანძილზე ვლინდება ბირთვული ურთიერთქმედება

— 10^{-15} მეტრზე

4. რა მანძილზე ვლინდება სუსტი ურთიერთქმედება

— 10^{-17} მეტრზე

5. გრავიტაციულ და სუსტ ურთიერთქმედებას შორის რომელია დიდი

— სუსტი

6. რომელ დიაპაზონშია მნიშვნელოვანი ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედება, მატერიის სტრუქტურის თვალსაზრისით

— 10^{-14} მეტრიდან 10^{5} მეტრამდე

7. როგორ მანძილებზე ხდება გრავიტაციული ურთიერთქმედება ელექტრომაგნიტურზე უფრო მნიშვნელოვანი

— 10^{5} მეტრზე უფრო დიდ მანძილებზე, ციური სხეულებისთვის

8. რა შეიძლება შეიცვალოს ურთიერთქმედების დროს

— ნაწილაკთა მდგომარეობა: ენერგია, იმპულსი, იმპულსის მომენტი

9. კლასიკურ მექანიკაში რა ფუნდამენტალური კანონები შეიძლება დაირღვეს

— ბუნების ფუნდამენტური კანონები: ენერგიის, იმპულსისა და იმპულსის მომენტის მუდმივობის კანონები

10. რით არის განპირობებული ველის ცნების შემოღება

— ბუნების ფუნდამენტური კანონების, მუდმივობის კანონების, სამართლიანობის შესანარჩუნებლად. ველის ცნების შემოტანით აღარ არის საჭირო ურთიერთქმედების ახსნა პოტენციური ენერგიის საშუალებით.

11. რას წარმოადგენს ველი

— ელექტრომაგნიტური ველი არსებობს დამოუკიდებლად და წარმოადგენს მატერიის ერთ-ერთ სახეს

12. რა სახით არსებობს კლასიკურ მექანიკაში მატერია

— კლასიკურ მექანიკაში მატერია არსებობს ნივთიერების სახით და ხასიათდება მასის საშუალებით

13. ვის მიერ იქნა შემოტანილი ახლოქმედების კონცეფცია

— მაიკლ ფარადეის მიერ XIX საუკუნის პირველ ნახევარში

14. რით იყო განპირობებული "მსოფლიო ეთერის" შემოღება

— თავდაპირველად ველის ცნება ვაკუუმისთვის არ იყო ცნობილი ამიტომ ასეთ გარემოში „შუამავლის" როლში ჰიპოთეზური გარემო „მსოფლიო ეთერი" შემოიღეს, რომელსაც მექანიკური თვისებები უნდა ჰქონოდა.

15. რა უზრუნველყოფს ურთიერთქმედების გადაცემას

— ურთიერთქმედების გადაცემა ხორციელდება მატერიალური ველით.

16. რა არსებითი თვისებები ახასიათებს ელექტრომაგნიტურ ველს

— ელექტრომაგნიტური ველის წყაროა ელექტრული მუხტი (როგორც უძრავი, ასევე მოძრავი)

17. რას უნდა ასახავდეს ფიზიკური სიდიდის განსაზღვრა

— ფიზიკური სიდიდის განსაზღვრა უნდა ასახავდეს როგორც თვისობრივ მხარეს, ასევე რაოდენობრივს.

18. როგორ შეიძლება დავადგინოთ ფიზიკური კანონი

— ცდების, ექსპერიმენტების მეშვეობით.

19. რა არის ელექტრული მუხტი

— ელექტრული მუხტი არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედების ზომას წარმოადგენს.

20. რას წარმოადგენს წერტილოვანი მუხტი

— წერტილოვანია ისეთი მუხტი, რომლის ზომების უგულვებელყოფა მოცემულ პირობებში შეგვიძლია.

21. როგორ ცვლიდა კულონი მუხტის სიდიდეს

— დამუხტული და ელექტრულად ნეიტრალური ერთნაირი ლითონის ორი ბურთულის შეხებითა და მათი დაშორებით.

22. დამოკიდებულია თუ არა მუხტის სიდიდე მოძრაობის სიჩქარეზე

— არა

23. როგორ შეიძლება განვსაზღვროთ მუხტის სიდიდე

— უძრავ წერტილოვან მუხტზე მოქმედი ძალა პროპორციული მუხდის სიდიდისა $F \sim q$. ორი სხვადასხვა მუხტისათვის ველის მოცემულ წერტილში $\frac{F_1}{F_2} = \left|\frac{q_1}{q_2}\right|$. თუ ერთ-ერთ მუხტს პირობითად ჩავთვლით ერთეულად, გამოვთვლით მეორე მუხტის მნიშვნელობას (მასის რაოდენობრივი განსაზღვრის ანალოგიურად).

24. რას ჰქვია მუხტის ელექტროსტატიკური ერთეული

— გაუსის სისტემაში კულონის კანონის გამოყენებით მუხტის დადგენილ ერთეულს სიგრძის, მასისა და დროის ერთეულების გამოყენებით მუხტის ელექტროსტატიკური ერთეული ჰქვია და აღინიშნება $CGSE_q$. ორი ასეთი მუხტი ვაკუუმში 1 სმ მანძილზე ერთმანეთზე მოქმედებს 1 დნ (დინი) ძალით (1 დნ $= 10^{-5}$ ნ).

25. ელექტრული სიდიდეებისათვის რა ერთეულია ძირითადი Si სისტემაში

— დენის ძალის ერთეული ამპერი

26. რას ჰქვია ელემენტარული მუხტი

— ელემენტარული მუხტი ეწოდება ერთეული პროტონებისა და ელექტრონების მუხტს, რომელთა აბსოლუტური მნიშვნელობა ტოლია. $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ კ.

27. როდის დაიწყო ნივთიერების ელექტრული სტრუქტურის გარკვევა

— XIX საუკუნის 80-იანი წლებიდან

28. ვის მიერ იქნა აღმოჩენილი ელექტრონი

— 1897 წელს ტომსონის მიერ

29. ატომის აგებულების როგორი მოდელი შექმნა რეზერფორდმა

— პლანეტარული

30. რას ეწოდება ველი მათემატიკის ენაზე

— მათემატიკური აზრით, ველი ეწოდება სივრცის კოორდინატებისა და დროის ნებისმიერ ფუნქციას.

31. როგორ ველს ეწოდება ერთგვაროვანი

— ერთგვაროვანი ველი არ არის დამოკიდებული კოორდინატებზე.

32. რას ეწოდება სკალარული ველის გრადიენტი

— $\varphi(x,\ y,\ z)$ სკალარული ფუნქციის გრადიენტი ეწოდება შემდეგ ვექტორს

$$\nabla\varphi = \vec{i}\frac{d\varphi}{dx} + \vec{j}\frac{d\phi}{dy} + \vec{k}\frac{d\varphi}{dz}$$

$$grad\varphi = \vec{i}\frac{d\varphi}{dx} + \vec{j}\frac{d\phi}{dy} + \vec{k}\frac{d\varphi}{dz}$$

$$d\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x}dx + \frac{\partial\varphi}{\partial y}dy + \frac{\partial\varphi}{\partial z}dz.$$

33. რას უდრის სკალარული ფუნქციის ნაზრდი

— ფუნქციის ნაზრდი $d\varphi$ ტოლია $grad\varphi$ და $d\vec{r}$ ვექტორების სკალარული ნამრავლისა

$$d\varphi = grad\varphi \cdot d\vec{r}$$

$$d\vec{r} = \vec{i}dx + \vec{j}dy + \vec{k}dz$$

34. გრადიენტის ჩაწერის რომელი ფორმებია გამოყენებული

— $grad\varphi \equiv \nabla\varphi \equiv \frac{\partial\varphi}{\partial\vec{r}}$, სადაც $\nabla = \vec{i}\frac{\partial}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial}{\partial z}$ არის ჰამილტონის ოპერატორი.

35. ვექტორული ველის გამოსახვის რომელი ფორმებია ცნობილი

— ვექტორულ ველს გამოსახავენ ან **ისრებით**,რომელთა სიგრძე და მიმართულება ახასიათებს ველს იმ წერტილში, საიდანაც ისრები იწყება, ან **ველის წირებით**, რომელთა ყოველ წერტილში ვექტორულ ველს მხების მიმართულება აქვს.

36. რას ეწოდება დივერგენცია

— დივერგენცია არის უსასრულოდ მცირე ნებისმიერი ჩაკეტილი ზედაპირის გამჭოლი ნაკადი, მოსული მოცულობის ერთეულზე.

37. რას ნიშნავს ქართულად დივერგენცია

— განშლადობას

38. ოსტროგრადსკ–გაუსის თეორემის ფორმულაა

— $$\oint_S(\vec{A}d\vec{S}) = \int_V div\vec{A}dV$$

39. რას ეწოდება ვექტორის ცირკულაცია რაიმე წირზე

— $\Gamma = \oint_L(\vec{A}d\vec{l})$ სადაც Γ არის $\vec{A}$ ვექტორის ცირკულაცია ნებისმიერ ჩაკეტილ წირზე

40. რას ეწოდება როტორი

— როტორი არის ვექტორული ველის ლოკალური მახასიათებელი:

$$rot_n\vec{A} = \lim_{S_i\to 0}\oint\frac{1}{S_i}(\vec{A}d\vec{l})$$

41. რას ნიშნავს ქართულად როტორი

— ბრუნვას

42. სტოქსის თეორემის ფორმულაა

— $$\oint_L(\vec{A}d\vec{l}) = \int_S rot\vec{A}\cdot d\vec{S}$$

43. როგორ გამოითვლება ძალის ტოლქმედი მუხტთა სისტემის შემთხვევაში

— ვინაიდან ძალა ვექტორული სიდიდეა, ამიტომ ტოლქმედი იქნება ყველა სხეულის მოქმედებათა გემოეტრიული ჯამი: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + ... + \vec{F}_n$

44. რისთვისაა შემოღებული ველის დაძაბულობის ცნება

— ელექტრული ველის რაოდენობრივი დახასიათებისთვის

45. როგორ განისაზღვრება ველის დაძაბულობა

— ველის დაძაბულობა მოცემულ წერტილში ტოლია მუხტზე მოქმედი ძალის შეფარდებისა მოცემულ მუხტთან

46. რა მიმართულება აქვს დაძაბულობას

— დაძაბულობის მიმართულება დადებით მუხტზე მოქმედი ძალის მიმართულებას ემთხვევა.

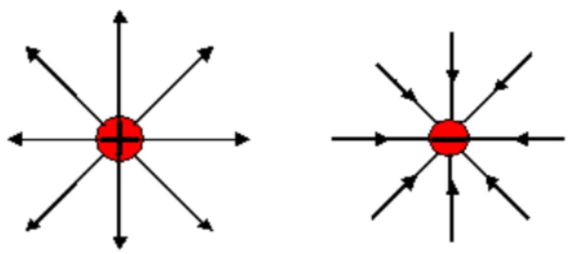
47. რას ეწოდება ძალწირი

— ძალწირი ეწოდება წირს, რომლის ნებისმიერ წერტილში გავლებული მხების მიმართულება ემთხვევა ველის მოცემულ წერტილში დაძაბულობის ვექტორის მიმართულებას.

48. რას განსაზღვრავს ძალწირების რიცხვი

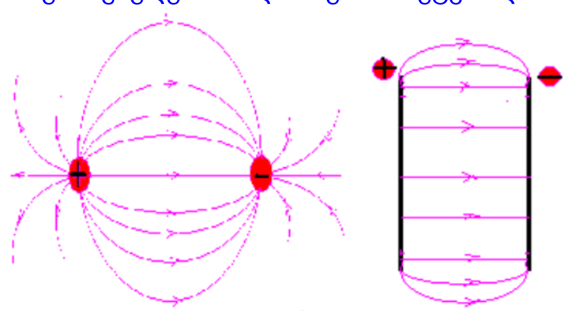
— სივრცეში ძალწირების რიცხვი (სიხშირე) ტოლია დაძაბულობის ვექტორის მოდულისა.

49. როგორია ძალწირების სურათი წერტილოვანი მუხტებისათვის



50. როგორ შეიძლება დავახასიათოთ მუხტების ურთიერთქმედება ძალწირებით

— ძალწიერები გამოდიან დადებითი მუხტიდან და შედიან უარყოფით მუხტებში. მუხტების ურთიერთქმედება ძალწირებით შეგვიძლია ნახაზით წარმოვადგინოთ



51. რით არის განპირობებული დაძაბულობის ნაკადის ცნების შემოღება

— დაძაბულობის ვექტორის საშუალებით ელექტრული ველის დახასიათება, ხშირად, მათემატიკურ სირთულეებთან არის დაკავშირებული. ამოცანების გამარტივების მიზნით, ხელსაყრელია, დაძაბულობის ვექტორის ნაკადის გამოყენება.

52. რას ეწოდება რაიმე ვექტორის ნაკადი

— ნებისმიერი ვექტორის ნაკადი რაიმე ზედაპირზე, ზედაპირის მართობულად, ფართობის ერთეულში გამავალი ძალწირების რიცხვის ტოლია.

53. შეიძლება თუ არა ზედაპირის ფართობის ვექტორულად გამოსახვა

— შეიძლება ზედაპირის დადებითი ნორმალის საშუალებით $d\vec{S} = dS\vec{n}$, საიდანაც ნაკადი ტოლია $\Phi = \int(\vec{E}d\vec{S})$

54. როგორ გამოითვლება ჩაკეტილი ზედაპირის მიმართ მუხტთა სისტემის სრული ნაკადი

— $$\Phi = \oint(\vec{E}d\vec{S}) = 4\pi kq = \frac{\sum_{i=1}^{n} q_i}{\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

55. რაში მდგომარეობს გაუსის თეორემა

— დაძაბულობის ვექტორის ნაკადი ჩაკეტილი ზედაპირის მიმართ ტოლია ზედაპირის შიგნით არსებული მუხტების ალგებრული ჯამი გაყოფილი ვაკუუმის ელექტრულ მუდმივზე.

56. რა განსაზღვრავს ნაკადის ნიშანს

— ძალწირების მიმართულება: ზედაპირიდან გამოსული ძალწირები დადებითია, ხოლო ზედაპირში შესული – უარყოფითი.

57. რომელი ვექტორული ფუნქციები ახასიათებს ვექტორულ ველს

— ველის მდგომარეობა ხასიათდება სივრცის წერტილთა კოორდინატებისა და დროის ორი ვექტორული ფუნქციით: $\vec{E}(\vec{r},\ t)$ ელექტრული ველის დაძაბულობა და $\vec{B}(\vec{r},\ t)$ მაგნიტური ველის ინდუქცია.

58. რა პრინციპული განსხვავებაა ელექტრომაგნიტურ ველში მუხტზე მოქმედ ძალებს შორის

— ერთი არ არის დამოკიდებული სიჩქარეზე, მეორე კი დამოკიდებულია.

59. როგორი ვექტორია მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი

— ფსევდოვექტორი

60. რიცხობრივად როგორია კავშირი ელექტრული დაძაბულობის ერთეულებს შორის

— ნ/კ = ვ/მ, ამიტომ 1 დნ / $CGSE_q = 3 \cdot 10^4$ ვ / მ

61. რიცხვობრივად, როგორია კავშირი მაგნიტური ინდუქციის ერთეულებს შორის

— 1 ტლ $= 10^4$ გაუსი

62. რა იწვევს ნაწილაკის ენერგიის ცვლილებას

— მხოლოდ ელექტრული ველი

თავი I. ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედება. ელექტრომაგნიტური ველი.

§1.1. ელექტრომაგნიტური ველის ფიზიკური რეალობა.

ბუნებაში დღეისათვის ცნობილია ურთიერთქმედების ოთხი სახე: გრავიტაციული, ელექტრომაგნიტური, ძლიერი და სუსტი. ყველა სხვა ურთიერთქმედება დაიყვანება ერთ-ერთ მათგანზე. მაგალითად, დრეკადობის ძალა ელექტრომაგნიტურ ურთიერთქმედებაზე დაიყვანება, (ასევე ხახუნის ძალა ელექტრომაგნიტური ბუნებისაა).

ელექტრული და მაგნიტური. ურთიერთქმედების მოვლენებს ადამიანი უხსოვარი დროიდან იცნობს (ტერმინი "ელექტრობა" ბერძნული წარმოშობისაა და ქართულად "ქარვას" ნიშნავს, "მაგნიტი"- წარმოიშვა მინერალ მაგნიტიტის სახელიდან, იგი ქალაქ მაგნეზიის მახლობლად აღმოაჩინეს). მოვლენებისა და ცდების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედება განპირობებულია ბუნებაში ორი სახის ელექტრული მუხტის არსებობით.

დამუხტულ ელემენტალურ ნაწილაკებს შორის ელექტრული ურთიერთქმედების გარდა გრავიტაციული მიზიდვის ძალაც მოქმედებს, მაგრამ მისი მნიშვნელობა $\approx 10^{42}$ ჯერ ნაკლებია ელე ქტრულ ძალაზე. /ძლიერი ურთიერთქმედება (ბირთვული ძალები) ვლინდება ნუკლონებს შორის 10^{-15} მ-ის რიგის მანძილზე და დაახლოებით ორი რიგით აღემატება ელექტრომაგნიტურს, ხოლო სუსტი ურთიერთქმედება ვლინდება კიდევ უფრო მცირე მანძილებზე (10^{-17} მ) და მნიშვნელოვნად ნაკლებია ელექტრომაგნიტურზე, მაგრამ მნიშვნელოვნად აღემატება გრავიტა-ციულს/.

მატერიის სტრუქტურას დაახლოებით $10^{-14} - 10^{5}$ მეტრამდე მანძილებზე ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედება განაპირობებს (სიცოცხლეც სწორედ ამ ინტერვალშია), უფრო დიდ მანძილებზე ციური სხეულებისათვის არსებითი ხდება გრავიტაციული ურთიერთქმედება, უფრო მცირეზე კი – ბირთვული და სუსტი ურთიერთქმედებები. აქედან გამომდინარე ადამიანისათვის ძალზე მნიშვნელოვანია ელექტრომაგნიტური

მოვლენების შესწავლა და ტექნიკასა და ყოფა ცხოვრებაში მისი გამოყენება.

ნიუტონის კლასიკურ მექანიკაში ითვლებოდა, რომ ურთიერთქმედება სივრცის ერთი წერტილიდან მეორე წერტილში მყისიერად გადაეცემა და ის ურთიერთქმედების პოტენციური ენერგიით განისაზღვრებოდა. იგი ნაწილაკთა კოორდინატით განისაზღვრებოდა და არ იყო ცხადად დამოკიდებული დროზე. ანუ ურთიერთქმედების გადაცემის სიჩქარე კლასიკურ მექანიკაში $c = \infty$, მაგრამ დაკვირვებებმა და ცდებმა აჩვენა, რომ ბუნებაში პროცესების მეყსეულად გადაცემა არ ხდება. ერთ სხეულში აღძრული ცვლილება მეორეში თავს იჩენს მხოლოდ გარკვეული დროის შემდეგ /შესაბამისად თუ სხეულებს შორის მანძილს გავყოფთ ეგ. წ. "დაგვიანების" დროზე, მივიღებთ ურთიერთ-ქმედების გავრცელების სიჩქარეს/. რა თქმა უნდა იგი არ არის დამოკიდებული თვით სხეულების (წყაროსა და მიმღების) მოძრაობის სიჩქარეზე. აღნიშნული სიჩქარე არის სწორედ ურთიერთქმედების გადაცემის სიჩქარე (ვაკუუმში ეს სიჩქარე $c \approx 300000$ კმ/წმ). /ეს სიჩქარე ბუნების ერთ-ერთ ძირითად მუდმივს წარმოადგენს/.

სიმარტივისათვის განვიხილოთ ორი დამუხტული ნაწილაკის ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედება ჩაკეტილი სისტემის მიმართ. ურთიერთქმედების გამო იცვლება ნაწილაკთა მდგომა-რეობა (ენერგია, იმპულსი, იმპულსის მომენტი). ვინაიდან ურთიერთქმედება რაღაც სასრული c სიჩქარით გადაეცემა, ერთი ნაწილაკის იმპულსის (ენერგიის, იმპულსის მომენტის) ცვლილებას მეორე ნაწილაკი იგრძნობს $\Delta t = \frac{r}{c}$ დროის შემდეგ (სადაც r -ნაწილაკებს შორის მანძილია); მაშასადამე კლასიკური მექანიკის თვალსაზრისით დაირღვა ბუნების ფუნდამენტალური კანონები (იმპულსის, ენერგიისა და იმპულსის მომენტის მუდმივობის კანონები); პრობლემის გადაწყვეტა ხდება "ველის" ცნების შემოღებით, კერძოდ ნაწილაკის გარშემო შექმნილი ველის და თვით ნაწილაკთა მიმართ სამართლიანი რჩება ჩამოთვლილი სიდიდეებისათვის მუდმივობის კანონები. ე. ი. ელექტრომაგნიტური ველი უნდა განვიხილოთ როგორც დამოუკიდებლად არსებული და ის წარმოადგენს მატერიის ერთ-ერთ სახეს (კლასიკურ მექანიკაში მატერია არსებობდა ნივთიერების

სახით და მისი დახასიათება ხდებოდა მასის საშუალებით. ელექტრომაგნიტური ველის მახასიათებელ სიდიდეებს ცოტა მოგვიანებით გავეცნობით). ველის ცნების შემოტანით აღარ არის საჭირო ურთიერთქმედების ახსნა პოტენციური ენერგიის საშუალებით.

თეორიას, რომლის თანახმადაც, სიცარიელეში, დაშორებული სხეულები ერთმანეთზე მყისიერად მოქმედებენ ($c=\infty$) შორსქმედება ეწოდება. ნიუტონის კლასიკური მექანიკა ამ კონცეფციას ეყრდნობა. თუმცა თვით ნიუტონი ხაზგასმით აღნიშნავდა, რომ მისი თეორია არის მხოლოდ მათემატიკური აღწერა პლანეტების მოძრაობისა და არ ხსნის მიზიდულობის ბუნებას. “მე ვერ შევძელი მიზიდულობის მიზეზთა გარკვევა, ვინაიდან ისინი არ გამომდინარეობენ მოვლენებიდან”- წერდა ნიუტონი (მაგრამ ნიუტონის დიდი წარმატებების ფონზე ეს ჩანაწერი ადვილად იქნა დავიწყებული).

ახლოქმედების თეორია (კონცეფცია) განიხილავს ურთიერთქმედების (იმპულსის, ენერგიის, იმპულსის მომენტის) ერთი წერტილიდან მეორეში სასრული სიჩქარით გადაცემას ველის საშუალებით. ახლოქმედების კონცეფცია პირველად XIX საუკუნის პირველ ნახევარში შემოტანილი იქნა ფარადეის მიერ. /ვინაიდან იმ დროს ველის ცნება ვაკუუმისათვის არ იყო ცნობილი ამიტომ ასეთ გარემოში ეგ.წ. “შუამავლის” როლში იქნა შემოღებული ჰიპოთეზური გარემო “მსოფლიო ეთერი”, რომელსაც მექანიკური თვისებები უნდა ქონოდა. ფარდობითობის თეორიის შემოღების შემდეგ ცხადი გახდა, რომ “მსოფლიო ეთერი” არ არსებობს. ურთიერთქმედების გადაცემისათვის არ არის საჭირო ნივთიერი გარემო, რომ ურთიერთქმედება ხორციელდება მატერიალური ველით.

ელექტრომაგნიტური ველის შესახებ, თუნდაც უმარტივესი, წარმოდგენა რომ შეგვექმნას უნდა განვიხილოთ მისი არსებითი თვისებები, რომლებიც დადგენილია ცდით: ელექტრომაგნიტური ველის წყაროა ელექტრული მუხტი (როგორც უძრავი ისე მოძრავი); ელექტრომაგნიტური ველი მოქმედებს ელექტრულ მუხტზე (უძრავსა თუ მოძრავზე); არ არსებობს მაგნიტური მუხტი (ყოველ შემთხვევაში დღემდე). /გამოჩენილმა ინგლისელმა მეცნიერმა **დირაკმა** 1931 წელს თეორიულად იწინასწარმეტყველა მაგნიტური მუხტის არსებობა. მაგნიტური მუხტის ელემენტალური პორციის მატარებელ ნაწილაკს მან მონოპოლი უწოდა,

მიუხედავად ინტენსიური ექსპერიმენტული ძიებისა, მონოპოლი ჯერჯერობით აღმოჩენილი არ არის, მაგრამ ნაწინასწარმეტყველები პოზიტრონისა და სხვა ანტინაწილაკების არსებობა ცდით უკვე დადასტურებულია, (რასაკვირველია, მონოპოლის აღმოჩენა ფიზიკის ერთ-ერთი უდიდესი აღმოჩენა იქნება, თუ ასეთი განხორციელდება!)/.

§1.2 ელექტრული მუხტი

ფიზიკური სიდიდის განსაზღვრა რთული საკითხია. იგი უნდა ასახავდეს როგორც თვისობრივ მხარეს, ასევე რაოდენობრივს. უნდა გვახსოვდეს, რომ ფიზიკური სიდიდის განსაზღვრებას ვერ ჩამოვაყალიბებთ ფიზიკური კანონის გარეშე. განსაზღვრება კანონის ასახვაა, მათი გათიშვა შეუძლებელია.

ელექტრული მუხტის განსაზღვრისათვის ფიზიკური კანონია საჭირო. კანონის დასადგენად ცდებს უნდა მივმართოთ ხოლო ცდა რომ ჩავატაროთ მუხტის თვისებები უნდა ვიცოდეთ. არ შეიძლება მოვითხოვოთ, რომ ჯერ ჩამოვაყალიბოთ განსაზღვრება და შემდეგ დავადგინოთ თვისებები და კანონი. განსაზღვრება, კანონი, გაზომვის მეთოდი და თეორია ერთმანეთთან უწყვეტ კავშირში ყალიბდება. დაკვირვებათა და ექსპერიმენტთა საფუძველზე ჩნდება პირველი წარმოდგენები, შემდეგ სავარაუდო დებულებათა სისტემა. დებულებათა ამ სისტემაზე დაყრდნობით იქმნება რაოდენობრივი ფიზიკური თეორია, რომლის სისწორეც ისევ ცდით მოწმდება.

ელექტრული მუხტის ცნება შემოვიტანოთ ახლოქმედების პრინციპიდან. ცხადია უნდა გამოვიყენოთ ცდა, რომელიც გვიჩვენებს, რომ ელექტრომაგნიტურ ველთან ურთიერთქმედების მიმართ დამუხტული ნაწილაკის თვისება განისაზღვრება ერთი სკალარული სიდიდით– ელექტრული მუხტით.

ელექტრული მუხტი არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედების ზომას წარმოადგენს.

მუხტის ასეთი განსაზღვრება მასის თვისობრივ განსაზღვრებას მოგვაგონებს. ელექტრული მუხტის რაოდენობრივი განსაზღვრისათვის უნდა დავადგინოთ ფიზიკური კანონი. ამ მიზნით შევიტანოთ ელექტრულად დამუხტული სხეული ელექტრომაგნიტურ ველში (შემდგომში სიმოკლისათვის ელექტრულად დამუხტული სხეულის ნაცვლად გამოვიყენებთ "მუხტს") და გავზომოთ მასზე მოქმედი ძალა. მოვითხოვოთ, რომ მუხტის შეტანამ არ შეცვალოს ველის თვისებები (არ გამოიწვიოს ველის შემქმნელი მუხტის გადაადგილება), გარდა ამისა უნდა მოვითხოვოთ, რომ "სასინჯი" მუხტი იყოს წერტილოვანი (მატერიალური წერტილის მსგავსად უნდა შეგვეძლოს ზომების უგულვებელყოფა მოცემულ პირობებში).

სასინჯი მუხტის შესაცვლელად უნდა ვისარგებლოთ კულონის მიერ გამოყენებული გონებამახვილური ხერხით; თუ შევახებთ დამუხტულსა და ელექტრულად ნეიტრალურ ერთნაირ ლითონის ორ ბურთულას, სიმეტრიის გამო მუხტი მათ შორის თანაბრად განაწილდება და დაშორების შემდეგ, მუხტის მუდმიობის კანონის თანახმად, თითოეულზე დარჩება თავდაპირველი მუხტის ნახევარი. გარდა ამისა აუცილებელია გაირკვეს, დამოკიდებულია თუ არა მუხტის სიდიდე სხეულის მოძრაობის ხასიათზე (ანუ ინვარიანტული არის თუ არა მუხტის სიდიდე). მუხტის ინვარიანტობაზე პასუხს იძლევა მრავალელექტრონიანი ელექტრულად ნეიტრალური ატომების არსებობა. ასეთი ატომების გარე და შიგა შრეების ელექტრონების სიჩქარე ერთმანეთისაგან განსხვავებულია და რომ მოძრაობის სიჩქარეზე იყოს დამოკიდებული ნაწილაკის მუხტი, მაშინ ატომის ელექტრულად ნეიტრალობის საკითხი გართულდებოდა. გარდა ამისა გასათვალისწინებელია აგრეთვე ცდის ჩატარების დროს მუხტის შემდეგი თვისებები: ორგვარობა (ნიშნის თვალსაზრისით), ადიტიურობა, მუდმივობა და ინვარიანტობა.

სიმარტივისათვის გამოვიყენოთ უძრავი მუხტებისათვის კულონის მიერ ჩატარებული ცდის სქემა. ცხადია უძრავ წერტილოვან მუხტზე მოქმედი ძალა პროპორციულია მუხტის სიდიდისა

$$F \sim q \tag{1.1}$$

(1.1) ფორმულა არის ფიზიკური კანონი, რომლის საშუალებითაც შეგვიძლია რაოდენობრივად დავახასიათოთ მუხტი. ორი სხვადასხვა მუხტისათვის ველის მოცემულ წერტილში

$$\frac{F_1}{F_2} = \left|\frac{q_1}{q_2}\right| \qquad (1.2)$$

თუ ერთ-ერთ მუხტს პირობითად ჩავთვლით ერთეულად, გამოვთვლით მეორე მუხტის მნიშვნელობას (მასის რაოდენობრივი განსაზღვრის ანალოგიურად).

მუხტის ერთეულის დასადგენად გავითვალისწინოთ, რომ არსებობს აბსოლუტურ ერთეულთა სისტემა, ანუ გაუსის სისტემა (CGS -სისტემა), რომელშიც ძირითადი ერთეულებია: სიგრძის-სანტიმეტრი; მასის-გრამი და დროის-წამი. ამ სისტემაში მუხტის ერთეული დადგენილია კულონის კანონის გამოყენებით, სიგრძის, მასის და დროის ერთეულების საშუალებით. ამ ერთეულს მუხტის ელექტროსტატიკური ერთეული ქვია და აღინიშნება ასე $CGSE_q$. ორი ასეთი მუხტი ვაკუუმში 1 სმ მანძილზე ერთმანეთზე მოქმედებს 1 დნ (დინი) ძალით (1დნ=10^{-5} ნ).

საერთაშორისო სისტემაში (Si -სისტემაში) ელექტრული მოვლენების დასახასიათებლად, ძირითად ერთეულად, შემოღებულია დენის ძალის ერთეული ამპერი (დენების მაგნიტური ურთიერთქმედების კანონის საფუძველზე), ხოლო მუხტის ერთეული, როგორც წამოებული ერთეული-კულონი, განსაზღვრულია დენის ძალის ფორმულიდან

$$q = It$$

/კულონი არის მუხტი, რომელიც გადის გამტარის განიკვეთში 1 წმ-ში 1 ამპერი მუდმივი დენის დროს/. ექსპერიმენტალურად დასაბუთებულია, რომ:

$$1\text{კ}=3.10^9\, CGSE_q$$

ცხადია ერთეულთა Si -სისტემაში კულონის კანონის ($F = k\frac{|q_1 q_2|}{r^2}$) ფორმულაში პროპორციულობის კოეფიციენტი $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$; სადაც $\varepsilon_0 \approx 8{,}858 * 10^{-12}$ კ²/ნ.მ² არის ვაკუუმის ელექტრული მუდმივა.

ელექტრული მუხტის თვისებები დადგენილია ექსპერიმენტალურად და მჟღავნდება არა დამოუკიდებლად არამედ ერთმანეთთან კავშირში.

უნდა გავიხსენოთ, რომ ბუნებაში არსებობს ორი ნიშნის (პირობითად დადებითი და უარყოფითი); ერთნაირი ნიშნის მუხტები ერთმანეთს განიზიდავს ხოლო საპირისპირო ნიშნის მიიზიდავს.

ატომის ბირთვში შემავალი პროტონების მუხტი მიღებულია დადებითად, ხოლო ელექტრონების მუხტი-უარყოფითად (მათი აბსოლუტური მნიშვნელობა ტოლია და მას ელემენტალური მუხტი ეწოდება). /ისტორიულად დადებითი მუხტი ეწოდა მინაზე აბრეშუმის ქსოვილის ხახუნით წარმოქმნილ მუხტს/.

ნივთიერების ელექტრული სტრუქტურის გარკვევა დაიწყო XIX საუკუნის 80-იანი წლებიდან. მანამდე ელექტრობის დისკრეტული ხასიათის შესახებ ვარაუდი ეკუთვნის ფრანკლინს. 1881 წელს ჰელმჰოლცისა და სტონეის მიერ, 1834 წელს ფარადეის მიერ აღმოჩენილი ელექტროლიზის კანონის გაანალიზებით დაინახეს ელემენტალური ელექტრული მუხტის არსებობა და გამოთვალეს მისი მნიშვნელობა, ხოლო 90-იან წლებში ჰოლანდიელმა ფიზიკოსმა ლორენცმა დაამუშავა ნივთიერების აგებულების ელექტრონული თეორია, რომელიც ემყარებოდა ელექტრონის, როგორც რეალურად არსებული ნაწილაკის ცნებას. ელექტრონი ექსპერიმენტალურად იქმნა აღმოჩენილი 1897 წელს ტომსონის მიერ, რომელმაც გაზომა ელექტრონის ხვედრითი მუხტი $\frac{e}{m}$ ელექტრულ და მაგნიტურ ველებში კათოდური სხივების გადახრის მიხედვით. ნივთიერების ელექტრული სტრუქტურა ნათელი გახდა რეზერფორდის მიერ 1911-13 წლებში ჩატარებული ცდების საფუძველზე, რომელმაც შექმნა ატომის აგებულების პლანეტარული მოდლი.

ნებისმიერი სხეულის მუხტი ჯერადია ელემენტალური ელექტრული მუხტისა $e = 1{,}6.10^{-19}$ კ. ეს ფაქტი ექსპერიმენტალურად განსაზღვრა 1909 წელს მილიკენმა. დამუხტული ელემენტალური ნაწილაკებიდან სტაბილურია მხოლოდ პროტონი, ელექტრონი და მათი ანტინაწილაკები, ყველა დანარჩენი იშლება ძალზე მცირე დროის განმავლობაში და კვარკების მუხტი ნიშნის სიზუსტით $e/3$ და $2e/3$ -ის ტოლია.

§1.3 ველის მათემატიკური თეორიის ელემენტები

ჯერ კიდევ გალილეი წერდა, რომ “ბუნება თავის კანონებს მათემატიკურ ენაზე აყალიბებს”. ისმება კითხვა, რა აუცილებელ მოთხოვნებს უნდა აკმაყოფილებდეს მათემატიკური ენა, რომ მან ფიზიკური მოვლენები ადეკვატურად აღწეროს? ცხადია უპირველესად ეს არის სივრცის თვისებების –ერთგვაროვნობისა და იზოტროპულობის–ამსახველი ინვარიანტობა. ამავე დროს გასათვალისწინებელია, რომ ფიზიკის კანონები არ არის დამოკიდებული კოორდინატთა სისტემის არჩევაზე და რადგანაც მათემატიკის კურსის შესწავლის დროს ზოგიერთი საკითხების განხილვისას, საკითხის ფიზიკურ ასპექტებზე არის ხოლმე ყურადღება გადატანილი, (მაგალითად წარმოებულის და ინტეგრალის ფიზიკური შინაარსის ამოცანების განხილვას დიდი ყურადღება ეთმობა) ამიტომ ველის, როგორც მატერიის ერთ-ერთი სახის, განხილვისას მნიშვნელოვან ყურადღებას დავუთმობთ მის მათემატიკურ მოდელს.

მათემატიკური აზრით ველი ეწოდება სივრცის კოორდინატებისა და დროის ნებისმიერ ფუნქციას, ამათგან ჩვენ შევისწავლით მხოლოდ სკალარულ და ვექტორულ ველებს.

ველს ეწოდება სკალარული თუ ის სივრცის ყოველ წერტილში ხასიათდება ერთი კომპონენტით–სკალარით. სკალარული ველის მაგალითია არათანაბრად გამთბარი გარემოს ტემპერატურის ველი $T(\vec{r},t)$.

ვექტორულ ველს სივრცის ყოველ წერტილში გააჩნია სამი კომპონენტი, რომლებიც განსაზღვრავს ვექტორს. ვექტორული ველის მაგალითია სითხის სიჩქარეთა ველი $\vec{\upsilon}(\vec{r},t)$. თუ ველი არ არის დამოკიდებული დროზე, მას სტაციონარული ეწოდება (ზოგჯერ მას მუდმივ ველსაც უწოდებენ). ხოლო თუ ველი არ არის დამოკიდებული კოორდინატებზე მას ერთგვაროვანი ეწოდება.

ტემპერატურისა და სიჩქარის ველები არ წარმოადგენს ფიზიკურ რეალობას. ველის ცნების გარეშეც შეიძლება შესაბამისი მოვლენების აღწერა. ამ ველებს არ გააჩნია ურთიერთქმედების ფიზიკური მახასიათებლები, რომელთა გაზომვაც შეიძლება.

რაც შეეხება ელექტრომაგნიტურ ველს, რადგან იგი ფიზიკური რეალობაა, მისი ადეკვატური აღწერის მათემატიკურ ენას ველის

მათემატიკური თეორია წარმოადგენს. ჩვენ შემოვიფარგლებით მხოლოდ ვექტორული ანალიზის სათანადო საკითხებით, ამიტომ განვიხილავთ მხოლოდ აუცილებელ საკითხებს (მკაცრი მათემატიკური მტკიცებების გარეშე) ფიზიკური თვალსაზრისით. საკითხების ამ ჯგუფს მიეკუთვნება დიფერენციალური ოპერაციები: **გრადიენტი; დივერგენცია** და **როტორი.** ისინი აკმაყოფილებენ ინვარიანტობის მოთხოვნას და გააჩნიათ კონკრეტული შინაარსი, ამიტომ მათი საშუალებით კარგად აღიწერება ველის ლოკალური თვისებები. ამავე დროს გასათვალისწინებელია, რომ ფიზიკური მოვლენების დამახასიათებელი სიდიდეები (მათემატიკის ენაზე, ფუნქციები) კარგად აკმაყოფილებს უწყვეტობის და დიფერენცირებადობის პირობებს. განვიხილოთ თითოეული მათგანი:

გ რ ა დ ი ე ნ ტ ი; $\varphi(x, y, z)$ სკალარული ფუნქციის გრადიენტი ეწოდება შემდეგ ვექტორს:

$$grad\varphi = \vec{i}\,\frac{\partial\varphi}{\partial x} + \vec{j}\,\frac{\partial\varphi}{\partial y} + \vec{k}\,\frac{\partial\varphi}{\partial z} \qquad (1.3)$$

გავარკვიოთ მისი შინაარსი. ფუნქციის ცვლილება მოცემული წერტილის მახლობლობაში, ცხადია დამოკიდებულია მიმართულებაზე. სრული დიფერენციალი

$$d\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x}dx + \frac{\partial\varphi}{\partial y}dy + \frac{\partial\varphi}{\partial z}dz \qquad (1.4)$$

ხოლო ამავე მიმართულებით სივრცის წერტილთა რადიუსვექტორის ნაზრდი

$$d\vec{r} = \vec{i}\,dx + \vec{j}\,dy + \vec{k}dz \qquad (1.5)$$

(1.3) ;(1.4) და (1.5) ფორმულების შედარებიდან გამომდინარეობს, რომ

$$d\varphi = grad\,\varphi \cdot d\vec{r}$$

ფუნქციის ნაზრდი $d\varphi$ ტოლია $grad\varphi$ და $d\vec{r}$ ვექტორების სკალარული ნამრავლისა. ამიტომ ერთი და იგივე მოდულის მქონე $d\vec{r}$ სხვადასხვა გადაადგილებისათვის $d\varphi$ ნაზრდი უდიდესი იქნება, თუ $grad\varphi$ და $d\vec{r}$ ვექტორების მიმართულება ერთნაირია. ამ მიმართულებით

$$\left|grad\varphi\right| = \left|\frac{\partial\varphi}{\partial r}\right|$$

ამრიგად, სკალარული ფუნქციის გრადიენტი ვექტორია, რომლის მიმართულება გვიჩვენებს ფუნქციის უსწრაფესი ზრდის მიმართულებას, ხოლო მოდული ტოლია ფუნქციის ცვლილების სისწრაფისა ამ მიმართულებით.

სკალარულ ველს თვალსაჩინოდ გამოსახავენ ეგ.წ. ეკვიპოტენციალური (ერთნაირი პოტენციალის) მქონე ზედაპირებით. ასეთ ზედაპირზე გადაადგილებისას $d\varphi=0$ და $grad\varphi$ და $d\vec{r}$ ვექტორები ურთიერთმართობია. კლასიკური მაგალითია კავშირი ძალასა და პოტენციურ ენერგიას შორის:

$$\vec{F}=-gradU$$

ძალა ყოველ წერტილში ეკვიპოტენციალური ზედაპირის პერპენდიკულარულია.

გრადიენტის ჩასაწერად მათემატიკაში იხმარება სამი ტოლფასოვანი აღნიშვნა:

$$grad\varphi\equiv\nabla\varphi\equiv\frac{\partial\varphi}{\partial\vec{r}}$$

სადაც $\nabla=\vec{i}\,\frac{\partial}{\partial x}+\vec{j}\,\frac{\partial}{\partial y}+\vec{k}\,\frac{\partial}{\partial z}$ /ჰამილტონის ოპერატორს უწოდებენ და ის აღნიშნავს მოქმედებას, რომელიც მის მარჯვნივ მყოფ ფუნქციაზე ხორციელდება/.

დ ი ვ ე რ გ ე ნ ც ი ა: ახლა ვექტორული ველის მახასიათებლები განვიხილოთ. ჩვენთვის უკვე ცნობილია ველის გეომეტრიული გამოსახვის ორი ხერხი: ვექტორულ ველს გამოსახავენ ან ისრებით, რომელთა სიგრძე და მიმართულება ახასიათებს ველს იმ წერტილში, საიდანაც ისრები იწყება, ან ველის წირებით (ჩვენთვის უკვე ცნობილია ასეთი წირები –ძალწირები). ეს ისეთი გეომეტრიული წირებია, რომელთა ყოველ წერტილში ვექტორულ ველს მხების მიმართულება აქვს, ხოლო მათი რიცხვი წირების მართობი ზედაპირის ფართობის ერთეულზე (ანუ სიხშირე) პროპორციულია ველის მოდულისა.

თვალსაჩინოებისათვის განვიხილოთ სითხის დინება. გამოვყოთ სითხეში dS ფართობის ელემენტარული ზედაპირი და დავწეროთ გამოსახულება სითხის რაოდენობისა (მოცულობა), რომელიც გადის მასში დროის ერთეულში, ანუ სითხის ნაკადისა: $d\Phi=\upsilon_n dS$ სადაც υ_n არის სითხის სიჩქარის გეგმილი ზედაპირის ნორმალზე. შემოვიტანოთ ვექტორი

$d\vec{S}=\vec{n}dS$, რომლის მოდული ზედაპირის ელემენტის dS ფართობის ტოლია, ხოლო მიმართულება ზედაპირის ნორმალის მიმართულებას ემთხვევა ($\vec{n}$ ზედაპირის ნორმალია). რადგან $\upsilon_n=(\vec{\upsilon}\cdot\vec{n})$ ამიტომ $\upsilon_n dS=(\vec{\upsilon}\cdot d\vec{S})$ და სითხის ნაკადი:

$$d\Phi=(\vec{\upsilon}\cdot d\vec{S})$$

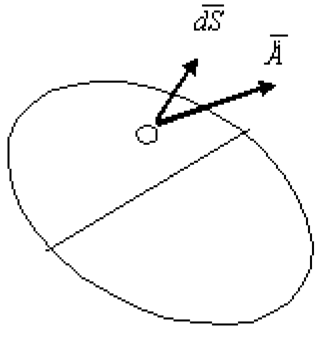
თუ ზედაპირი ჩაკეტილია მაშინ სითხის სრული ნაკადი

$$\Phi=\oint_s(\vec{\upsilon}\cdot d\vec{S})$$

შეთანხმებით დადებითად მიღებულია გარე ნორმალის მიმართულება, ე.ი. ჩაკეტილი ზედაპირიდან გარეთ გამოსული ნაკადი დადებითია, ხოლო შესული –უარყოფითი. თუ განვაზოგადებთ ნაკადის განმარტებას ნებისმიერ $\vec{A}$ ვექტორულ ველზე დავწერთ:

$$\Phi=\oint_s(\vec{A}\cdot d\vec{S}) \qquad (1.6)$$

Φ არის $\vec{A}$ ვექტორული ველის ნაკადი, გამჭოლი S ნებისმიერი ჩაკეტილი ზედაპირისა. იგი არის $\vec{A}$ ველის ინტეგრალური მახასიათებელი–ეკუთვნის მთელ ზედაპირს. ახლა შემოვიღოთ ლოკალური (დიფერენციალური) მახასიათებელი.



ნახ.1.1

S ზედაპირით შემოსაზღვრული V მოცულობა გავყოთ ორ ნაწილად, (ნახ.1.1) გამოვთვალოთ თითოეული ნაწილით შემოსაზღვრული მოცულობებისათვის შესაბამისი ნაკადები, მაშინ მივიღებთ

$$\oint_s(\vec{A}\cdot d\vec{S})=\oint_{s_1}(\vec{A}\cdot d\vec{S}_1)+\oint_{s_2}(\vec{A}\cdot d\vec{S}_2)$$

გავაგრძელოთ V მოცულობის დაყოფა: $\Phi = \sum_i \oint_{s_i} (\vec{A}d\vec{S}_i)$ ვინაიდან დაყოფისას მცირდება როგორც $\oint(\vec{A}dS_i)$ ასევე V_i , განვიხილოთ მათი შეფარდება. ამ შეფარდების ზღვარი არ არის დამოკიდებული მოცულობის ელემენტის ფორმაზე. სწორედ ეს ზღვარი არის ვექტორული ველის სკალარული ლოკალური მახასიათებელი და მას **დივერგენცია** ეწოდება:

$$div\vec{A} = \lim_{V_i \to 0} \frac{1}{V_i} \oint_{s_i} (\vec{A}dS_i)$$

დივერგენცია არის უსასრულოდ მცირე ნებისმიერი ჩაკეტილი ზედაპირის გამჭოლი ნაკადი, მოსული მოცულობის ერთეულზე. /სიმარტივისათვის თუ განვიხილავთ ელემენტარულ კუბს, რომლის მოცულობა dV=dxdydz მაშინ შეგვიძლია დავწეროთ:

$$\oint(\vec{A}d\vec{S}) = (\frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z})dxdydz$$

თუ მიღებულ გამოსახულებას გავყოფთ ელემენტარულ dV მოცულობაზე დივერგენციის განმარტების გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$div\vec{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \qquad (1.7)$$

იგივე ფორმულა მოკლედ ჰამილტონის ოპერატორის გამოყენებით შეგვიძლია ასე ჩავწეროთ

$$div\vec{A} = \nabla\vec{A}$$

(1.7) ფორმულიდან ჩანს, რომ დივერგენცია ახასიათებს ვექტორული ველის ცვლილებას საკუთარი მიმართულების გასწვრივ (დივერგენცია ქართულად განშლადობას ნიშნავს).

ახლა გავეცნოთ მეტად მნიშვნელოვანი ინტეგრალური თეორემის შინაარსს. ნებისმიერი ჩაკეტილი ზედაპირის მიმართ ნაკადი ერთის მხრივ გამოითვლება (1.6) ფორმულით, ხოლო იგივე ნაკადი დივერგენციის განმარტების (დივერგენცია მოცულობის ერთეულზე მოსული ნაკადია) თანახმად არის $\int div\vec{A}dV$ მაშასადამე

$$\oint_s (\vec{A}d\vec{S}) = \int_v div\vec{A}dV \qquad (1.8)$$

(1.8) ფორმულა არის ოსტროგრადსკ-გაუსის თეორემა და იგი სამართლიანია ნებისმიერი ფორმის ზედაპირისათვის.

რ ო ტ ო რ ი; როტორი შემოღებულია ვექტორული ველის პარამეტრების ბრუნვითი მოძრაობის დასახასიათებლად. v სიჩქარით მოძრავი სითხის შემთხვევაში რაიმე ჩაკეტილი წირის მიმართ ცირკულაცია

$$\Gamma = \oint (\vec{v} d\vec{l})$$

სადაც dl არის წირის ელემენტი ე.ი. უსასრულოდ მცირე ვექტორი, რომელსაც მხების მიმართულება აქვს წირის ყოველ წერტილზე.

განვაზოგადოთ ცირკულაციის ცნება ნებისმიერ $\vec{A}$ ვექტორზე:

$$\Gamma = \oint_L (\vec{A} d\vec{l})$$

Γ არის $\vec{A}$ ვექტორის ცირკულაცია ნებისმიერ ჩაკეტილ წირზე (საზოგადოდ ჩაკეტილი წირი ბრტყელი არ არის). იგი ველის ინტეგრალური მახასიათებელია და განსაზღვრულია მთელი კონტურისათვის. ახლა განვიხილოთ დიფერენციალური (ლოკალური) მახასიათებელი, რისთვისაც ჩაკეტილი კონტური გავყოთ ორ ნაწილად (დივერგენციის განხილვისას ჩაკეტილი ზედაპირით შემოსაზღვრული იყო რაღაც მოცულობა, ამჯერად ჩაკეტილი წირით შემოსაზღვრული იქნება რაღაც ფართობი). თუ გავიმეორებთ ანალოგიურ მსჯელობას დავწერთ;

$$\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2$$

თუ გავაგრძელებთ დაყოფას $\Gamma = \sum_i \Gamma_i$ მცირდება როგორც $\Gamma_i = \oint_{L_i} (\vec{A} d\vec{l})$ ინტეგრალი ასევე L_i კონტურით შემოსაზღვრული ზედაპირის ფართობი dS_i . ამიტომ განვიხილოთ Γ_i / S_i შეფარდების ზღვარი, რომელიც სასრულია და არ არის დამოკიდებული ზედაპირის ელემენტის ფორმაზე. (მაგრამ დამოკიდებულია ზედაპირის ორიენტაციაზე).

ზედაპირის ელემენტის ორიენტაცია ხასიათდება ნორმალის მიმართულებით, რომელიც კონტურის შემოვლის მიმართულებას უკავშირდება მარჯვენა ბურღის წესით. მტკიცდება, რომ ზღვარი Γ_i / S_i

ფარდობისა წარმოადგენს ვექტორის გეგმილს ნორმალზე და ეს ვექტორი არის ვექტორული ველის ლოკალური მახასიათებელი და მას ეწოდება როტორი;

$$rot_n\vec{A} = \lim_{Si\to 0}\oint \frac{1}{S_i}(\vec{A}d\vec{l})$$

როტორი მოდულით არის ცირკულაცია უსასრულოდ მცირე ნებისმიერ ჩაკეტილ კონტურზე, მოსული ფართობის ერთეულზე და მართობია იმ სიბრტყისა, რომლისთვისაც ცირკულაცია მაქსიმალურია.

რასაკვირველია, როტორიც გამოისახება კოორდინატებით კერძო წარმოებულების საშუალებით. სიმოკლისათვის ის შეიძლება ასე ჩაიწეროს:

$$rot\vec{A} = \left[\nabla \bullet \vec{A}\right] \tag{1.9}$$

როტორი ახასიათებს ვექტორული ველის მნიშვნელობის ცვლილებას ველისადმი განივი მიმართულებით (როტორი ქართულად ბრუნვას ნიშნავს). ველს, რომლის როტორი ნულისაგან განსხვავდება, გრიგალური ველი ეწოდება.

მსგავსად წინა შემთხვევისა, ცირკულაცია ორი გზით შეგვიძლია გამოვთვალოთ, შესაბამისად მივიღებთ:

$$\oint_L (\vec{A}d\vec{l}) = \int_S rot\vec{A}\cdot d\vec{S} \tag{1.10}$$

(1.10) ფორმულა არის სტოქსის თეორემა. იგი სამართლიანია ნებისმიერი ჩაკეტილი კონტურისათვის, რომელიც შემოსაზღვრავს ნებისმიერ ზედაპირს. კონტურის შემოვლისა და ზედაპირის ნორმალის მიმართულება ერთმანეთს მარჯვენა ბურღის წესით უკავშირდება. აქვე უნდა შევნიშნოთ, რომ განხილული თეორემები სამართლიანია უძრავი კონტურებისა და ზედაპირებისათვის.

§1.4 სუპერპოზიციის პრინციპი. ელექტრული ველის დაძაბულობა.

ჩვენს მიერ განხილული მუხტების ურთიერთქმედებისას განიხილებოდა ერთი დამუხტული სხეულის მეორეზე მოქმედება (ან პირიქით). ახლა დავუშვათ, რომ სივრცეში განხილული ორი ნაწილაკის გარდა მოთავსებულია სხვა დამუხტული სხეულებიც და ვინაიდან ძალა ვექტორული სიდიდეა ამიტომ ტოლქმედი ძალა იქნება ყველა სხეულის მოქმედებათა გეომეტრიული ჯამი, ფორმულით:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + ... + \vec{F}_n \qquad (1.11)$$

სადაც $\vec{F}$ ტოლქმედი ძალა არის რაღაც q მუხტზე დანარჩენი $q_1, q_2, q_3 .... q_n$ მუხტების მოქმედებით განპირობებული ძალა. (1.11) ფორმულით განსაზღვრულ კანონს სუპერპოზიციის (ვექტორული შეკრების) პრინციპი ეწოდება. იმ შემთხვევაში, როცა მუხტი არ არის წერტილოვანი მაშინ

$$\vec{F} = \int d\vec{F}$$

სადაც $d\vec{F}$ არის ცალკეული ელემენტით განპირობებული ძალა.

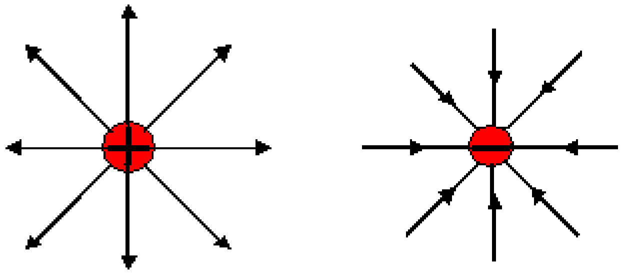
ელექტრული ველის რაოდენობრივი დახასიათებისათვის შემოღებულია ველის დაძაბულობის ცნება, რომელიც ასე განისაზღვრება; **ველის დაძაბულობა მოცემულ წერტილში ტოლია მუხტზე მოქმედი ძალის შეფარდებისა მოცემულ მუხტთან.** /ერთეულოვანი სასინჯი მუხტის შემთხვევაში ველის დაძაბულობა ველის მოცემულ წერტილში რიცხობრივად ერთეულოვან სასინჯ მუხტზე მოქმედი ძალის ტოლია/. ფორმულით ველის დაძაბულობა

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \qquad (1.12)$$

დაძაბულობის მიმართულება დადებით მუხტზე მოქმედი ძალის მიმართულებას ემთხვევა. დაძაბულობის ერთეული *Si* სისტემაში არის 1 ნ/კ (შემდგომში ვნახავთ, რომ აგრეთვე დაძაბულობის ერთეულია 1 ვ/მ).

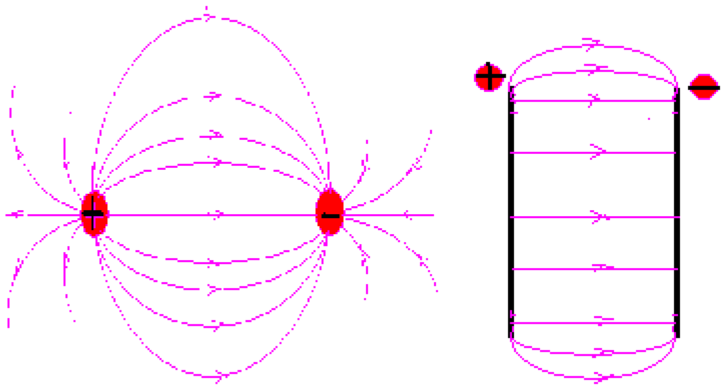
ელექტრული ველის თვალსაჩინოდ წარმოდგენისათვის შემოღებულია ძალწირების ცნება. **ძალწირი ეწოდება წირს, რომლის ნებისმიერ წერტილში გავლებული მხების მიმარ-თულება ემთხვევა ველის მოცემულ წერტილში დაძაბულობის ვექტორის მიმართულებას.** მეორეს მხრივ

სივრცეში ძალწირების რიცხვი (სიხშირე) ტოლია დაძაბულობის ვექტორის მოდულისა. ცალკეული წერტილოვანი მუხტებისათვის ძალწირების სურათი ასეთია (ნახ.1.2)

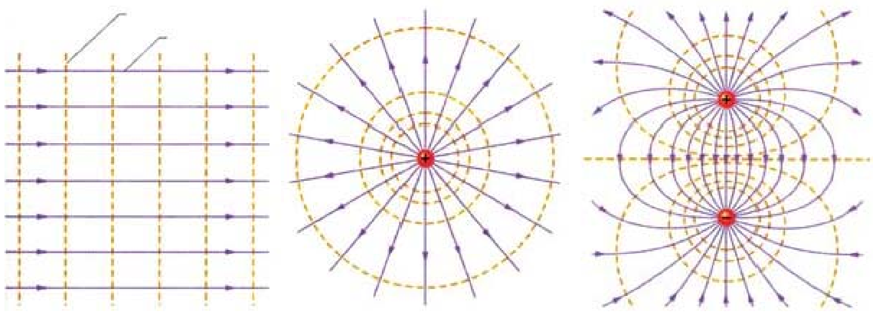


ნახ.1.2

/დადებითი მუხტებიდან რადიალურად გამომავალი, ხოლო უარყოფითი მუხტებისათვის შემავალი წირები/. მუხტების ურთიერთქმედების სურათი ძალწირებით შეიძლება ასე წარმოვიდგინოთ (ნახ.1.3)



ნახ.1.3

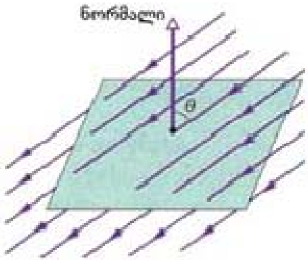


ა) ბ) გ)

ა) ერთგვაროვანი ელექტრული ველის, ბ) წერტილოვანი მუხტით გამოწვეული ველის და გ) ელექტრული დიპოლით გამოწვეული ველის ძალწირები და ეკვიპოტენციური ზედაპირების განივი კვეთები

§1.5 დაძაბულობის ნაკადი. გაუსის თეორემა

დაძაბულობის ვექტორის საშუალებით ელექტრული ველის დახასიათება, ხშირად მათემატიკურ სირთულეებთან არის დაკავშირებული, ამოცანის გამარტივების მიზნით ხელსაყრელია დაძაბულობის ვექტორის ნაკადის გამოყენება. საზოგადოდ



ნებისმიერი ვექტორის ნაკადი რაიმე ზედაპირზე, ზედაპირის მართობულად, ფართობის ერთეულში გამავალი ძალწირების რიცხვის ტოლია. ფორმულით, რაიმე $\vec{A}$ -ის ნაკადი dS ზედაპირზე

$$d\Phi = A_n dS = AdS\cos\alpha$$

სადაც α არის კუთხე ზედაპირის ნორმალსა და $\vec{A}$ -ს შორის. ანალოგიურად ელექტრული დაძაბულობის ვექტორის ნაკადისათვის გვექნება

$$d\Phi = E_n dS = EdS\cos\alpha$$

ხოლო სრული ნაკადი

$$\Phi = \int E_n dS = \int_s E\cos\alpha dS$$

/თუ ზედაპირის ფართობს ჩავწერთ ვექტორულად, ზედაპირის დადებითი ნორმალის საშუალებით,

$$d\vec{S} = dS\vec{n}$$

მაშინ ნაკადი

$$\Phi = \int (\vec{E}d\vec{S})$$

ჩაკეტილი ზედაპირის შემთხვევაში კი

$$\Phi = \oint (\vec{E}d\vec{S})$$

სიმარტივისათვის ჯერ გამოვთვალოთ r რადიუსიანი სფეროს ცენტრში მოთავსებული q მუხტის დაძაბულობის ნაკადი:

$$\Phi = \oint(\vec{E}d\vec{S}) = E\oint dS = ES = k\frac{q}{r^2}4\pi r^2 = 4\pi kq$$

ან კიდევ k კოეფიციენტის გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$\Phi = 4\pi\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}q = \frac{q}{\varepsilon_0} \qquad (1.13)$$

(1.13) ფორმულა გვიჩვენებს, რომ ნაკადის მნიშვნელობა არ არის დამოკიდებული ზედაპირის ფორმაზე და ზედაპირამდე მანძილზე. მართლაც თუ რაიმე ჩაკეტილი ზედაპირის შიგნით მოთავსებული იქნებოდა რაღაც q_1 და q_2 მუხტები მაშინ ნაკადის განმარტების თანახმად

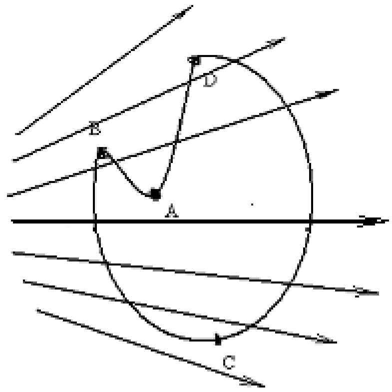
$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 = \oint(\vec{E}_1 d\vec{S}) + \oint(\vec{E}_2 d\vec{S}) = \frac{q_1}{\varepsilon_0} + \frac{q_2}{\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

სადაც $q = q_1 + q_2$ იმ შემთხვევაში, როცა ჩაკეტილი ზედაპირის შიგნით მოთავსებულია $q_1, q_2, ...q_n$ წერტილოვანი მუხტები მაშინ სრული ნაკადი განისაზღვრება $q = \sum_{i=1}^{n} q_i$ სიდიდით და (1.13) ფორმულა ასე ჩაიწერება

$$\Phi = \oint(\vec{E}d\vec{S}) = 4\pi kq = \frac{\sum_{i=1}^{n} q_i}{\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon_0} \qquad (1.14)$$

(1.14) ფორმულა სარმოადგენს გაუსის თეორემის შესაბამის ფორმულას, გაუსის თეორემა ასე ჩამოყალიბდება: **დაძაბულობის ვექტორის ნაკადი ჩაკეტილი ზედაპირის მიმართ ტოლია ზედაპირის შიგნით არსებული მუხტების ალგებრული ჯამი გაყოფილი ვაკუუმის ელექტრულ მუდმივზე.**

გაუსის თეორემის სამართლიანობა შეგვიძლია ვაჩვენოთ ნებისმიერი ელექტრული ველისათვის. ნახაზზე მოცემულია რაღაც ზედაპირი, რომელიც მოთავსებულია ელექტრულ ველში. ზედაპირი დავყოთ პირობითად $AB; BC; CD; DA$ უბნებად, /გავითვალისწინოთ, რომ წირების სიხშირე რიცხობრივად დაძაბულობის ნაკადის ტოლია და ზედაპირიდან გამოსული ძალწირი ჩავთვალოთ დადებითად, ხოლო ზედაპირში შესული კი უარყოფითად/, (ნახ.1.4).



ნახ.1.4

განმარტების თანახმად სრული ნაკადი

$$\Phi = \Phi_{AB} + \Phi_{BC} + \Phi_{CD} + \Phi_{DA}$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ

$$\Phi_{AB} = 1; \Phi_{BC} = -4; \Phi_{CD} = 5; \Phi_{DA} = -2$$

მაშინ $\Phi = 1 - 4 + 5 - 2 = 0$ მართლაც განხილული ზედაპირის შიგნით მუხტის მნიშვნელობა $q = 0$ და სამართლიანია გაუსის თეორემა.

(1.14) ფორმულით ჩაწერილი $\oint(\vec{E}d\vec{S}) = 4\pi kq$ გაუსის თეორემა არის მაქსველის ელექტროდინამიკის განტოლებათა სისტემის ერთ-ერთი ძირითადი განტოლება.

§1.6 ელექტრომაგნიტური ველის მდგომარეობა

ის ფაქტი, რომ ელექტრომაგნიტური ველით ხდება ურთიერთქმედების გადაცემა წერტილიდან წერტილში სასრული სიჩქარით, განაპირობებს რომ ველი დავახასიათოთ ლოკალური სიდიდეებით, რომლებიც სივრცის წერტილებშია განსაზღვრული დროის ნებისმიერ მომენტში.

ცდებით მტკიცდება, რომ ელექტრომაგნიტური ველის მდგომარეობა ხასიათდება, სივრცის წერტილთა კოორდინატებისა და დროის ორი ვექტორული ფუნქციით: $\vec{E}(\vec{r},t)$ ელექტრული ველის დაძაბულობით და $\vec{B}(\vec{r},t)$ მაგნიტური ველის ინდუქციით რომლებიც თავის მხრივ დამოკიდებული არიან სივრცის წერტილთა რადიუსვექტორსა და დროზე.

შემდგომში სიმოკლისათვის ელექტრულ ველს აღვნიშნავთ $\vec{E}$ ხოლო მაგნიტურ ველს $\vec{B}$ ვექტორით რომლებიც სივრცითი კოორდინატებისა და დროის უწყვეტი ფუნქციებია /ველის კლასიკური განმარტების მიხედვით/. კვანტური ფიზიკის თანახმად ურთიერთქმედება ხორციელდება კვანტების გაცვლის მეშვეობით, დისკრეტულად. ველის კლასიკური აღწერა სამართლიანია მხოლოდ იმ პირობით, რომ ცალკეული კვანტების მოქმედება არ მჟღავნდება, იგი უმნიშვნელოა ჯამურ მოქმედებასთან შედარებით.

$\vec{E}(\vec{r},t)$ და $\vec{B}(\vec{r},t)$ ფუნქციებს, რომლებიც აღწერს სივრცეში ელექტრომაგნიტური ველის განაწილებას ნებისმიერ მომენტში, ვპოულობთ ველის განტოლებების (მაქსველის განტოლებათა სისტემის) ამოხსნით, ხოლო ველის მდგომარეობა დროის ფიქსირებულ მომენტში განისაზღვრება საწყისი პირობების გათვალისწინებით.

$\vec{E}(\vec{r},t)$ და $\vec{B}(\vec{r},t)$ ვექტორების განსაზღვრისათვის ვისარგებლოთ უკვე ცნობილი მეთოდით; კერძოდ გამოვიყენოთ შესაბამისი ფიზიკური კანონი და განვიხილოთ სასინჯი მუხტის მოძრაობა ელექტრომაგნიტურ ველში და გავზომოთ სხვადასხვა წერტილში მასზე მოქმედი ძალა.

მექანიკიდან ვიცით, რომ ძალა არის იმპულსის წარმოებული დროით (იგულისხმება რელატივისტური იმპულსი), დავწერთ:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F} \tag{1.15}$$

სადაც $\vec{P} = \dfrac{m\vec{\upsilon}}{\left(1 - \dfrac{\upsilon^2}{c^2}\right)^{1/2}}$ რელატივისტური იმპულსია. ფარდობითობის თეორიის თანახმად ამ განტოლებას ერთნაირი სახე აქვს ათვლის ყველა ინერციული სისტემის მიმართ. (1.15) ფორმულის მარცხენა მხარე დამოკიდებულია მოძრაობის სიჩქარეზე ცხადია მარჯვენა მხარეც (ძალა) დამოკიდებული იქნება მოძრაობის სიჩქარეზე. თუ გავითვალისწინებთ, რომ ელექტრომაგნიტურ ველში დამუხტულ ნაწილაკზე მოქმედებს ელექტრული და მაგნიტური ველები, რომელთაგან ელექტრული ველის მოქმედება არ არის დამოკიდებული მუხტის მოძრაობის სიჩქარეზე, მაგნიტური ველის შემთხვევაში კი, ძალა დამოკიდებულია მოძრაობის სიჩქარეზე, ე.ი. ძალა

ტოლია ორი ვექტორული წევრის ჯამისა, რომელთაგან ერთი არ არის დამოკიდებული სიჩქარეზე, მეორე კი დამოკიდებულია.

$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m \tag{1.16}$$

$\vec{F}_e$ სიჩქარეზე დამოუკიდებელ წევრს ელექტრული ძალა ეწოდება და იგი განსაზღვრავს ელექტრულ ველს

$$\vec{F}_e = q\vec{E} \tag{1.17}$$

ხოლო, $\vec{F}_m$ -მაგნიტური ძალაა და იგი დამოკიდებულია ნაწილაკის სიჩქარის როგორც მოდულზე ისე მიმართულებაზე, ყოველთვის მართობია სიჩქარისა და განსაზღვრავს $\vec{B}$ მაგნიტურ ველს

$$\vec{F}_m = q\left[\vec{\upsilon} \bullet \vec{B}\right] \tag{1.18}$$

გაუსის (CGSE) ერთეულთა სისტემაში

$$\vec{F}_m = \frac{1}{c} q\left[\vec{\upsilon} \bullet \vec{B}\right] \tag{1.18*}$$

სადაც c ურთიერთქმედების გადაცემის სიჩქარეა, υ ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარე. ამ ფორმულით კარგად ჩანს მაგნიტური ველის რელატივისტური ბუნება. ძალა ინვარიანტული რომ ყოფილიყო, როგორც ნიუტონის მექანიკაში, სიჩქარეზე დამოკიდებულება არ გვექნებოდა და მაგნიტიზმი არ იარსებებდა.

(1.16) ფორმულა შეგვიძლია ასე გადავწეროთ:

$$\vec{F} = q\vec{E} + \frac{1}{c} q\left[\vec{\upsilon} \bullet \vec{B}\right] \tag{1.19}$$

(1.19) ფორმულით განსაზღვრულ ძალას ლორენცის ძალა ეწოდება, იგი არის ფიზიკის ფუნდამენტური კანონი და განსაზღვრავს $\vec{E}$ და $\vec{B}$ ველებს.

ში- სისტემაში

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\left[\vec{\upsilon} \bullet \vec{B}\right]$$

ელექტრომაგნიტურ ველში უძრავ სასინჯ მუხტზე მოქმედი ძალა $\vec{F} = \vec{F}_e$ და განვსაზღვრავთ $\vec{E}$ ელექტრულ ველს, $\vec{E}$-ს მიმართულება ემთხვევა დადებით მუხტზე მოქმედი ძალის მიმართულებას და რიცხობრივად ერთეულოვან დადებით მუხტზე მოქმედი ძალის ტოლია.

მაგნიტური ძალის მნიშვნელობა

$$\vec{F}_m = \vec{F} - \vec{F}_e$$

(1.18*) ფორმულის სკალარული ჩაწერით მივიღებთ:

$$cF_m = |q\upsilon_1|B$$

სადაც $\upsilon_1 = \upsilon \sin\alpha$ არის სიჩქარის გეგმილი $\vec{B}$ -ის მართობზე. $\vec{B}$ -ის მიმართულება მარჯვენა ბურღის წესით განისაზღვრება; თუ ბურღის ტარს მოვაბრუნებთ დადებითი მუხტის $\vec{\upsilon}$ დან $\vec{B}$ -კენ უმცირესი კუთხით, ბურღის გადატანითი მოძრაობის მიმართულება დაემთხვევა $\vec{F}_m$ -ის მიმართულებას. ვინაიდან ძალა და სიჩქარე ნამდვილი ვექტორებია, ბურღის წესიდან გამომდინარეობს, რომ $\vec{B}$ -ფსევდოვექტორია.

ელექტრომაგნიტური ველის ერთიანობა ბუნებრივად მოითხოვს, რომ $\vec{E}$ და $\vec{B}$ ვექტორებს ერთნაირი განზომილება ჰქონდეთ. ეს მოთხოვნა დაცულია გაუსის (CGSE) სისტემაში, რასაც განაპირობებს c-ს არსებობა.

(1.19) ფორმულიდან გაუსის სისტემაში ელექტრული დაძაბულობის ერთეულია დინი გაყოფილი მუხტის ელექტროსტატიკურ ერთეულზე, (ხოლო Si სისტემაში –ნ/კ=ვ/მ).

$$1\ \text{დნ}/\text{CGSE}_q = 3.10^4\ \text{ვ/მ}$$

მაგნიტური ინდუქციის ერთეულს გაუსის სისტემაში გაუსი ეწოდება, 1 გაუსი ისეთი მაგნიტური ინდუქციაა, რომელიც ველის მართობულად 1 სმ/წმ სიჩქარით მოძრავ 1 CGSE_q წერტილოვან მუხტზე მოქმედებს 1/c დინი ძალით. Si სისტემაში მაგნიტური ინდუქციის ერთეულია ტესლა (ტლ). 1 ტესლა ინდუქციის ველი მის მართობულად 1 მ/წმ სიჩქარით მოძრავ 1 კულონ წერტილოვან მუხტზე 1 ნ ძალით მოქმედებს.

$$1\ \text{ტლ} = 10^5\text{დნ}.3.10^{10}(\text{სმ/წმ})/3.10^9\text{CGSE}_q.10^2\ \text{სმ/წმ} = 10^4\ \text{გაუსი}$$

/ცნობისათვის შევნიშნოთ, რომ დედამიწის მაგნიტური ველი დაახლოებით ნახევარი გაუსია, ხოლო ელექტრული ველი 10^2 ვ/მ –რიგისაა. ატომბირთვში ველი 10^{11} -10^{17} ვ/მ –რიგისაა/.

თუ (1.15) ფორმულაში გავითვალისწინებთ ძალის მნიშვნელობას და გამოსახულებას სკალარულად გავამრავლებთ $\vec{\upsilon}$ -სიჩქარეზე, გავითვალისწინებთ აგრეთვე, რომ $(\vec{\upsilon}[\vec{\upsilon} \bullet \vec{B}]) = 0$ მივიღებთ:

$$(\vec{\upsilon}\frac{d\vec{P}}{dt}) = q\upsilon E$$

მეორეს მხრივ რელატივისტური მექანიკიდან ცნობილია, რომ

$$(\vec{\upsilon}\frac{d\vec{P}}{dt}) = \frac{dW}{dt}$$

სადაც $W = \dfrac{mc^2}{(1-\frac{\upsilon^2}{c^2})^{1/2}}$ ნაწილაკის ენერგიაა, მივიღებთ:

$$\frac{dW}{dt} = qE\upsilon \tag{1.20}$$

(1.20) ფორმულა გვიჩვენებს, რომ ნაწილაკის ენერგიას ცვლის მხოლოდ ელექტრული ველი. ნაწილაკის ენერგიის ცვლილების სისწრაფე (სიმძლავრე) ტოლია ელექტრული ველის სიმძლავრისა, ხოლო მაგნიტური ველი ნაწილაკის გადაადგილებაზე მუშაობას არ ასრულებს, რადგანაც მაგნიტური ძალა ყოველთვის ნაწილაკის სიჩქარის მართობულად მოქმედებს და მხოლოდ მის მიმართულებას ცვლის.

თავი II. ელექტრული მუხტის მუდმივობის კანონი

§2.1 მუხტისა და დენის სიმკვრივე. დენის ძალა.

თანამედროვე ფიზიკური ექსპერიმენტები უჩვენებს, რომ ბუნებაში არსებობს დამუხტული ელემენტარული ნაწილაკები, რომლებიც ურთიერთგარდაიქმნებიან; წარმოიშობიან, წარმოქმნიან სხვა ნაწილაკებს, ქრებიან. მთელი უზარმაზარი ექსპერიმენტული მასალა უჩვენებს, რომ ნებისმიერი ურთიერთქმედებისას სრული მუხტი უცვლელია. თვალსაჩინოებისათვის განვიხილოთ მაგალითი;

ვაკუუმში მოვათავსოთ თხელკედლიანი ყუთი და დავასხივოთ γ კვანტებით, ყუთი ჩაკეტილი სისტემაა, რომლის საზღვრებს ვერ გადაკვეთს ნივთიერება, ხოლო ელექტრომაგნიტური ველი (γ -სხივები) თავისუფლად განჭოლავს. ცდა გვიჩვენებს, რომ ყუთში შეიძლება განხორციელდეს რეაქცია, რომლის შედეგადაც γ კვანტი შთაინთქმება და მის ნაცვლად რომელიმე წერტილში ერთდროულად წარმოიქმნება ელექტრონ–პოზიტრონის წყვილი (პოზიტრონი დადებითი ელექტრონია).

$$\gamma \rightarrow e^{+} + e^{-}$$

რადგან γ კვანტი ელექტრულად ნეიტრალურია, სრული მუხტი არ იცვლება არც ყუთის შიგნით არც ყუთის გარეთ. ცხადია სამართლიანია მუხტის შენახვის კანონი: **ჩაკეტილი სისტემის სრული მუხტი მუდმივი სიდიდეა.**

$$\sum_{i=1}^{n} q_i = const \qquad (2.1)$$

მუხტის მუდმივობის კანონის ასეთი ჩაწერისას არ არის გამოყენებული ველის მათემატიკური ენა, რაც გარკვეული თვალსაზრისით აუცილებელია. ახლა გავარკვიოთ ველის მათემატიკური ენის აუცილებლობა.

დავუშვათ, ჩაკეტილი სისტემის რომელიმე წერტილში გაქრა მუხტის გარკვეული რაოდენობა და ერთდროულად წერტილში წარმოიშვა მუხტის ისეთივე რაოდენობა. ცხადია, (2.1) ტოლობა არ დაირღვევა. მაგრამ ერთდროულობა ხომ ფარდობითია? ამიტომ სხვა ინერციული სისტემის

მიმართ დაირღვეოდა მუხტის მუდმივობის კანონი. ასეთი პროცესები ბუნებაში არ ხდება და მაშასადამე (2.1) ჩაწერა არასრულფასოვანია.

ველის მათემატიკურ ენაზე გადასასვლელად საჭიროა შემოვიღოთ სათანადო ფიზიკური სიდიდეები.

1. **მუხტის უწყვეტი განაწილება.** მაკროსკოპულ მოვლენებში ელემენტარული მუხტების უამრავი რაოდენობა მონაწილეობს და მათი დისკრეტულობა არ იგრძნობა, ამიტომ ხშირ შემთხვევაში შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ მუხტი თითქოს უწყვეტადაა განაწილებული სივრცეში და ყურადღება არ მივაქციოთ მის დისკრეტულობას. მუხტის უწყვეტ განაწილებას ახასიათებენ ლოკალური სიდიდით–მუხტის სიმკვრივით. გამოვყოთ ფიზიკურად მცირე მოცულობა: მისი ზომა, ერთი მხრივ, გაცილებით აღემატება ატომისას–შეიცავს მრავალ ელემენტარულ მუხტს, მეორე მხრივ, ბევრად ნაკლებია მაკროსკოპული არაერთგვაროვნების ზომაზე, ე.ი. იმდენად მცირეა, რომ მისი მდებარეობა სივრცეში საკმაოდ ზუსტად ხასიათდება მისი რომელიმე წერტილის კოორდინატებით. ΔV ფიზიკურად მცირე მოცულობაში t დროის მომენტში მოქცეული სრული მუხტი $\Delta q=\sum_{\Delta V} e_i$, სადაც e_i ელემენტარული მუხტია, ნიშნის გათვალისწინებით. ეს სიდიდეები მათემატიკურად დიფერენციალებად უნდა ჩავთვალოთ, ხოლო მათი შეფარდება გვაძლევს, სივრცითი კოორდინატისა და დროის უწყვეტ, მდოვრე ფუნქციას- მუხტის სიმკვრივეს.

$$\rho(\vec{r},t)=\sum_{\Delta V}\frac{e_i}{\Delta V}=\frac{dq}{dV} \qquad (2.2)$$

მუხტის სიმკვრივე ტოლია ფიზიკურად მცირე მოცულობის მუხტის შეფარდებისა ამ მოცულობასთან, ანუ რიცხობრივად უდრის მცირე მოცულობის მუხტს, მოსულს მოცულობის ერთეულზე.

მუხტის სიმკვრივე სკალარული სიდიდეა. გაუსის სისტემაში მისი ერთეულია $CGSE_q$/სმ^3, ხოლო Si სისტემაში–კ/მ^3.

t მომენტში V მოცულობაში მოთავსებული სრული მუხტი

$$q=\int_V \rho(\vec{r},t)dV \qquad (2.3)$$

თუ მუხტი განაწილებულია თხელ ფენაში რაიმე ზედაპირის მახლობლად, მაშინ მუხტის ზედაპირული სიმკვრივე (მუხტის მოცულობითი სიმკვრივის ანალოგიურად)

$$\sigma = \sum_{\Delta S} \frac{e_i}{\Delta S} = \frac{dq}{dS} \qquad (2.4)$$

ანალოგიურად შეიძლება მუხტის წირითი სიმკვრივის ცნების შემოღება

$$\lambda = \sum_{\Delta l} \frac{e_i}{\Delta l} = \frac{dq}{dl}$$

(2.4) ფორმულის გამოყენებით რაიმე S ზედაპირზე სრული მუხტი

$$q = \int_S \sigma . dS \qquad (2.5)$$

განვსაზღვროთ მუხტის კონცენტრაციაც. მოცემული ნიშნის მუხტის კონცენტრაცია ტოლია ფიზიკურად მცირე მოცულობაში დამუხტული ნაწილაკების რიცხვის შეფარდებისა ამ მოცულობასთან.

$$n = \frac{dN}{dV}$$

კონცენტრაციის მიხედვით მუხტის სიმკვრივე:

$$\rho = \rho^+ + \rho^- = n^+ e^+ + n^- e^- \qquad (2.6)$$

2. **მუხტის გადატანა**: დამუხტული ნაწილაკების მოწესრიგებულ მოძრაობას დენი ეწოდება (რასაკვირველია დენის ცნება არ უნდა დავუკავშიროთ მხოლოდ სადენს, ვაკუუმში მოძრავი ელექტრონების ნაკადიც დენია). ასეთი მოძრაობისას ხდება მუხტის გადატანა. შემოვიღოთ ლოკალური სიდიდე–დენის სიმკვრივე, რომელიც ახასიათებს მუხტის გადატანას. თუ dS ზედაპირის ნორმალის გასწვრივ მოძრავი მუხტების სიჩქარეს აღვნიშნავთ υ_n -ით, მაშინ dt დროში იმავე ზედაპირში გასული ელექტრული მუხტი

$$dq = \rho \upsilon_n dS dt = \rho(\vec{\upsilon} \cdot d\vec{S})dt$$

ხოლო დენის სიმკვრივე ეწოდება ლოკალურ სიდიდეს

$$\vec{j}(\vec{r},t) = \rho(\vec{r},t)\vec{\upsilon} \qquad (2.7)$$

მაშინ

$$dq = (\vec{j} \cdot d\vec{S})dt$$

დენის სიმკვრივის მოდული რიცხობრივად უდრის ფიზიკურად მცირე ზედაპირში მცირე დროში ზედაპირის მართობულად გასული მუხტის რაოდენობას, მოსულს ფართობისა და დროის ერთეულზე.

$\vec{j}(\vec{r},t)$ ნამდვილი ვექტორია, მისი მიმართულება ემთხვევა დადებითად დამუხტული ნაწილაკის მოძრაობის მიმართულებას.

დენის სიმკვრივის ერთეულებია: გაუსის სისტემაში $CGSE_q$/სმ^2.წმ=$CGSE_I$/სმ^2 ; ხოლო Si სისტემაში–კ/მ^2.წმ=ა/მ^2

თუ დენის შექმნაში მონაწილეობს ორივე ნიშნის მუხტი, მაშინ (2.7) ფორმულა (გავითვალისწინოთ აგრეთვე (2.6) ფორმულა) ასე გადაიწერება:

$$\vec{j} = \vec{j}^{+} + \vec{j}^{-} = e^{+}n^{+}\vec{\upsilon}^{+} + e^{-}n^{-}\vec{\upsilon}^{-}$$

რაც შეეხება ზედაპირზე განაწილებული მუხტის გადატანას, მას ახასიათებენ დენის ზედაპირული სიმკვრივით, ფორმულით:

$$\vec{i} = \sigma.\vec{\upsilon}$$

დენის ზედაპირული სიმკვრივე გვიჩვენებს მცირე დროში ზედაპირზე გავლებული მცირე სიგრძის წრფის მართობულად გადატანილი მუხტის რაოდენობას, მოსულს სიგრძისა და დროის ერთეულზე.

ჩვენს მიერ შემოტანილი ლოკალური სიდიდეებით, შემოვიტანოთ ჩვენთვის კარგად ცნობილი დენის ძალის ფორმულა, რისთვისაც გავიხსენოთ, რომ დენის ძალა არის ფიზიკური სიდიდე , რომელიც ტოლია გამტარის განიკვეთში დროის ერთეულში გასული მუხტისა (გავითვალისწინოთ აგრეთვე დენის სიმკვრივე) დავწერთ:

$$dI = \frac{dq}{dt} = (\vec{j} \cdot d\vec{S})$$

ხოლო სრული დენი

$$I = \int dI = \int (\vec{j} \cdot d\vec{S}) \qquad (2.8)$$

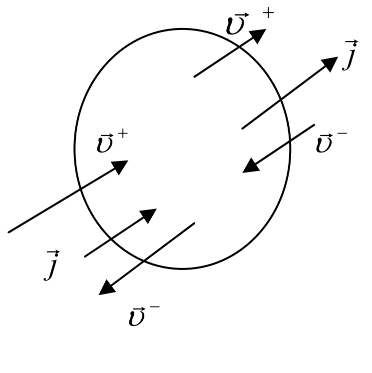
მაშასადამე ველის მათემატიკური თეორიის ენაზე I დენის ძალა $\vec{j}$ ვექტორული ველის ინტეგრალური ნაკადია, რომელიც S ფართობის ზედაპირს განჭოლავს. (როდესაც ზედაპირი ჩაკეტილია, დენის ძალის ნიშანი განისაზღვრება გარე ნორმალის მიმართულებით, ხოლო ღია ზედაპირის შემთხვევაში კი ნებისმიერად ირჩევენ დადებით მიმართულებას).

დენის ძალის ერთეულებია: გაუსის სისტემაში $CGSE_q$/წმ=$CGSE_I$, ხოლო Si სისტემაში–ამპერი, რომელიც ერთ-ერთი ძირითადი ერთეულია და დადგენილია დენების მაგნიტური ურთიერთქმედების, ამპერის კანონის, საფუძველზე 1 ა=3.10^9 $CGSE_I$

§2.2 უწყვეტობის განტოლება

მუხტის მუდმივობის კანონის ინტეგრალური სახის დასადგენად დავეყრდნოთ შემდეგ იდეას: თუ რაიმე მოცულობაში მუხტი შეიცვალა, ცვლილების ერთადერთი მიზეზი, როგორც ცდა გვიჩვენებს, შეიძლება იყოს ამ მოცულობის შემომსაზღვრელი ჩაკეტილი ზედაპირიდან მუხტის გამოდინება ან პირიქით მასში შესვლა. მოცულობის შიგნით სრული მუხტის ცვლილებას ახასიათებს $\frac{dq}{dt}$ სიდიდე, ხოლო ჩაკეტილი ზედაპირის გამჭოლი მუხტის რაოდენობას მუხტის ნაკადი, ანუ დენის ძალა (2.8). /ნახაზიდან (2.1)/ ჩანს, თუ ნაკადი გარეთ გამოედინება $I > 0$ (დადებითი მუხტი გარეთ გამოდის, უარყოფითი შედის) მაშინ ზედაპირის შიგნით სრული მუხტი მცირდება. $\frac{dq}{dt} < 0$ ამგვარად:

$$-\frac{dq}{dt} = I \qquad (2.9)$$



ნახ.2.1

(2.9) ნიშნავს, რომ მუხტის ცვლილება შიგნით და გარეთ ერთმანეთს აკომპენსირებს და მაშასადამე ჩაკეტილი სისტემის სრული მუხტი მუდმივია. ასეთ განხილვაში გამორიცხულია არარსებული პროცესი მუხტის ერთდროული წარმოშობა - გაქრობისა (სხვადასხვა წერტილში),

რომელსაც შეიცავს (2.1) ფორმულა. (2.3) და (2.8) ფორმულების გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$-\frac{d}{dt}\int_V \rho(\vec{r},t)dV = \oint_S (\vec{j}(\vec{r},t)\cdot d\vec{S}) \qquad (2.10)$$

(2.10) ფორმულა არის მუხტის მუდმივობის კანონის ინტეგრალური სახე, რომელიც შეიძლება ასე გავიგოთ: რაიმე მოცულობაში სრული მუხტის ცვლილების სისწრაფე ტოლია ამ მოცულობის შემომსაზღვრელი ნებისმიერი ჩაკეტილი ზედაპირის გამჭოლი დენის ძალისა (მუხტის ნაკადისა) შებრუნებული ნიშნით.

ახლა დავადგინოთ (2.10) ფორმულის დიფერენციალური (ლოკალური) სახე: თუ გავითვალისწინებთ ოსტროგრადსკ-გაუსის თეორემის (1.8) ფორმულას დავწერთ:

$$\oint_S (\vec{j}\cdot d\vec{S}) = \int_V div\vec{j}\cdot dV$$

S ზედაპირი და V მოცულობა დროის მიხედვით არ იცვლება ($\vec{r}$ არის სივრცის უძრავი წერტილების რადიუსვექტორი), ამიტომ (2.10) ფორმულის მარცხენა მხარის ინტეგრალში შეიძლება შევიტანოთ დროითი წარმოებული (ცხადია კერძო წარმოებულის სახით), მაშინ წევრების დაჯგუფების შემდეგ დავწერთ:

$$\int_V (\frac{\partial\rho}{\partial t} + div\vec{j})dV = 0$$

მიღებული ტოლობა სამართლიანია ნებისმიერი მოცულობისათვის, ამიტომ ინტეგრალქვეშა გამოსახულება იგიურად უდრის ნულს, რაც ნიშნავს

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + div\vec{j} = 0 \qquad (2.11)$$

(2.11) ფორმულა არის მუხტის მუდმივობის კანონი დიფერენციალური (ლოკალური) სახით და მას უწყვეტობის განტოლებასაც უწოდებენ. (ასეთი სახელწოდება სითხეების უწყვეტობის პირობის ანალოგიიდან გამომდინარეობს).

სტაციონარული მოძრაობის შემთხვევაში, მუხტის სიმკვრივე ცხადად არ არის დამოკიდებული დროზე ე.ი. $\frac{\partial\rho}{\partial t} = 0$ მაშინ დაგვრჩება:

$$div\vec{j} = 0 \qquad (2.12)$$

თუ გავიხსენებთ დივერგენციის განმარტებას მაშინ (2.11) ფორმულა შეიძლება ასე განვმარტოთ: სივრცის მოცემული წერტილის მახლობლად მუხტის სიმკვრივის ცვლილების სისწრაფე შებრუნებული ნიშნით ტოლია ამ წერტილის შემცველი უსასრულოდ მცირე ნებისმიერი ჩაკეტილი ზედაპირის გამჭოლი მუხტის ნაკადისა, რომელიც მოდის მოცულობის ერთეულზე. ეს კი იგივეა რასაც (2.10) ინტეგრალური განტოლება იძლევა.

§ 2.4 გაუსის კანონის გამოყენება

გაუსის კანონის ფორმულა (1.14) ოსტროგრადსკ-გაუსის თეორემის (1.8) ფორმულის გამოყენებით ასე გადავწეროთ:

$$\oint_S (\vec{E}d\vec{S}) = \int_V div\vec{E}dV$$

და შევიტანოთ მასში (2.3) ფორმულით განსაზღვრული მუხტის მნიშვნელობა, მივიღებთ:

$$\int (div\vec{E} - 4\pi k\rho)dV = 0 \qquad (2.26)$$

ეს ინტეგრალი ნულის ტოლია ნებისმიერი მოცულობისათვის ამიტომ ინტეგრალქვეშა გამოსახულება იგიურად უდრის ნულს ე.ი.

$$div\vec{E} = 4\pi k\rho \qquad (2.27)$$

(2.27) ფორმულა არის გაუსის კანონის დიფერენციალური სახე. იგი წარმოადგენს კულონის კანონისა და სუპერპოზიციის ლოკალურ ჩანაწერს.

თანაბარწრფივად მოძრავი წერტილოვანი მუხტის ელექტრული ველი ისევე, როგორც უძრავისა, მანძილის კვადრატის უკუპროპორციულია. ბუნებრივია ისმის კითხვა: გაუსის კანონი, განსხვავებით კულონის კანონისაგან, მოძრავი მუხტისათვისაც ხომ არ არის მართებული?

მარტივი მსჯელობით დავრწმუნდებით, რომ გაუსის თეორემა მართებულია თანაბარწრფივად მოძრავი წერტილოვანი მუხტისათვისაც, რაც იმას მიუთითებს, რომ გაუსის კანონი ზოგადია და სამართლიანია ნებისმიერი ელექტრული ველისათვის.

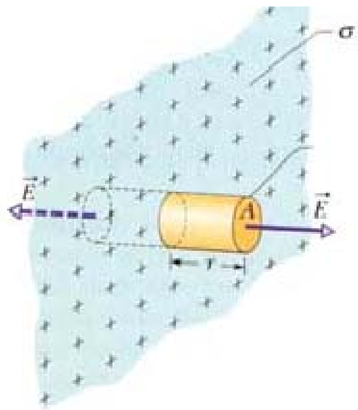
ამრიგად (2.27) ფორმულა, დიფერენციალური სახით ჩაწერილი გაუსის კანონი, შეიძლება ასე ჩამოვაყალიბოთ: **სივრცის რომელიმე წერტილის შემცველი უსასრულოდ მცირე ნებისმიერი ჩაკეტილი ზედაპირის გამჭოლი ელექტრული ველის ნაკადი, მოსული მოცულობის ერთეულზე, პროპორციულია ამ წერტილში დროის მოცემულ მომენტში მუხტის სიმკვრივისა.**

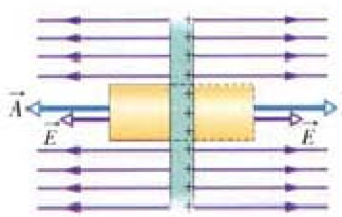
ახლა გაუსის თეორემის გამოყენებით განვიხილოთ კერძო შემთხვევები ელექტრული ველის გამოთვლისა, ცხადია ვთვლით, რომ ცნობილია ელექტრული მუხტის განაწილების პრინციპი (არა მაინცდამაინც სტატიკური) და გვინდა ვიპოვოთ ამ განაწილებით შექმნილი ელექტრული

ველი. აქვე უნდა შევნიშნოთ, რომ ამოცანის გადაწყვეტა შესაძლებელი იქნება თუ ცნობილი იქნება ველის მიმართულება, რაც თავის მხრივ დამოკიდებულია სისტემის სიმეტრიულობაზე.

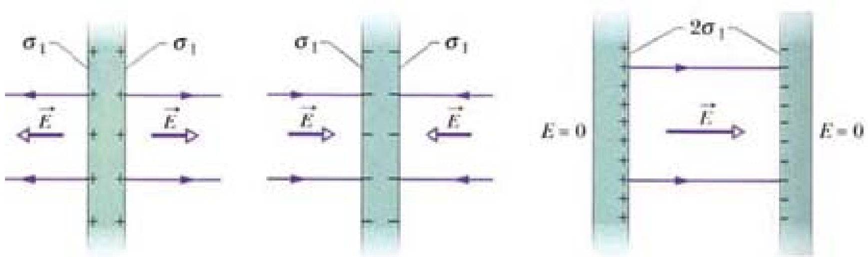
გავიხსენოთ ზოგადი ფიზიკის კურსში განხილული გაუსის თეორემის გამოყენების მაგალითები /მათემატიკური მტკიცების გარეშე/;

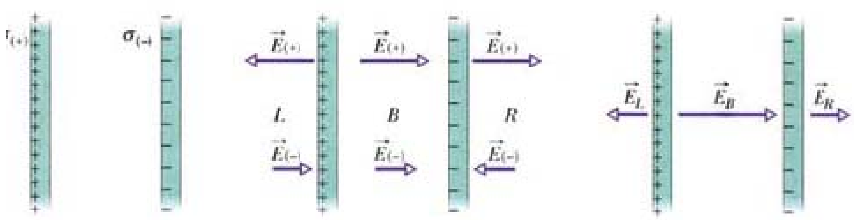
1) **თანაბრად დამუხტული უსასრულო სიბრტყის ველი**. ამ შემთხვევაში ძალწირები სიბრტყის მართობულადაა განლაგებული ხოლო ველის დაძაბულობა





$E = 2\pi k|\sigma|$





/Si-სისტემაში

$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$ / სადაც σ მუხტის ზედაპირული სიმკვრივეა. ხოლო ორ

პარალელურ უსასრულო სიბრტყეს (რომელთა მუხტები სიდიდით ტოლია და ნიშნით საპირისპირო) შორის ველის დაძაბულობა

$$E = 4\pi k\left|\sigma\right| \qquad (2.28)$$

/Si-სისტემაში $E = \dfrac{\left|\sigma\right|}{\varepsilon_0}$ /

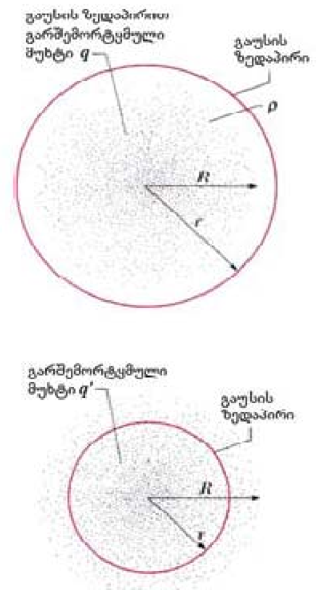
ვინაიდან გაუსის კანონი ზოგადია (2.28) თანაფარდობა მოძრავი მუხტისთვისაცაა მართებული. ამაში დასარწმუნებლად დავუშვათ ფირფიტები პარალელურია xoz სიბრტყისა, მაშინ უძრავ სისტემაში ველს ექნება E_y მდგენელი. გადავიდეთ მოძრავ სისტემაში რომელიც მოძრაობს x ღერძის საპირისპირო მიმართულებით. (2.15) გარდაქმნის ფორმულების თანახმად $E'_Y = \gamma E_Y$, ხოლო ლორენცის შემოკლების გამო $\sigma' = \gamma\sigma$. მაშინ (2.28) –ში ჩასმით მივიღებთ:

$$E' = 4\pi k\left|\sigma'\right|$$

/მოძრავ ფირფიტებს შორის , ცხადია მაგნიტური ველიც გვექნება/.

2) **მუხტთა სფერული განაწილების ველი**. გამოვთვალოთ თანაბრად დამუხტული ბირთვის ველი მის გარეთ და შიგნით, თუ მუხტის მოცულობითი სიმკვრივეა ρ , რადიუსი კი R. სფერული სიმეტრიიდან ნათელია, რომ $\vec{E}$ მიმართულია რადიალურად და მისი მნიშვნელობა დამოკიდებულია ცენტრიდან r მანძილზე;

$$\vec{E} = E_n(r)\,\vec{r}/r$$



ნახ.2.6

სადაც E_n გეგმილია რადიუსვექტორზე.

გაუსის ზედაპირებად ავირჩიოთ კონცენტრიული სფეროები (ნახ. 2.6) ვისარგებლოთ ნაკადის ფორმულით;

$$\Phi = \oint E_n dS = E_n \oint dS = E_n 4\pi r^2$$

როცა r>R სფეროს შიგნით მოქცეული ბირთვის სრული მუხტი

$$q = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$$

გაუსის თეორემის თანახმად კი $\Phi = 4\pi k q$ მაშინ მივიღებთ:

$$E_n = k\frac{q}{r^2}$$

ხოლო ვექტორული სახით

$$\vec{E} = k\frac{q}{r^3}\vec{r} \qquad (2.29)$$

მივიღეთ მნიშვნელოვანი შედეგი: თანაბრად დამუხტული ბირთვის ველი მის გარეთ ისეთია, თითქოს მთელი მუხტი თავმოყრილია სფეროს ცენტრში, ე.ი. ბირთვი იქცევა როგორც წერტილოვანი მუხტი. იმ შემთხვევაში, როცა r<R მაშინ $q = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho$ და

$$4\pi r^2 E = 4\pi k \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 \rho \Rightarrow E = \frac{4}{3}\pi k \rho r$$

ვექტორულად

$$\vec{E} = \frac{4}{3}\pi k \rho \vec{r} \qquad (2.30)$$

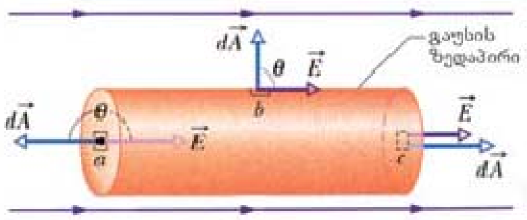
(2.29) და (2.30) ფორმულები Si-სისტემაში შესაბამისად ასე ჩაიწერება:

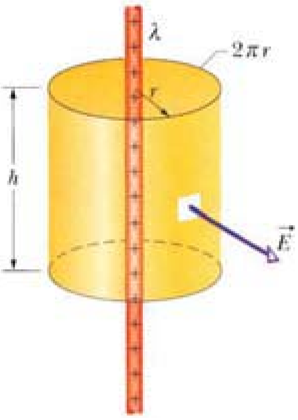
$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^3}\vec{r}$$

$$\vec{E} = \frac{1}{3\varepsilon_0}\rho\vec{r}$$

ბირთვის შიგნით ველი r-ის პროპორციულად იზრდება ხოლო ბირთვის გარეთ- $1/r^2$ -ის (მანძილის კვადრატის უკუპროპორციულია).

3) **ცილინდრული სიმეტრიის შემთხვევა** მუხტის λ წირითი სიმკვრივის გათვალისწინებით განიხილეთ დამოუკიდებლად.





(2.1) ცხრილში მოცემულია ველის დაძაბულობის ფორმულები, ერთგვაროვნად დამუხტული სხვადასხვა ფორმის მყარი სხეულებისათვის:

ცხრილი 2.1

სხეული	წერტილი სივრცეში	ველის დაძაბულობა	Si-სისტემაში
ერთგვაროვანი ან ღრუ სფერო	სხეულის გარეთ	$k\dfrac{q}{r^2}$	$\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q}{r^2}$
ღრუ სფერო	სფეროს შიგნით	0	0
ერთგვაროვანი სფერო	სფეროს შიგნით	$k\dfrac{q}{R^3}r$	$\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q}{R^3}r$
გამტარი ან ღერო	ღეროს გარეთ	$2k\dfrac{\lambda}{r}$	$\dfrac{1}{2\pi\varepsilon_0}\dfrac{\lambda}{r}$
ერთგვაროვანი ღერო	ღეროს შიგნით	$2k\dfrac{\lambda}{R^2}r$	$\dfrac{1}{2\pi\varepsilon_0}\dfrac{\lambda}{R^2}r$
უსასრულო სიბრტყე	ნებისმიერ მხარეს	$2\pi k\sigma$	$\dfrac{1}{2\varepsilon_0}\sigma$
ორი პარალელური სიბრტყე	სიბრტყეებს შორის	$4\pi k\sigma$	$\dfrac{1}{\varepsilon_0}\sigma$

სქელი ფირფიტა	შიგ ცენტრიდან x მანძილზე	$4\pi k\rho x$	$\frac{1}{\varepsilon_0}\rho x$
გამტარი	ზედაპირის მახლობლად	$4\pi k\sigma$	$\frac{1}{\varepsilon_0}\sigma$