

пример, поље наелектрисања које се креће, магнетско поље наизменичне струје, електромагнетско поље итд.

С обзиром на линије силе поља се деле на безвртложна и вртложна. Линије силе безвртложног поља имају свој почетак и завршетак на телима или у бесконачности. Таква поља су гравитационо и електростатичко. Физичко поље са линијама које су затворене у себе назива се вртложно поље. У таквом пољу линије силе немају ни почетак ни крај. Вртложна поља су магнетно и електромагнетно поље.

Видови физичких поља су: гравитационо, електростратичко, магнетско и електромагнетско. Електромагнетно поље је променљиво физичко поље. Како сам назив показује, електромагнетно поље се састоји од временских промена електричног и магнетног поља која настају услед убрзаног кретања наелектрисања, а простиру се брзином светлости.

ОСНОВНЕ ИНТЕРАКЦИЈЕ У ПРИРОДИ

Према савременом схватању, сва разноврсност макроскопских тела и микроскопских честица као и појава који се међу њима дешавају условљена је са четири основне врсте узајамног деловања: *гравитационим, slabим, електромагнетним и јаким.*

Гравитационо узајамно деловање испољава се као привлачење које постоји између свих тела и честица које имају масу, најраније је проучено и описује се Њутновим законом универзалне гравитације. Пропорционалност гравитационе силе масама тела чини да је она веома велика код небеских тела, а занемарљива код елементарних честица. Због тога је гравитационо узајамно деловање одговорно за изградњу васионе и појава које се у њој дешавају, као и за многе појаве на Земљи. Ово деловање има бесконачан домет.

Слабо узајамно деловање је кратког домета, а јавља се у процесима у којима учествују честице, као што су, на пример, неутрино и антинутрино. Слабо узајамно деловање одговорно је за бета-распад и за споре распаде мезона.

Електромагнетно узајамно деловање постоји између наелектрисаних честица, као и између тела у чији састав улазе наелектрисане честице. Домет ових сила је бесконачан. Узајамно деловање честица које мирују описује се Кулоновим законом. Електромагнетно узајамно деловање обезбеђује стабилност атома, повезује атоме у молекулима, одређује узајамно деловање између честица гасова, течности, чврстих тела, плазме и има основну улогу у физичко-хемијским и биолошким процесима. На електромагнетне силе могу се свести све остале нефундаменталне силе, као што су силе површинског напона, еластичне силе, силе трења.

Јако узајамно деловање обезбеђује стабилност атомског језгра тиме што повезује протоне и неутроне. Одликује се малим дометом, тако да се испољава када растојања између честица нису већа од 10^{-15} m. Поред тога јако узајамно деловање постоји у сударима мезона са мезонима и мезона са барионима.

Да бисмо добили представу о јачини основних узајамних деловања навешћемо њихов однос у случају узајамног деловања два протона. Ако се јака интеракција између ове две честице окарактерише бројем 1 онда су електромагнетне интеракције при истом растојању 10^2 пута мање, слабе су 10^{13} , а гравитационе 10^{39} пута мање.

Због тога се у нуклеарној и атомској физици као и у физици елементарних честица потпуно занемарује гравитационо узајамно деловање.

4.3. ВРЕМЕНСКИ СТАЛНА ПОЉА

БЕЗВРТЛОЖНА ПОЉА

Безвртложна поља су таква поља чије линије силе имају почетак и крај на материјалним честицама. Ту спадају гравитационо и електростатичко поље. Преко гравитационог поља остварује се узајамно привлачење свих тела и честица у природи, а посредством електростатичког поља остварује се узајамно привлачење или одбијање наелектрисаних тела и честица.

ЊУТНОВ ЗАКОН ГРАВИТАЦИЈЕ

Између свих тела и честица у природи, без изузетка, делују силе узајамног привлачења које се називају гравитационим силама. Од тих сила непосредном опажању је доступна Земљина тежа, или како се често каже сила Земљине теже под чијим дејством тела падају. Земљина тежа је само једна врста испољавања гравитационог привлачења. То привлачење постоји и између других тела на Земљи само се, не запажа под обичним околностима, јер је веома слабо, па се тешко може измерити. Другим речима, гравитационе силе које делују између тела на Земљи толико су мале да не могу променити кретање или мировање тела, као ни његов облик, па због тога нису доступне непосредном опажању.

Величина силе гравитационог привлачења одређена је Њутновим законом гравитације који гласи:

Сила којом се два тела међусобно привлаче пропорционална је производу њихових маса, а обрнуто је пропорционална квадрату растојања међу њима.

Ако се са m_1 и m_2 означе масе тела, са r растојање између њих, а са F_g величина гравитационе силе онда се Њутнов закон гравитације изражава формулом

$$F_g = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (4.1)$$

где је коефицијент γ гравитациона константа. Из формуле (4.1) за силу следи да је $F_g = \gamma$, ако је $m_1 = m_2 = 1 \text{ kg}$ и $r = 1 \text{ m}$, па, према томе:

Гравитациона константа је бројно једнака сили којом се привлаче два тела са масама од по један килограм, на међусобном растојању од једног метра.

Вредност гравитационе константе први је измерио Кевендиш 1798. године. Данас се за гравитациону константу узима вредност

$$\gamma = 6,6720 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$$

Формула за гравитациону силу у наведеном облику, строго узевши, важи за тела чије су димензије много мање од њиховог ра-

стојања, тако да се могу сматрати материјалним тачкама. У том случају правац силе се поклапа са правцем који спаја материјалне тачке. Сунце, Земља, планете, Месец могу се такође сматрати материјалним тачкама при израчунавању сила њиховог међусобног гравитационог деловања.

Хомогена тела у облику лопти привлаче се као материјалне тачке постављене у центре лопти. У том случају r је растојање између центара лопти.

Формула (4.1) је применљива и за израчунавање гравитационе силе између тела у облику лопте великог полупречника и тела произвољног облика, а малих димензија. Такав случај је гравитационо привлачење између Земље и тела која се налазе у близини њене површине. Тада је растојање r приближно једнако полупречнику Земље.

Величина гравитационих сила између тела са којима се сусрећемо у свакодневном животу је веома мала. Тако, на пример, два тела чије су масе 10.000 kg (два железничка вагона), на растојању од 1 m привлаче се силом од око 0,01 N. Та сила је приближно једнака тежини тега који има масу 1 g. Међутим, између тела врло великих маса (небеска тела) делују јаке гравитационе силе и на веома великим астрономским растојањима, јер су пропорционалне производу тих маса.

КУЛОНОВ ЗАКОН

Закон који описује узајамно деловање наелектрисаних тела или честица, открио је експерименталним путем француски физичар Кулон. Овај закон, по њему, назива се Кулонов закон и гласи:

Сила узајамног деловања два непокретна наелектрисана тела пропорционална је производу њихових наелектрисања, а обрнуто је пропорционална квадрату њиховог међусобног растојања.

Ако се тела, чија су наелектрисања q_1 и q_2 налазе у вакууму на растојању r , онда је интензитет силе њиховог међусобног деловања дат формулом:

$$F_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (4.2)$$

где је ϵ_0 — диелектрична пропустљивост вакуума.

Сила је одбојна ако су наелектрисања истог знака (оба позитивна или оба негативна), а привлачна ако су наелектрисања супротног знака (једно позитивно а друго негативно).

Јединица наелектрисања или количине електрицитета у SI систему — кулон дефинисана је помоћу јединице за струју. Наелектрисање од једног кулона (1 C) је наелектрисање које у једној секунди прође кроз попречни пресек проводника при јачини струје од једног ампера.

Пошто је нумеричка вредност константе ϵ_0

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$$

при израчунавању електростатичке силе по формули (4.2), сила се добија у њутнима ако се наелектрисања изразе у кулонима, а растојање у метрима.

Кулонов закон, строго узевши, важи само за тачкаста наелектрисања тела — тачкаста наелектрисања. Таква тела у природи не постоје, но ако је растојање између тела много веће од њихових димензија, онда се тела могу сматрати тачкастим. Кулонов закон у облику који је дат формулом (4.2), може се применити на узајамно деловање хомогено наелектрисаних лопти, без обзира на величину њиховог међусобног растојања. У том случају r је растојање између центра лопти.

Ако наелектрисана тела имају друге облике и велике димензије у односу на њихово међусобно растојање, онда се у тим случајевима сила узајамног дејства не може приказати тако једноставном релацијом као што је релација (4.2). У том случају, сила узајамног деловања може се наћи векторским сабирањем сила узајамног дејства свих тачкастих елемената једног тела са свим тачкастим елементима другог тела.

Силе међусобног деловања између непокретних наелектрисаних тела које се још називају и кулоновске силе потчињавају се III Њутновом закону.

Кулоновске силе, за разлику од гравитационих сила, зависе од својстава средине у којој се налазе наелектрисана тела. Ако се тела налазе у некој материјалној средини, онда је сила F_e њиховог узајамног деловања увек мања од силе F_{eo} којом делују када се налазе у вакууму. Однос ових сила

$$\epsilon_r = \frac{F_{eo}}{F_e} \quad (4.3)$$

назива се *релативна диелектрична пропустљивост* и практично је независан од величине наелектрисања и међусобног растојања тела. Према томе:

Диелектрична константа средине показује колико је пута сила узајамног деловања наелектрисања у некој средини мања од силе њиховог узајамног деловања у вакууму. За вакуум $\epsilon = 1$, за ваздух $\epsilon = 1,0006 \approx 1$, а за воду $\epsilon = 80$.

Пошто је у вакууму

$$F_{eo} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

и како је

$$F_e = \frac{F_{eo}}{\epsilon}$$

слиди да Кулонов закон за узајамно деловање наелектрисања, када се налазе у некој средини, изгледа овако:

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2} \quad (4.4)$$

Кулонов закон се може веома широко примењивати од највећих растојања до растојања реда 10^{-16} m.

Кулонова сила је веома велика у односу на гравитациону. Да бисмо ово илустровали упоредићемо гравитациону и кулоновску силу

чина силе F зависи од својстава поља на месту где се налази пробно тело и од величине његове масе.

Механизам узајамног деловања непокретних наелектрисаних тела аналоган је механизму гравитационог деловања.

Свако наелектрисано тело ствара око себе електрично поље, које делује на сва наелектрисана тела и честице које се нађу у њему. Електрично поље постоји око сваког наелектрисаног тела и на свим оним местима на којима се не налазе друга наелектрисана тела или честице. Поље ће се на тим местима испољити само када се ту нађу наелектрисања.

Електрично поље које постоји око непокретних наелектрисаних тела или честица назива се електростатичким пољем. Ово поље се не мења у току времена.

Електростатичко поље не може да постоји одвојено од наелектрисања, за разлику од временски променљивог електричног које није нераскидиво повезано са наелектрисањем. То поље упознаћемо нешто касније. У овом тренутку треба знати да су многа својства електростатичког и променљивог електричног поља иста. Због тога ћемо таква својства проучавати као својства електричног поља.

ЈАЧИНА ПОЉА

Гравитационо и електрично поље описује се помоћу физичке величине називане *јачина поља*.

Ако се у гравитационо поље тела масе m_0 унесе друго тело масе m на њега ће, према Њутновом закону гравитације, деловати сила пропорционална маси m

$$F_g = \gamma \frac{mm_0}{r^2}$$

Други речима, сила F зависи од својстава поља у тачки у којој се налази тело и величине његове масе m . Однос те силе и масе m

$$\frac{F_g}{m} = \gamma \frac{m_0}{r^2}$$

у било којој тачки поља, не зависи од m , већ само од масе тела које ствара поље (извора поља) и растојања тог тела до посматране тачке поља. Због тога тај однос и представља карактеристику поља — *јачину поља*.

Физичка величина која је једнака количнику гравитационе силе која у датој тачки делује на неко тело и масе тога тела назива се *јачина поља у тој тачки*.

Према томе, ако на тело масе m делује гравитационо поље силом $\vec{F}_g$ онда је *јачина гравитационог поља на месту где се налази тело*.

$$\vec{G} = \frac{\vec{F}_g}{m} \quad (4.5)$$

Јачина гравитационог поља је, као и сила, векторска величина, бројно је једнака сили која у датој тачки поља дејствује на јединицу масе, а правац и смер се подударају са правцем и смером силе $\vec{F}_g$.

које делују између два протона који се налазе у атомском језгру на растојању r . Пошто је

$$F_g = \gamma \frac{m^2}{r^2} \quad \text{и} \quad F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{r^2}$$

онда је

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0}}{\gamma m^2}$$

Маса протона је $m = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, а наелектрисање $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Заменом ових вредности и вредности константи γ и ϵ_0 добија се

$$\frac{F_e}{F_g} = 10^{36}$$

што значи да је кулоновска сила између два протона 10^{36} пута већа од гравитационе силе.

Слично гравитационим силама, кулоновске силе, практично имају неограничен радијус деловања. Тако, на пример, грам протона који се налази на Сунцу привлачи грам електрона на Земљи силом од 50 N, тј. силом која је приближно једнака тежини тега од 5 kg.

Када се наведени израз Кулоновог закона (4.4) упореди са Њутновим законом гравитације (4.1), одмах се види сличност. И електростатичка и гравитациона сила опадају са квадратом растојања, што значи да је, на пример, сила 4 пута мања на двапут већем растојању. Сем тога, електростатичка сила зависи од квантитета q_1 и q_2 (наелектрисања), као што гравитациона сила зависи од квантитета m_1 и m_2 (маса тела). Међутим, тиме се те аналогije исцрпљују, јер је сила гравитације само привлачна, док електростатичка сила може бити привлачна или одбојна, у зависности од врсте наелектрисања.

Затим, велика је разлика у природи константе пропорционалности. Гравитациона константа је универзална и не зависи од средине. Између два тела делује иста гравитациона сила, без обзира да ли је међу њима безваздушни простор (вакуум), ваздух или ма која друга средина. Коефицијент пропорционалности у Кулоновом закону

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon}$$

није универзалан. Он зависи од особина средине у којој се налазе наелектрисана тела.

ГРАВИТАЦИОНО И ЕЛЕКТРОСТАТИЧКО ПОЉЕ

Као што је већ напоменуто, према савременом схватању, гравитационо и електростатичко деловање тела остварује се помоћу гравитационог и електростатичког поља на следећи начин.

Свако тело масе M ствара око себе гравитационо поље и, ако се у неку тачку тог поља стави пробно тело масе m , поље ће се испољити тако што ће деловати на то тело привлачном силом F . Вели-

Према томе, гравитационо поље тачкастог тела масе m_0 у тачки која се налази на растојању r од њега има јачину

$$G = \gamma \frac{m_0}{r^2}, \quad (4.6)$$

а правац и смер му се поклапају са правцем и смером гравитационе силе.

Јачина поља је физичка величина која карактерише поље у посматраној тачки. Она постоји, без обзира на то да ли се у тој тачки налази или не налази неко тело.

Пошто је јачина гравитационог поља дата количником силе и масе тела, то је она по својој природи једнака убрзању. С обзиром на то да јачина поља не зависи од масе тела које се налази у пољу, то сва тела независно од њихових маса имају, у датој тачки гравитационог поља, исто убрзање.

На сличан начин дефинише се јачина електричног поља.

Физичка величина једнака количнику електричне силе која у датој тачки дејствује на неко позитивно тачкасто наелектрисање и величине тог наелектрисања назива се јачина електричног поља.

Према томе, ако је $\vec{F}_e$ сила којом електрично поље делује на позитивно тачкасто наелектрисање q , онда је јачина електричног поља на месту где се налази наелектрисање

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q} \quad (4.7)$$

Јачина електричног поља у некој тачки је бројно једнака електричној сили која у тој тачки делује на јединицу позитивног наелектрисања, а правац и смер поклапају се са правцем и смером силе $\vec{F}_e$. И овом приликом подвлачимо да јачина поља, као физичка величина која карактерише поље у некој тачки, постоји независно од тога да ли се у тој тачки поља налази или не неко наелектрисање. За разлику од јачине гравитационог поља ($\vec{G}$), јачина електричног поља ($\vec{E}$) није једнака убрзању које то поље може да саопшти наелектрисаном телу.

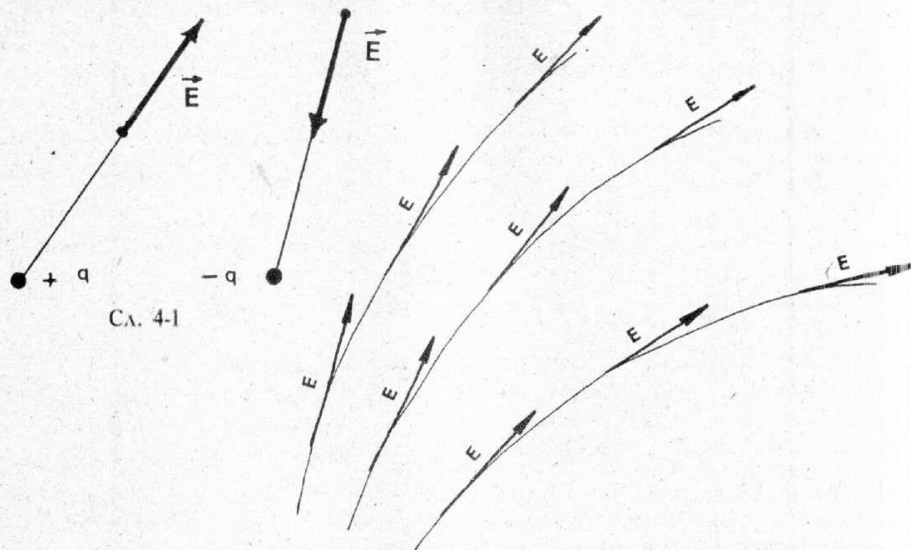
Јачина електростатичког поља непокретног тачкастог наелектрисања q_0 добија се из Кулоновог закона. Према Кулоновом закону наелектрисање q_0 деловаће у вакууму на неко друго наелектрисање q силом интензитета

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r^2}$$

па ће вредност јачине поља наелектрисања q_0 на растојању r бити

$$E = \frac{F_e}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0}{r^2} \quad (4.8)$$

Вектор јачине поља тачкастог наелектрисања, у било којој тачки, лежи на правој која спаја наелектрисање и посматрану тачку поља, а усмерен је ка наелектрисању, ако је оно позитивно, а од наелектрисања, ако је оно негативно (сл. 4.1).



Сл. 4.2

Према томе, ако су познате јачине гравитационог или електричног поља у некој тачки онда се могу израчунати силе које делују на тело које се налази у тој тачки:

$$\vec{F}_g = \vec{G} \cdot m \quad \text{и} \quad \vec{F}_e = \vec{E} \cdot q \quad (4.9)$$

Увођењем појма поља квантитативно описивање узајамног гравитационог и електростатичког деловања тела подељено је на два једноставнија проблема: налажење, помоћу једначина (4.6) и (4.8) јачине поља и одређивање, помоћу једначина (4.9) силе којом поље делује на тела приказана одговарајућим квантитетом m или q .

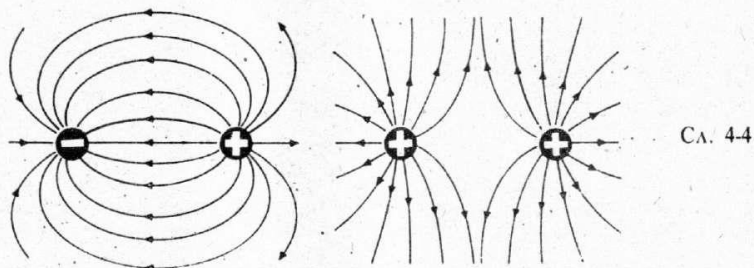
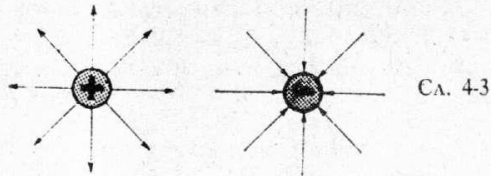
Линије силе. Физичка поља се графички приказују помоћу линија силе.

Линије силе поља (гравитационог или електричног) су линије чије се тангенте у свакој тачки поклапају са вектором јачине поља (сл. 4-2).

Линије силе електростатичког поља тачкастог наелектрисања или наелектрисане лопте, када у њеној близини нема других наелектрисаних тела, радијално су распоређене (сл. 4-3). У пољу позитивно наелектрисане лопте линије силе су усмерене од центра лопте, а у пољу негативно наелектрисане лопте ка центру лопте. То је смер у коме би се кретало позитивно наелектрисање унето у то поље.

Слика 4-4 приказује распоред линија силе између два тела наелектрисана разноименим наелектрисањима и истоименим наелектрисањима. Линије силе електростатичког поља имају почетак и крај на наелектрисањима.

Међутим, треба знати да линије силе у физичком пољу нису неки затегнути конци. Оне реално не постоје. То је само сликовит начин приказивања поља.



Слагање поља. Када на неко наелектрисано тело делују два или више наелектрисаних тела, онда је резултујућа сила једнака векторском збиру сила којима на дато тело делује свако од преосталих тела понаособ. Према томе, узајамно дејство два наелектрисана тела независно је од присуства других наелектрисаних тела.

Пошто је јачина поља сила по јединици наелектрисања, онда је резултујућа јачина поља која потиче од два или више наелектрисања једнака векторском збиру јачина поља сваког наелектрисања по-себно:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots \quad (4.10)$$

Према томе, ако у датој тачки простора електрично поље потиче од више наелектрисаних тела, онда је јачина поља у тој тачки једнака векторском збиру јачина поља које потичу од сваког наелектрисања понаособ.

Према томе, да би се нашло поље система тачкастих наелектрисања у некој тачки, треба помоћу формуле (4.8) одредити јачину поља сваког наелектрисања, а онда наћи њихов векторски збир. На сл. 4-5 је илустровано како се налази јачина поља која потиче од два наелектрисања.

Принцип суперпозиције поља важи и за гравитационо поље.

Гравитационо и електрично поље су независни једно од другог. Ова поља могу постојати у некој тачки простора, а да при томе не утичу једно на друго. Укупна сила која делује на неко наелектрисано тело једнака је векторском збиру електричне и гравитационе силе. Сабирати векторе $\vec{G}$ и $\vec{E}$ нема смисла.

ФЛУКС ПОЉА

Јачина физичког поља може се приказати густином линија силе, тј. бројем линија силе по јединици површине која је нормална на те линије. Узима се, наиме, условно да кроз јединичну површину

нормалну на линије силе пролази онолики број линија силе колика је на том месту јачина поља. У складу са овим густина линија силе је већа у близини наелектрисаних тела где је и јачина поља већа. Кроз неку површину већу од јединичне број линија силе биће онолико пута већи, колико је пута та површина већа од јединичне.

Број линија силе кроз неку површину у пољу назива се флукс поља (гравитационог или електричног). Ако је та површина (S) нормална на линије силе и ако дуж ње јачина поља E има исту вредност онда је флукс електричног поља

$$\Phi = E \cdot S \quad (4.11)$$

У општем случају када површина S није нормална на правац линија силе, елементарни флукс електричног поља дат је скаларним производом

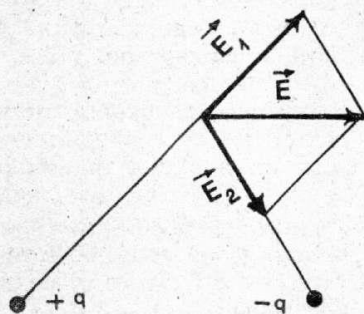
$$\Phi = \vec{E} \cdot \vec{S} \quad (4.12)$$

где је $\vec{S}$ вектор који је оријентисан дуж нормале на површину S , а интензитет му је једнак величини те површине.

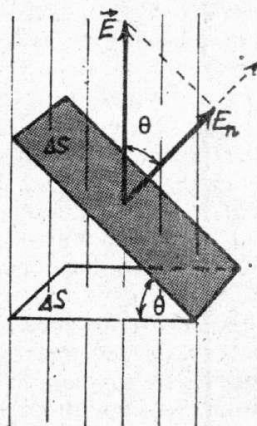
Како је скаларни производ два вектора једнак производу интензитета једног вектора и интензитета нормалне пројекције другог вектора на правац првог вектора, онда је

$$\Phi = E_n \cdot S \quad (4.13)$$

где је E_n пројекција вектора E на правац нормале на површину ΔS (сл. 4-6).



Сл. 4-5



Сл. 4-6

Према томе, флукс електричног поља кроз неку површину S једнак је производу величине те површине и нормалне пројекције јачине поља на правац нормале на површину S .

Напомињемо да се потпуно аналогно дефинише и флукс гравитационог поља, али се та величина ретко примењује у пракси.

Нађимо сада колики је флукс поља позитивног тачкастог наелектрисања кроз површину сфере у чијем се центру налази то наелектрисање. Пошто линије силе тачкастог наелектрисања имају

радијалне правце, оне ће у свакој тачки површине сфере бити нормалне на њу, па је флукс

$$\Phi = E \cdot S$$

Јачина поља у свим тачкама на површини сфере полупречника r је иста и износи

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

Површина сфере је $S = 4\pi r^2$ па је флукс

$$\Phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (4.14)$$

Добијени резултат има опште важење. Наиме, ако се унутар производље затворене површине налази више наелектрисања (не морају бити тачкаста), онда је флукс поља тих наелектрисања једнак

$$\Phi = \frac{1}{\epsilon_0} (q_1 + q_2 + q_3 + \dots) \quad (4.15)$$

где је у загради алгебарски збир наелектрисања.

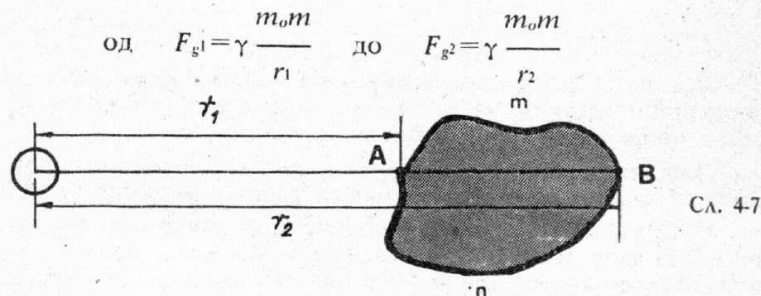
Пошто се флукс може изразити преко јачине поља и површине, онда је формулом (4.15) успостављена општа законитост повезаности јачине поља и наелектрисања. Помоћу те законитости могу се наћи јачине поља у случају када наелектрисања нису тачкаста, а поље има познату симетрију.

ПОТЕНЦИЈАЛ ПОЉА

Поред јачине поља која је векторска величина, поље се приказује једном скаларном величином која се зове потенцијал поља. Потенцијал поља дефинише се преко рада који се врши у пољу када се у њему помера тело на које поље делује.

Формуле за рад у гравитационом, односно електростатичком пољу не могу се добити на једноставан начин, јер се гравитациона и електростатичка сила мењају од тачке до тачке дуж радијалног правца.

Нека се тело масе m помера у Земљиним гравитационим пољу од неке тачке A на растојању r_1 од центра Земље, до неке друге тачке B на растојању r_2 од Земљиног центра, (сл. 4.7). При томе се дуж пута $s = r_2 - r_1$ вредност гравитационе силе мења



где је m_0 — маса Земље. Пошто се сила мења дуж пута за израчунавање рада треба узети средњу вредност силе $\vec{F}_g$. Навешћемо без доказа да је средња вредност силе која је обрнуто сразмерна квадрату растојања, на путу $(r_1 - r_2)$ једнака геометријској средини њене почетне и крајње вредности:

$$\bar{F} = \sqrt{F_{g1} F_{g2}} = \sqrt{\gamma \frac{mm_0}{r_1^2} \cdot \gamma \frac{mm_0}{r_2^2}} = \gamma \frac{mm_0}{r_1 r_2}$$

Онда је рад гравитационе силе као производ средње вредности силе пређеног пута једнак:

$$A = \bar{F}_g (r_2 - r_1) = -\gamma \frac{mm_0}{r_1} + \gamma \frac{mm_0}{r_2} \quad (4.16)$$

Ако се дато тело у току померања удаљује од Земље онда је $r_2 > r_1$ па је рад гравитационе силе негативан. То значи да се тада гравитациона сила супротставља померању тела. Када се тело помера ка Земљи, онда је $r_1 > r_2$, па гравитациона сила врши позитиван рад, јер се тело помера у смеру деловања силе.

Рад гравитационе силе не зависи од пута којим је тело из тачке A прешло у тачку B , већ зависи само од почетног и крајњег положаја тела. Тако, на пример, радови гравитационе силе при померању тела из A и B по праволинијској путањи AB и криволинијским путањама AmB и AnB су једнаки (сл. 4-7). У том случају је рад гравитационе силе дуж затворене путање $AmBnA$ једнак нули. Наиме при померању тела из A и B гравитациона сила врши негативан рад на путу AmB јер се r повећава, а позитиван рад на путу BnA јер се r смањује. Како су ови радови по апсолутној вредности једнаки, њихов збир биће нула. Пошто се силе чији је рад дуж затворене путање једнак нули, односно чији рад не зависи од облика путање, називају конзервативним или потенцијалним, онда је гравитациона сила конзервативна сила.

За конзервативне силе дефинише се потенцијална енергија тако да је рад конзервативних сила једнак негативној промени потенцијалне енергије.

$$A = -(E_{p2} - E_{p1}) \quad (4.17)$$

Рад гравитационе силе дат је релацијом (4.13) па је промена потенцијалне енергије

$$-\gamma \frac{mm_0}{r_1} + \gamma \frac{mm_0}{r_2} = E_{p1} - E_{p2} \quad (4.18)$$

Потенцијална енергија се рачуна у односу на неки произвољно изабрани ниво. Ако узмемо да се тај нулти ниво налази врло далеко (у бесконачности), тј. да је $E_{p2} = 0$ за $r = \infty$, онда се из (4.18) добија да је потенцијална енергија система Земља — тело

$$A_{\infty} = E_p = -\gamma \frac{mm_0}{r} \quad (4.19)$$

где је индекс 1 изостављен као непотребан.

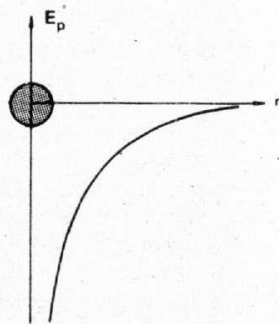
Према томе, гравитациона потенцијална енергија је једнака раду гравитационе силе при померању датог тела из посматране тачке у бесконачност.

Пошто је гравитациона потенцијална енергија негативна, онда она расте са повећањем растојања између тела, тежећи нули када r тежи бесконачности (сл. 4-8). Ово повећање растојања међу телима може настати само под дејством неке спољашње силе. На рачун рада те силе долази до пораста потенцијалне енергије.

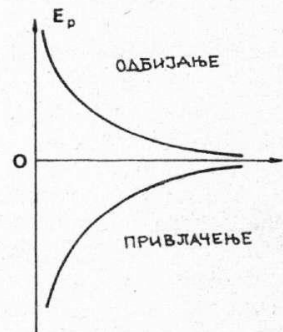
Електростатичка сила узајамног деловања наелектрисања је, такође, конзервативна сила, па се и за њу може дефинисати потенцијална енергија.

Аналогно гравитационој потенцијалној енергији, електростатичка потенцијална енергија два тачкаста наелектрисања q и q_0 , која се налазе у вакууму на растојању r , износи

$$A_{\infty} = E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r} \quad (4.20)$$



Сл. 4.8



Сл. 4.9

Електростатичка потенцијална енергија тежи нули када се растојање међу наелектрисањима неограничено повећава ($r \rightarrow \infty$). Електростатичка потенцијална енергија је позитивна ако су наелектрисања истог знака (одбојне силе), а негативна ако су наелектрисања супротног знака (привлачне силе). На сл. 4-9 приказан је график зависности електростатичке потенцијалне енергије од растојања. Када се наелектрисања приближавају једно другоме потенцијална енергија истоимених наелектрисања расте, а разноимених опада. И обрнуто, потенцијална енергија истоимених наелектрисања опада, а разноимених расте када се њихово растојање повећава.

Физичка величина ϕ која је једнака односу потенцијалне енергије тела у гравитационом пољу и његове масе m

$$\phi = \frac{E_p}{m} = -\gamma \frac{m_0}{r} \quad (4.21)$$

не зависи од величине масе па представља енергијску карактеристику гравитационог поља. Та величина назива се *потенцијал гравитационог поља*.

Потенцијал гравитационог поља је бројно једнак потенцијалној енергији тела јединичне масе у датој тачки поља:

$$\varphi = \frac{E_p}{m} \quad (4.22)$$

Пошто је $E_p = \varphi m$, онда се рад у гравитационом пољу који једнак негативној промени потенцијалне енергије (4.17) може изразити помоћу разлике потенцијала

$$A = -(E_{p2} - E_{p1}) = -(m\varphi_2 - m\varphi_1)$$

односно

$$A = m(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (4.23)$$

Разлика потенцијала ($\varphi_1 - \varphi_2$) почетне и крајње тачке пута бројно је једнака раду силе гравитационог поља при померању тела јединичне масе између тих тачака:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{m}. \quad (4.24)$$

Ако се тачка 2 налази у бесконачности онда је $E_{p2} = 0$ и $\varphi_2 = 0$, па је, ако се изостави индекс 1

$$\varphi = \frac{A_{\infty}}{m}. \quad (4.25)$$

Потенцијал гравитационог поља бројно је једнак раду гравитационог поља при померању тела јединичне масе из дате тачке у бесконачност.

Гравитациони потенцијал изражава се у јединицама J/kg.

Аналогно гравитационом потенцијалу дефинише се потенцијал електростатичког поља.

Потенцијал електростатичког поља у датој тачки бројно је једнак потенцијалној енергији јединичког позитивног наелектрисања стављеног у ту тачку:

$$\varphi = \frac{E_p}{q}. \quad (4.26)$$

Ако се у ову формулу замени израз за потенцијалну енергију двају тачкастих наелектрисања (4.20) добија се потенцијал електростатичког поља наелектрисања q_0 на растојању r од извора поља

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0}{r} \quad (4.27)$$

Ова формула даје и потенцијал равномерно наелектрисане лопте наелектрисањем q_0 , на растојањима која су једнака или већа од њеног полупречника. То је непосредна последица чињенице да је електростатичко поље равномерно наелектрисане лопте на њеној површини и ван ње исто као и електростатичко поље исто толиког тачкастог наелектрисања у центру лопте.

Из формуле (4.26) којом је дефинисан потенцијал следи да је потенцијална енергија наелектрисања q у електростатичком пољу једнака производу тог наелектрисања и потенцијала.

$$E_p = q\varphi \quad (4.28)$$

Рад електростатичког поља при померању позитивног наелектрисања q из једне у другу тачку поља је

$$A = -(E_{p2} - E_{p1}) = q_1(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (4.29)$$

Разлика потенцијала или напон између двеју тачака поља бројно је једнака раду сила електростатичког поља при померању између тих тачака, јединичног позитивног наелектрисања:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q} \quad (4.30)$$

Ако се тачка 2 налази у бесконачности онда је $E_{p2} = 0$ а тиме и $\varphi_2 = 0$, па је када се изостави индекс 1 као непотребан:

$$\varphi = \frac{A_{\infty}}{q} \quad (4.31)$$

Потенцијал електростатичког поља бројно је једнак раду електростатичких сила при померању јединичног позитивног наелектрисања из дате тачке поља у бесконачност.

Јединица разлике потенцијала, односно напона волт (V) дефинисана је помоћу формуле (4.30). Ако се при преношењу наелектрисања од једног кулона из једне у другу тачку електростатичког поља изврши рад од једног џула онда између тих тачака постоји разлика потенцијала (напон) од једног волта.

Из релација (4.21) и (4.27) се види да потенцијал поља, тј. потенцијал у некој тачки поља зависи само од растојања те тачке од извора поља. Зато све тачке на некој површини, подједнако удаљене од извора поља имају исту вредност потенцијала. У пољу тачкастог наелектрисања, као и у гравитационом пољу тела врло малих димензија (тачкасте масе), свака сферна површина чији је центар у тачки где је извор поља представља површину истог (једнаког) потенцијала. Такве површине се називају *еквипотенцијалним површинама*. При кретању неког тела по еквипотенцијалној површини у гравитационом пољу, као и при кретању неког наелектрисања по еквипотенцијалној површини у електростатичком пољу рад сила поља је једнак нули, јер су еквипотенцијалне површине свуда нормалне на линије силе.

Пресеци еквипотенцијалних површина и неке произвољне равни су линије које се зову *еквипотенцијалне линије*. На сл. 4-10 приказане су, у равни цртежа, еквипотенцијалне линије усамљеног позитивног тачкастог наелектрисања, као и еквипотенцијалне линије два истоимена и два разноимена наелектрисања. Линије силе на овој слици приказане су испрекиданим линијама. Еквипотенцијалне линије се цртају тако, да између две суседне буде увек иста разлика потенцијала.

Описивање поља помоћу потенцијала има неких предности у односу на описивање поља помоћу јачине поља. Тако, на пример, по-