16

312hi16

# विद्युत विभव एवं संधारित्र

मॉड्यूल 2 और 3 में आपने तरल पदार्थों और ऊष्मा के प्रवाह के विषय में पढ़ा था। आपको याद होगा कि किसी धारक में पानी का तल उसके प्रवाह की दिशा को निर्धारित करता है। यदि एक धारक में पानी का तल दूसरे धारक में पानी के तल से ऊँचा हो तो पानी ऊँचे तल वाले बर्तन से नीचे तल वाले बर्तन की ओर प्रवाहित होता है भले ही धारकों में पानी की मात्रा कितनी ही क्यों न हो। एक वस्तु से दूसरी वस्तु की ओर ऊष्मा के प्रवाहित होने में ताप भी यही भूमिका निभाता है। ऊष्मा हमेशा अधिक ताप की वस्तु से कम ताप की वस्तु की ओर प्रवाहित होती है। यह प्रवाह वस्तु की कुल ऊष्मा की मात्रा पर निर्भर नहीं करता है।

विद्युत विभव भी एक बिन्दु से दूसरे बिंदु के बीच आवेशों के प्रवाह में समान भूमिका निभाता है। धनावेश सदैव उच्च विभव से निम्न विभव की ओर गति करता है। जब एक धनात्मक परीक्षण आवेश को एक विद्युत क्षेत्र में मुक्त रख दिया जाता है तो यह विद्युत क्षेत्र की दिशा की ओर गति करता है। परीक्षण आवेश के इस व्यवहार के कारण आप यह कहना चाहेंगें कि **विद्युत क्षेत्र E एवं विद्युत विभव V** का एक-दूसरे से निकट संबंध है। इस पाठ में आप E तथा V के बीच संबंध को स्थापित करना सीखेंगे। आप संधारित्र युक्ति के बारे में भी ज्ञान प्राप्त करेंगे और यह जानेंगे कि कैसे परावैद्युत पदार्थ इनके गुणों को परिवर्तित कर देते हैं।

## उद्देश्य

इस पाठ का अध्ययन करने के पश्चात् आप

- किसी बिंदु पर विभव व दो बिन्दुओं के बीच विभवान्तर की व्याख्या कर पाएंगे,
- बिंदु-आवेश और द्विध्रुव के कारण विद्युत विभव के लिए व्यंजक प्राप्त कर पाएंगे,
- विद्युत क्षेत्र और विद्युत विभव-प्रवणता में संबंध स्थापित कर पाएंगे,
- संधरित्रों के सिद्धान्त की व्याख्या कर सकेंगे ओर उनके उपयोग बता पाएंगे,
- संधरित्रों के समूहन की तुल्य धारिता का मान ज्ञात कर पाएंगे और इसके लाभों को बता पाएंगे,

- किसी संधारित्रों में संग्रहित ऊर्जा का परिकलन कर पाएंगे,
- विद्युत क्षेत्र में रखने पर परावैद्युत पदार्थों में होने वाले ध्रुवण की व्याख्या कर पाएंगे,

## 16.1 विद्युत विभव और विभवान्तर

जब एक आवेशित कण को स्थिर विद्युत क्षेत्र की दिशा के विपरीत चलाया जाता है तो किसी बाह्य माध्यम द्वारा कार्य किया जाता है। यह किया गया कार्य ऊर्जा संरक्षण के सिद्धांतों के अनुसार स्थितिज ऊर्जा के रूप में संगृहीत हो जाता है। अत: हम यह कह सकते हैं कि विद्युत क्षेत्र के किसी भी बिंदु पर स्थित विद्युत आवेश की स्थितिज ऊर्जा उसकी स्थिति का फलन है, हम किसी क्षेत्र में आवेश की स्थितिज ऊर्जा को उसकी स्थिति का अदिश फलन मान सकते हैं और इसे **विभव** कहते हैं। इसका तात्पर्य यह है कि विद्युत क्षेत्र में विभिन्न बिंदुओं पर विभव का मान भिन्न-भिन्न होगा। यदि एक धनावेशित कण को एक विद्युत क्षेत्र में रखा जाए तो इसकी प्रवृत्ति उच्चतर विभव से निम्नतर विभव की ओर जाने की होती है ताकि इसकी स्थितिज ऊर्जा कम हो सके। अगले पाठ में आप पढ़ेंगे कि विभवान्तर की संकल्पना किस प्रकार विद्युत परिपथों में धारा प्रवाह को आसानी से समझने में सहायक सिद्ध हो सकती है।

*विद्युत क्षेत्र के किसी बिंदु पर* ***विद्युत विभव*** *एकांक धनात्मक आवेश को विद्युत क्षेत्र के बाहर से उस बिंदु तक लाने में किये गये कार्य के बराबर है।* विद्युत विभव एक अदिश राशि है ओर यह किये गये कार्य से संबंधित है।

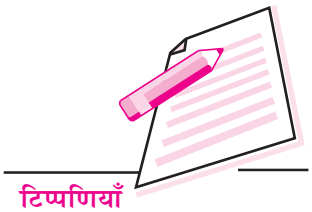
### एलिसेन्ड्रो कॉन्टे वोल्टा
### (1745-1827)

कोमो, इटली में जन्मे वोल्टा, पाविआ (Pavia) में 20 वर्षों से अधिक प्रोफेसर रहे। उन्होंने बहुत भ्रमण किया था। वह अपने समय के बहुत से व्यक्तियों के परिचित थे। उन्होंने निर्णयात्मक रूप से यह सिद्ध किया कि ल्युइगी गैल्वानी द्वारा मेंढक की मांसपेशियों में अवलोकन की गयी प्राणी विद्युत (जैव विद्युत) किसी अम्लीय या लवणीय विलयनों द्वारा पृथक्कृत दो भिन्न धात्वीय पदार्थों के बीच घटित होने वाली सामान्य घटना है। इस प्रेक्षण के आधार पर उन्होंने प्रथम वैद्युत रासायनिक सेल का आविष्कार किया जिसे वोल्टिक सेल के नाम से जाना जाता हैं। विभवान्तर के मात्रक को उनके सम्मान में 'वोल्ट' नाम दिया गया है।

किसी बिंदु तक यदि विद्युत के क्षेत्र के विरुद्ध धनावेश द्वारा कार्य किया जाता है तो विभव धनात्मक और यदि वस्तु को अनंत से विद्युत क्षेत्र में किसी बिंदु तक स्थानांतरित करने में (इकाई धनावेश)पर विद्युत क्षेत्र द्वारा कार्य किया जाता है तो विभव ऋणात्मक होता है।

एक विद्युत क्षेत्र में चित्र (16.1) की भाँति दो बिंदुओं A और B पर विचार कीजिये। यदि एक परीक्षण आवेश $q_0$ को बिंदु $A$ से बिंदु $B$ तक एक बाह्य बल के द्वारा किसी भी मार्ग से ले जाया जाता है तो बाह्य बल द्वारा किया गया कार्य

$$W_{AB} = q_0 (V_B - V_A) \qquad (16.1)$$





अत: बिंदु $A$ और $B$ के बीच विभवान्तर

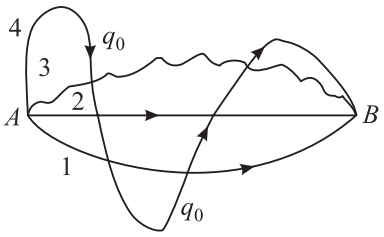
$$V_{AB} = V_B - V_A = \frac{W_{AB}}{q_0} \qquad (16.2)$$

यहाँ पर $V_A$ और $V_B$ क्रमश: $A$ व $B$ बिंदुओं पर विभव हैं। यदि आवेश को एक बिंदु से दूसरे बिंदु तक ले जाने में कार्य किया जाता है तो उनके बीच विभवान्तर होता है। यह ध्यान रहे कि यह कार्य पथ पर निर्भर नहीं करता है। इसी कारण विद्युत क्षेत्र को संरक्षी क्षेत्र कहा जाता है।

विभव और विभवान्तर की SI इकाई **वोल्ट** है।

**1 वोल्ट = 1 जूल/1 कूलॉम**

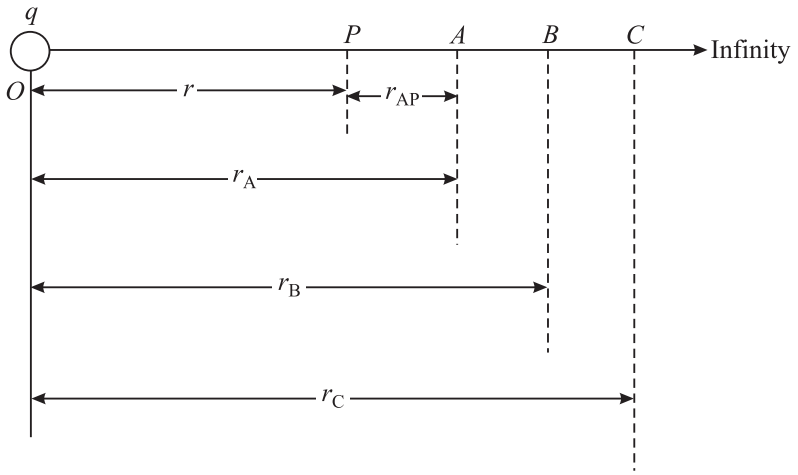
अर्थात् यदि एक कूलॉम के आवेश को विद्युत क्षेत्र में एक बिंदु से दूसरे बिंदु तक ले जाने में 1 जूल कार्य किया जाय तो उन बिंदुओं के बीच विभवान्तर 1 वोल्ट होता है। यदि किसी 1 कूलॉम के आवेश को अनन्त से विद्युत क्षेत्र के किसी बिंदु पर लाने में 1 जूल का कार्य किया जाय तो उस बिंदु पर विभव 1 वोल्ट होता है।




**चित्र 16.1: विद्युत क्षेत्र में एक परीक्षण आवेश को एक बिंदु से दूसरे बिंदु तक ले जाने में किया गया कार्य पथ पर निर्भर नहीं करता है।**

यहाँ ध्यान दें कि किसी बिंदु पर विभव एकमात्र (अद्वितीय) राशि नही हैं क्योंकि इसका मान हमारे शून्य स्थितिज ऊर्जा (अनन्त) के चुनाव पर निर्भर करता है, लेकिन दो बिंदुओं के बीच विभवान्तर का एक अद्वितीय मान होता है।

### 16.1.1 एक बिंदु पर किसी बिंदु आवेश के कारण विभव




**चित्र 16.2: एकांक आवेश को अनंत से विद्युत क्षेत्र E में किसी बिन्दु P तक लाने में किया गया कार्य उस बिंदु पर विभव का मान होता है।**

हम बिंदु O पर स्थित $+q$ बिन्दु आवेश के कारण बिन्दु P पर विद्युत विभव का मान ज्ञात करना चाहते हैं (चित्र 16.2), जहाँ $OP = r$। इस बिन्दु आवेश के कारण बिन्दु P पर विद्युत क्षेत्र,

$$E_p = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \times \frac{q}{r^2} \tag{16.3}$$

इसी प्रकार बिंदु $A$ पर विद्युत क्षेत्र

$$E_A = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r_A^2} \tag{16.4}$$

यदि बिंदु $A$ एवं $B$ एक-दूसरे के बहुत पास हों तो इनके बीच का औसत क्षेत्र $E_P$ और $E_A$ का गुणात्मक माध्य लिया जा सकता है।

$$E_{AP} = \sqrt{E_A \times E_p}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q}{r_A^2} \times \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q}{r^2}}$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r_A r} \tag{16.5}$$

अत: इस क्षेत्र में परीक्षण आवेश $q_0$ द्वारा अनुभव किए गए बल का परिमाण

$$F_{AP} = q_o E_{AP} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q\, q_0}{r_A r} \tag{16.6}$$

और आवेश $q_0$ को $A$ से $P$ तक ले जाने में किया गया कार्य

$$W_{AP} = F_{AP} \times r_{AP}$$

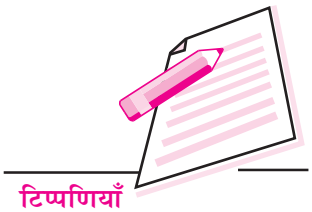
$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q\, q_o}{r_A r} \times (r_A - r)$$

$$= \frac{q\, q_0}{4\pi\varepsilon_0} \times \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_A}\right) \tag{16.7}$$

$r_{AP}$ बिंदुओं $A$ और $P$ के बीच दूरी है।

इसी प्रकार इस आवेश को B से A में ले जाने में किया गया कार्य

$$W_{BA} = \frac{q\, q_0}{4\pi\varepsilon_0} \times \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right) \tag{16.8a}$$





इसी प्रकार परीक्षण आवेश को O से B में ले जाने में किया गया कार्य

$$W_{CB} = \frac{q\,q_0}{4\pi\varepsilon_0} \times \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_C}\right) \qquad (16.8b)$$

अत: आवेश को अनंत से बिंदु $p$ पर ले जाने तक में किया गया कार्य

$$W = \frac{q\,q_0}{4\pi\varepsilon_0} \times \frac{1}{r} - \frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} + \frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_C} \ldots + \ldots - \frac{1}{\infty}$$

$$= \frac{q\,q_0}{4\pi\varepsilon_0} \times \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\infty}\right)$$

$$= \frac{q\,q_0}{4\pi\varepsilon_0 r} \qquad (16.9)$$

परिभाषा से एक बिंदु पर विभव का मान

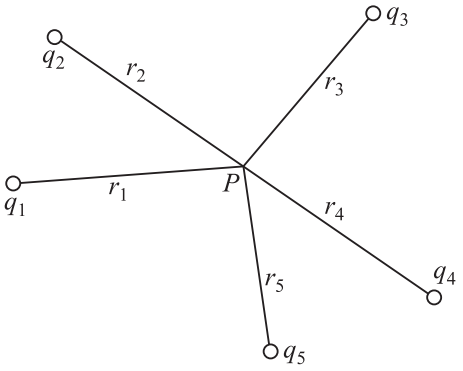
$$V_P = \frac{W}{q_0}$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r} \qquad (16.10)$$

ध्यान दें कि किसी बिंदु पर विभव इसकी दूरी का व्युत्क्रमानुपाती होता है और इसका धनात्मक या ऋणात्मक मान इस बात पर निर्भर करता है कि $q$ धनात्मक है या ऋणात्मक। यदि $q_1$, $q_2$, $q_3$ ..... आदि परिमाण के बहुत से आवेश हों तो किसी बिंदु पर विद्युत विभव प्रत्येक आवेश के कारण विभवों का अदिश योग है (चित्र 16.3)। अत:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \ldots$$

$$= \sum_{i=1}^{\infty} \frac{q_i}{4\pi\varepsilon_0 r_i} \qquad (16.11)$$




**चित्र 16.3: बिंदु $P$ पर आवेशों के निकाय के कारण विभव**

## 16.1.2 एक विद्युत-द्विध्रुव के कारण किसी बिंदु पर विभव

हम $2l$ दूरी से पृथककृत $+q$ व $-q$ आवेशों के एक निकाय को लेते हैं जिसका केन्द्र $O$ है। आवेश क्रमश: $A$ व $B$ बिंदुओं पर स्थित हैं। हम एक बिंदु P, जिसके ध्रुवीय निर्देशांक $(r,\theta)$

हैं अर्थात् $OP = r$ तथा $\angle BOP = \theta$, है जैसा कि चित्र 16.4. में दर्शाया गया है पर विभव का परिकलन करना चाहते हैं। यहाँ पर $AP = r_1$ और $BP = r_2$। हम आसानी से A व B बिन्दुओं पर स्थित आवेशों के कारण बिंदु P पर विभव के मान की गणना कर सकते हैं:

$$V_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \times \frac{(-q)}{r_1}$$

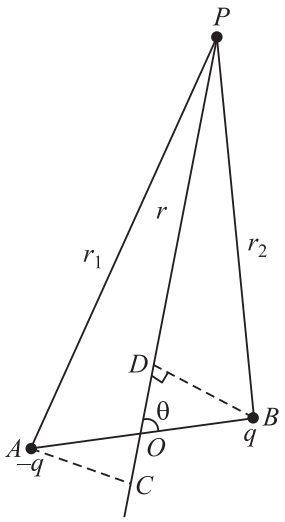
और $$V_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \times \frac{q}{r_2}$$

बिंदु $P$ पर दोनों आवेशों के कारण विभव

$$V = V_1 + V_2$$

$$V = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right] \qquad (16.12)$$

इस परिणाम को एक अधिक सुविधाजक रूप में प्रस्तुत करने के लिये हम $O$ को $P$ से जोड़ने वाली रेखा पर बिंदु A और बिंदु B से अभिलंब खींचते हैं। $\Delta BOD$ से हम पाते हैं कि $OD = l\cos\theta$ और $\Delta OAC$ से हमें प्राप्त होता है $OC = l\cos\theta$। एक छोटे से द्विध्रुव के लिये $(AB << OP)$, चित्र 16.4की सहायता से हम लिख सकते हैं कि $PB = PD$ और $PA = PC$




**चित्र 16.4: एक बिंदु *P* पर विद्युत द्विध्रुव के कारण विद्युत विभव**

$$r_1 = r + l\cos\theta$$

$$r_2 = r - l\cos\theta$$

इन दोनों परिणामों को समीकरण (16.12) में प्रयोग करने पर, हमं निम्न समीकरण प्राप्त होता है:

$$V = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{(r - \ell\cos\theta)} - \frac{1}{(r + \ell\cos\theta)}\right]$$

$$= \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{(2\ell\cos\theta)}{(r^2 - \ell^2\cos^2\theta)}\right]$$

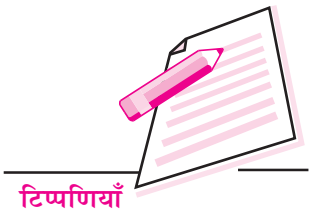
$$= \frac{q \times 2\ell\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

यहाँ, क्योंकि $l << r$

अत: $l^2\cos^2\theta$ को $r$ की तुलना में नगण्य मान लिया गया है।

द्विध्रुव–आघूर्ण $(p = q \times 2\ell)$, के पदों में हम इस परिणाम को लिख सकते हैं,

$$V = \frac{p\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \qquad (16.13)$$





यह समीकरण स्पष्ट करता है कि द्विध्रुव के लिए, दूरी के साथ विभव में परिवर्तन बिन्दु आवेश के लिए संगत व्यंजक से भिन्न होता है। यहाँ यह दूरी के वर्ग के व्युत्क्रमानुपाती होता है।

आइये अब हम कुछ विशिष्ट प्रकरणों पर विचार करें:

## विशेष प्रकरण

**प्रकरण I :** जब बिंदु $P$ द्विध्रुव की अक्षीय स्थिति में धनावेश की ओर हो, तब $\theta = 0$ और $\cos \theta = 1$ तब समीकरण (16.13) का रूप निम्नवत हो जाता है

$$V_{\text{अक्षीय}} = \frac{p}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \qquad (16.14)$$

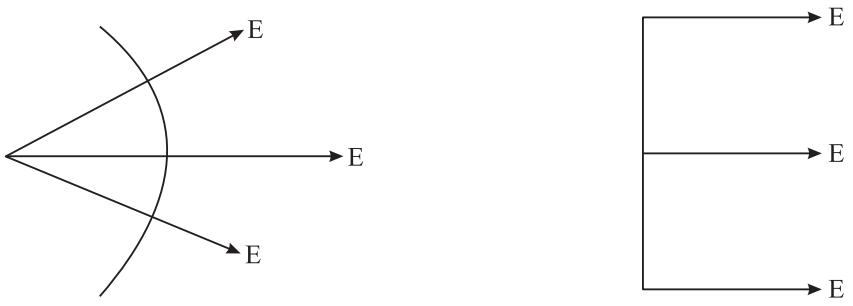
**प्रकरण II :** जब बिंदु $P$ द्विध्रुव की अक्षीय स्थिति में ऋणावेश की ओर हो, तब $\theta = 180°$ और $\cos \theta = -1$। अत:

$$V_{\text{अक्षीय}} = -\frac{p}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \qquad (16.15)$$

**प्रकरण III :** जब बिंदु निरक्षीय स्थिति में लम्ब समद्विभाजकपर स्थित हो, तब $\theta = 90°$ और $\cos \theta = 0$.

$$V_{\text{लंबार्धक}} = 0 \qquad (16.16)$$

अर्थात् द्विध्रुव के कारण उसकी लंबार्धक रेखा के प्रत्येक बिंदु पर विभव का मान शून्य होता है। जब द्विध्रुव को त्रिविमीय दिक्स्थान में कागज के अभिलम्बवत् रखा जाता है तो लंबार्धक रेखा कागज के तल पर स्थित होगी। इस तल के समस्त बिंदुओं पर विभव समान (अर्थात् शून्य) होगा, ऐसे तल को **समविभव पृष्ठ** (Equipotential surface) कहते हैं। समविभव पृष्ठ के प्रत्येक बिन्दु पर विद्युत क्षेत्र अभिलम्बवत् होता है। समविभव पृष्ठ के एक बिन्दु से दूसरे बिन्दु तक किसी आवेश को स्थानान्तरित करने में कोई कार्य नहीं करना होता है।

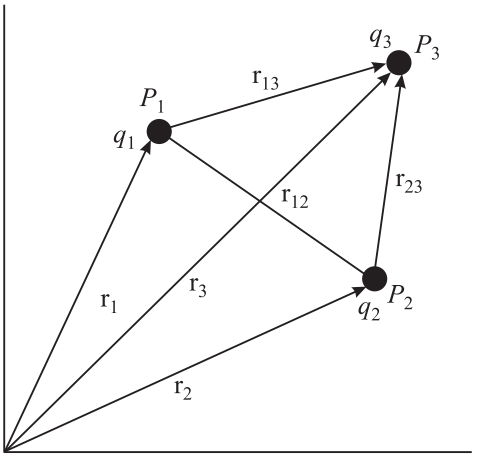



(a) गोलीय समविभव तल (b) समतल समविभव तल

चित्र 16.5 समविभव तल और विद्युत क्षेत्र रेखायें

### 16.1.3 बिंदु आवेशों के एक निकाय की स्थितिज ऊर्जा

विद्युत स्थितिज ऊर्जा किसी आवेश निकाय की विद्युत क्षेत्र में उसकी स्थिति के कारण ऊर्जा होती है। जब आवेश एक दूसरे से अनन्त दूरी पर होते हैं तो वे अन्योन्यक्रिया नहीं करते। ऐसी स्थिति में उनकी स्थितिज ऊर्जा शून्य होती है। आवेशों के निकाय का निर्माण करना चाहें तो आवेशों को एक दूसरे के निकट लाने के लिये कार्य किया जायेगा। यह किया गया कार्य आवेशों के निकाय की स्थितिज ऊर्जा के रूप में संचित होता है। इसे आवेश निकाय की वैद्युत स्थितिज ऊर्जा कहते हैं। अत: बिंदु आवेशों के निकाय की स्थितिज ऊर्जा, आवेशों को एक-एक कर अनन्त दूरी से लाकर निकाय निर्माण में किये गये कुल कार्य से परिभाषित की जाती है।




**चित्र 16.6 पृथक्कृत बिंदु आवेशों के एक निकाय की स्थितिज ऊर्जा**

माना लीजिए एक बिंदु आवेश $q_1$ एक बिंदु $P_1$ पर स्थित है जिसका दिक्स्थान में स्थिति सदिश $\mathbf{r}_1$ है। दूसरा बिंदु आवेश $q_2$ अनंत दूरी पर है। इसे $P_2$ बिंदु पर लाना है जिसका स्थिति सदिश $\mathbf{r}_2$ है जहां $P_1P_2 = \mathbf{r}_{12}$, जैसा कि चित्र 16.6 में दिखाया गया है। हम जानते हैं कि $q_1$ आवेश के कारण $P_2$ पर विभव

$$V_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1}{|\mathbf{r_{12}}|} \qquad (16.17)$$

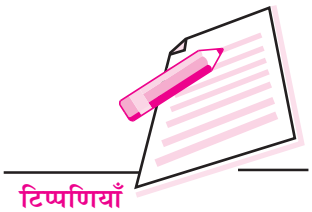
विभव की परिभाषा के अनुसार $q_2$ आवेश को अनंत दूरी से $P_2$ बिंदु तक लाने में किया गया कार्य है।

$$W = (P_2 \text{पर विभव}) \times \text{आवेश का मान}$$

यह कार्य आवेश $q_1$ तथा $q_2$ के निकाय में स्थितिज ऊर्जा के रूप में संचित होता है। अत:

$$U = \frac{q_1 \times q_2}{4\pi\varepsilon_0 |\mathbf{r}_{12}|} \qquad (16.18)$$

यदि दो आवेश सजातीय हैं तो उनके बीच लगाने वाले प्रतिकर्षी बलों के विरुद्ध उन्हें समीप लाने में कार्य किया जाता है और इस प्रकार निकाय की स्थितिज ऊर्जा बढ़ती है। दूसरी ओर उन्हें पृथक करने के लिए विद्युत क्षेत्र द्वारा कार्य किया जाता है जिसके फलस्वरूप स्थितिज ऊर्जा का ह्रास होता है। यदि आवेश विजातीय हो तो उन्हें एक दूसरे के निकट लाने में निकाय की स्थितिज ऊर्जा का ह्रास होता है और उन्हें पृथक कर दूर ले जाने में निकाय की स्थिजि ऊर्जा में वृद्धि होती है।





समीकरण (16.17) को तीन बिंदु आवेशों के लिए निम्न प्रकार से लिखा जा सकता है

$$U = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{q_1q_2}{r_{12}} + \frac{q_1q_3}{r_{13}} + \frac{q_2q_3}{r_{23}}\right) \qquad (16.19)$$

इस भांति हम किसी भी बिंदु आवेश संख्या के निकाय की स्थितिज ऊर्जा की गणना कर सकते हैं।

समीकरणों (16.3) और(16.13) को संयोजित करने पर हमें एक समान विद्युत क्षेत्र में रखे द्विध्रुव की स्थितिज ऊर्जा के लिए निम्न सूत्र प्राप्त होता है

$$U_\theta = -pE\cos\theta = -\mathbf{p}.\mathbf{E} \qquad (16.20)$$

जहाँ **p** विद्युत क्षेत्र **E** में द्विध्रुव आघूर्ण है और $\theta$ , **p** तथा **E** के बीच का कोण है।

## 16.2 विद्युत क्षेत्र और विद्युत विभव में संबंध

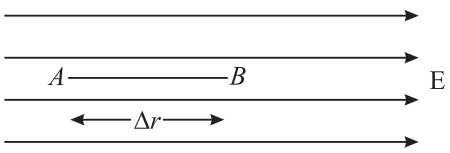
एक समान विद्युत क्षेत्र में दो बिंदुओं A और B पर विचार कीजिए जिनके बीच की दूरी $\Delta r$ है। परिभाषा के अनुसार दो बिंदुओं A और B के बीच विभवान्तर $\Delta V$ एकांक धनावेश को A से B तक ले जाने में किए गए कार्य के बराबर होता है।

$\Delta V$ = (धनावेश पर लगने वाला बल) × $(AB)$ $= \mathbf{E}.\Delta\mathbf{r} = E(\Delta r)\cos 180^O$
$= -\mathbf{E}\,\Delta\mathbf{r}$

या
$$\mathbf{E} = -\frac{\Delta V}{\Delta r} \qquad (16.21)$$

ऋणात्मक चिह् दर्शाता है कि विद्युत क्षेत्र के विरुद्ध कार्य किया जाता है।

अत: किसी बिंदु पर विद्युत क्षेत्र उस बिन्दु पर विभव की दूरी के साथ परिवर्तन की दर का ऋणात्मक मान होता है। विभव कम होने की दिशा को हम क्षेत्र की दिशा कहते हैं। याद रखिए कि विद्युत विभव एक अदिश राशि है लेकिन विभव प्रवणता एक सदिश राशि है क्योंकि यह आंकिक रूप से विद्युत क्षेत्र के बराबर है।




उपरोक्त संबंध की सहायता से एकसमान विद्युत क्षेत्र के लिए हम लिख सकते हैं :

$$E = \frac{V_A - V_B}{d} \qquad (16.22)$$

यहां पर $V_A$ और $V_B$ क्रमश: A व B बिंदुओं पर, जिनके बीच पृथक्करण दूरी $d$ है, विभव के मान हैं।

**उदाहरण 16.1 :** एक 10 वोल्ट की बैटरी है। एक $1.6 \times 10^{-19}$ C के धनावेश को इसके ऋणात्मक सिरे से धनात्मक सिरे तक ले जाने में कितना कार्य किया जाएगा?

**हल :** समीकरण (16.2) के अनुसार,

$$V_{AB} = W_{AB} \text{ èk } q_O$$

चूंकि $V_{AB}$= 10 V और $q_0 = 1.6 \times 10^{-19}$ C, अत:

$$W_{AB} = (10\text{V}) \times (1.6 \times 10^{-19}\text{C})$$

$$= 1.6 \times 10^{-18}\,\text{J जूल}$$

**उदाहरण 16.2 :** एक बिंदु आवेश निर्देशांकों के मूल स्थान (0, 0) पर स्थित है। बिंदु x पर विद्युत विभव 400 V और विद्युत क्षेत्र का परिणाम 150 N $C^{-1}$ है। $x$ तथा $q$ के मानों की गणना करें।

**हल :** विद्युत क्षेत्र

$$E = \frac{V}{x}$$

$$150 = \frac{400}{x}$$

और $$x = 2.67 \text{ m}$$

स्मरण करें कि विद्युत क्षेत्र निम्न व्यंजक द्वारा दिया जाता है

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{x^2}$$

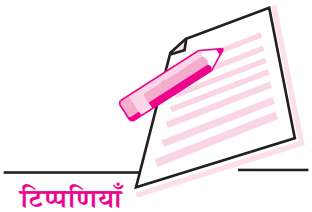
हम इसमें $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \times 10^9$ N $C^{-2}$ $m^2$, $E$ = 150 N $C^{-1}$ और $x$ = 2.67 m प्रतिस्थापित करते हैं:

$$q = \frac{(150\text{N C}^{-1}) \times (2.67\text{m})^2}{9 \times 10^9\,\text{N C}^{-2}}$$

$$= 11.9 \times 10^{-8}\,\text{C}$$

## पाठगत प्रश्न 16.1

1. एक $R$ त्रिज्या के धात्विक गोले की सतह पर $+q$ आवेश समान रूप से वितरित है। गोले के केन्द्र से $r$ ($> R$) दूरी पर विभव का मान क्या है?
2. जब एक बिंदु आवेश को $q$ बिन्दु आवेश के चारों ओर $r$ त्रिज्या के वृत्त में घुमाया जाता है। किए गए कार्य की गणना कीजिए।





3. एक क्षेत्र में विद्युत विभव का $V$ का मान स्थिर है। उस क्षेत्र में विद्युत क्षेत्र के बारे में आप क्या कह सकते है?
4. यदि किसी बिंदु पर विद्युत क्षेत्र शून्य हो तो क्या आवश्यक रूप से उस बिंदु पर विभव शून्य होगा?
5. क्या दो समविभव तल एक दूसरे को काट सकते हैं?

आवेशों के चालन के आधार पर पदार्थ मुख्य रूप से दो समूहों में रखे जा सकते हैं। चालक और विद्युत रोधी ठोस। पदार्थ में विद्युत चालन समान्यतया मुक्त इलेक्ट्रॉनों के कारण होता है और तरल पदार्थों में आयनों के कारण होता है। चालकों में मुक्त इलेक्ट्रॉन (आवेश वाहक) पाये जाते हैं जिनके कारण विद्युत क्षेत्र आरोपित किए जाने पर विद्युत धारा प्रवाहित होती है। धातु अच्छे चालक हैं। जिन पदार्थों में कोई मुक्त आवेश वाहक नहीं होते उन्हें विद्युत रोधी कहा जाता है। लकड़ी, आबनूस, काँच, क्वार्ट्ज, अभ्रक, आदि सामान्य विद्युत रोधी हैं। ऐसे पदार्थ जिनकी चालकता चालकों और विद्युत रोधियों के बीच की होती है **अर्धचालक** कहलाते हैं। अच्छे चालकों और अच्छे विद्युत रोधियों के बीच विद्युत चालकता का अनुपात $10^{20}$ की कोटि का होता है। आइए, अब यह जाने कि चालक विद्युत क्षेत्र में कैसा व्यवहार करते हैं।

### 16.2.1 स्थिर विद्युत क्षेत्र में चालकों का व्यवहार

चालकों में इलेक्ट्रॉन होते हैं जो अपने परमाणुओं के साथ मजबूती से जुड़े नहीं होते। ये चालक के अंदर घूमने के लिए स्वतंत्र होते हैं। लेकिन इलेक्ट्रॉनों (आवेशों) का विद्युत क्षेत्र की अनुपस्थिति में एक स्थान से दूसरे स्थान पर नेट स्थानान्तरण नहीं होता। चालक को स्थिर विद्युत साम्यावस्था में माना जाता है।

चित्र 16.7 (a) को देखें जिसमें बाह्य विद्युत क्षेत्र E में एक चालक को रखा हुआ दर्शाया गया है। मुक्त इलैक्ट्रॉन विद्युत क्षेत्र की विपरीत दिशा में त्वरित होते हैं। इसके कारण चालक के तल ABCD में इलेक्ट्रॉन जमा हो जाते हैं और तल EFGH इलेक्ट्रॉनों के निष्कासन के कारण धनावेशित हो जाता है। ये आवेश (ऋणावेश ABCD तल में और धनावेश EFGH तल में) अपना स्वंय का क्षेत्र बनाते हैं जो E की दिशा के विपरीत दिशा में होते हैं। इलेक्ट्रॉनों का EFGH तल से ABCD तल की ओर स्थानान्तरण तब तक होता रहता है जब तक कि $E$ का मान $E_1$ के बराबर नहीं हो जाता है। यह स्थिर विद्युत साम्यावस्था है जो कि सामान्यतया $10^{-16}$ सेंकड में प्राप्त हो जाती है (स्थापित हो जाती है)। अत: हम कह सकते हैं कि साम्यावस्था लगभग तुरंत ही स्थापित हो जाती है। यदि कोई चालक खोखला हो तो उसके अंदर विद्युत क्षेत्र शून्य होता है। चित्र (16.7(b))

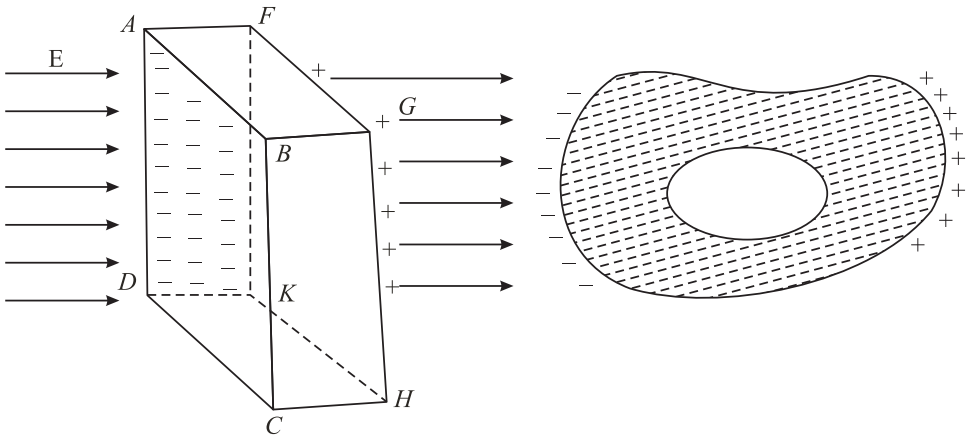
ये परिणाम एक आवेशित चालक या बाह्य विद्युत क्षेत्र के कारण एक उदासीन चालक पर प्रेरित आवेश की स्थिति में सत्य होते हैं।

चालक के इस गुण को *स्थिर विद्युत रक्षण* में बाह्य विद्युत क्षेत्र से एक विशेष क्षेत्र की रक्षा के लिए उपयोग किया जाता है। संवेदनशील यंत्रों को बाह्य विद्युत के प्रभाव से बचाने के लिए इन्हें खोखले चालकों में बंद किया जाता है। इसीलिए तड़ित विद्युत से बचने के लिए

कार या बस के अंदर रहना बाहर रहने की अपेक्षा अधिक सुरक्षित है। कार या बस का धात्विक कवच तड़ित विद्युत से स्थिर विद्युत सुरक्षा प्रदान करता है।

स्थिर विद्युत साम्य में चालकों के निम्न गुण होते हैं:

- चालक के अंदर कोई विद्युत क्षेत्र नहीं होता है।
- आवेशित चालक के बाहर विद्युत क्षेत्र चालक की सतह के लम्बवत होता है और यह चालक के आकार पर निर्भर नहीं करता है।
- चालक में केई भी आवेश इसकी सतह पर ही होता है।




**चित्र.16.7 : स्थिर विद्युत रक्षण: (a) बाह्य विद्युत क्षेत्र E मुक्त इलेक्ट्रानों को तल ABCD पर खींच लेता है। तल EFGH जिसमें इलैक्ट्रॉनों की कमी हो जाती है, धनावेशित हो जाता है। लेकिन चालक के अंदर परिणामी विद्युत क्षेत्र शून्य होता है। (b) यदि एक अनियमित आकार का चालक अंदर से खोखला हो तो इसके अंदर क्षेत्र शून्य होता है।**

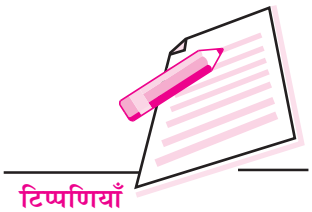
## 16.3 धारिता

मान लीजिये हमारे पास दो चालक है जिनमें समान परिमाण लेकिन विपरीत प्रकृति के आवेश $+Q$ और $-Q$ हैं। उनके बीच विभवान्तर $V$ है। ऐसे दो चालकों के निकाय को संधारित्र कहते हैं। प्रयोगों द्वारा पाया गया है कि विभवान्तर आवेश की मात्रा का समानुपाती होता है। आवेश बढ़ने के साथ विभवान्तर भी बढ़ता है लेकिन इनका अनुपात स्थिर रहता है। इस अनुपात को संधारित्र की **धारिता** कहते हैं।

$$C = Q / V \qquad (16.23)$$

धारिता को दो में से किसी एक चालक के आवेश व दो चालकों के बीच विभवान्तर के अनुपात के रूप में परिभाषित किया जाता है। यह एक संधारित्र की आवेश संग्रह करने की क्षमता का मापक है।

मात्रकों की SI प्रणाली में, धारिता को फैरड में मापा जाता है। धारिता 1 फैरड कहलाती है यदि 1 कूलॉम आवेश द्वारा 1 वोल्ट का विभवान्तर हो जाय।





$$1 \text{ फैरड} = \frac{1 \text{ कूलॉम}}{1 \text{ वोल्ट}} \qquad (16.24)$$

पिछले अध्याय में आपने पढ़ा कि कूलॉम आवेश की एक बहुत बड़ी इकाई है। इसका तात्पर्य है कि फैरड धारिता की एक बहुत बड़ी इकाई है। सामान्यतया हम धारिता का मान माइक्रोफैरड या पिको फैरड में व्यक्त करते हैं

$$1 \text{ माइक्रोफैरेड} = 10^{-6} \text{ फैरेड, जिसे लिखा जाता है } \mu F$$

$$1 \text{ पिकोफैरेड} = 10^{-12} \text{ फैरेड, जिसे लिखा जाता है } pF$$

किसी विद्युत परिपथ में एक संधारित्र को बराबर लम्बाई की दो समान्तर रेखाओं द्वारा निरुपित किया जाता है।

### 16.3.1 एक गोलीय चालक की धारिता

$r$ त्रिज्या के एक गोले को $q$ आवेश दिया गया। माना कि गोले का विभव V है, तब

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r}$$

चूंकि $C = q/V$, अत:

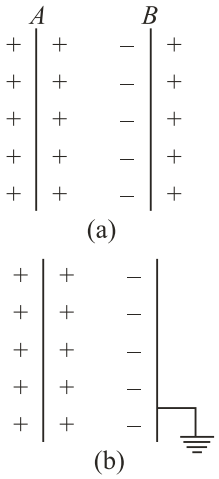
$$C = \frac{q}{q/4\pi\varepsilon_0 r} = 4\pi\varepsilon_0 r = \frac{r}{9\times10^9} \qquad (16.25)$$

यह दर्शाता है कि गोलीय संधारित्र की धारिता इसकी त्रिज्या के समानुपाती होती है और इसका आंकिक मान त्रिज्या को $9 \times 10^9$ से विभाजित करने पर प्राप्त होता है, जहां पर त्रिज्या का मान मीटर में लिया जाता है। उदाहरणार्थ, एक 0.18 m त्रिज्या के गोले की धारिता

$$C = \frac{0.18}{9} \times 10^{-9} \text{ F} = 20 \text{ pF}$$

## 16.3.2 संधारित्रों के प्रकार

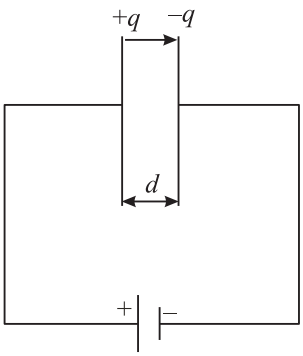
अपनी भौतिकी की प्रयोगशाला में आप अनेक प्रकार के संधारित्रों को देखेंगे। आपके शहर की विद्युत आपूर्ति प्रणाली भी संधारित्रों का प्रयोग करती है। ये रेडियो, टी.वी., प्रवर्धकों तथा दोलकों जैसी युक्तियों में भी महत्वपूर्ण घटकों की तरह कार्य करते हैं। एक संधारित्र दो चालकों से मिलकर बना होता है जिनमें से एक आवेशित होता है और दूसरा समान्यतया भूसंपर्कित होता है। संधारित्र के सिद्धांत को समझने के लिए हम एक विद्युतरोधी पृथक्कृत धात्विक प्लेट A के बारे में विचार करते हैं। इसे कुछ धनावेश ($q$) प्रदान किया जाता है जिससे इसका अधिकतम विभव ($V$) हो जाता है (इसके बाद आवेश दिये जाने पर वह लीक हो जाता है)। प्लेट की धारिता $q$/V है।




**चित्र.16.8 : संधारित्र का कार्य-सिद्धांत**

अब आप एक दूसरी प्रथक्कृत धात्विक प्लेट B को A के समीप लाइये। प्रेरण द्वारा B के A के समीप वाले (A की ओर वाले) तल में ऋणावेश उत्पन्न होता है और B के A के दूर वाले तल में बराबर परिमाण का धनावेश आ जाता है। प्रेरित ऋणावेश A के विभव को कम करना चाहता है और प्रेरित धनावेश A के विभव को बढ़ाना चाहता है। जब B को भूसंपर्कित कर दिया जाता है तो (चित्र 16.8) B पर प्रेरित धनआवेश मुक्त होने के कारण पृथ्वी की ओर प्रवाहित हो जाता है (वास्तव में ऋणावेश पृथ्वी से प्लेट की ओर प्रवाहित होता है) प्लेट पर धनावेश गतिहीन रहते हैं लेकिन ऋणावेश बने रहेंगे क्योंकि ये A के धनावेश से बंधे हैं। इस प्रेरित ऋणावेश के कारण A का विभव कम हो जाता है लेकिन धारिता बढ़ जाती है।

अत: हम इस निष्कर्ष पर पहुंचते हैं कि *एक विद्युतरोधी चालक की धारिता को इसके निकट एक अनावेशित भूसंपर्कित चालक को लाकर बढ़ाया जा सकता* है। यह संधारित्र का सिद्धांत है। संधारित्रों का उपयोग विद्युत आवेश की बड़ी मात्रा को अर्थात विद्युत ऊर्जा को एक थोड़े समय अंतराल के लिए एक छोटे से स्थान पर संचित करने के लिए किया जाता है। एक समांतर प्लेट संधारित्र में धातु की दो समांतर प्लेटें होती हैं जिनमें से प्रत्येक का क्षेत्रफल A होता है और जो एक छोटी-सी दूरी d से परस्पर पृथकृत होते हैं। उनके बीच के स्थान में कोई कोई विद्युत रोधी माध्यम जैसे हवा, कागज, अभ्रक, काँच आदि होता है। प्लेटों को बैटरी के दो सिरों से जोड़ दिया जाता है जैसे कि चित्र 16.9 में दर्शाया गया है। जब संधारित्र पूर्ण रूप से आवेशित हो जाता है तो इन प्लेटों पर धनावेश $(+q)$ और ऋणावेश $(-q)$ आ जाता है। इन आवेशों के कारण इनके बीच में एकसमान विद्युत क्षेत्र E स्थापित हो जाता है। जब प्लेटों के बीच की दूरी प्लेटों के आकार की तंत्र में बहुत कम हो तो प्लेटों की सीमाओं में विद्युत क्षेत्र की विकृति को नगण्य मान लिया जा सकता है।



**चित्र. 16.9: एक समांतर प्लेट संधारित्र**

यदि किसी एक प्लेट का पृष्ठ आवेश घनत्व $\sigma$ हो तो उनके बीच कार्य करने वाले बल का परिमाण होगा

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon_0 A}$$

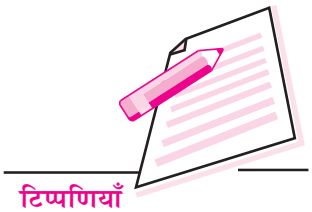
और प्लेटों के बीच का विभवान्तर होगा

$$V = Ed$$

अत: ऐसे समांतर प्लेट संधारित्र की धारिता जिसके दो प्लेटों के बीच की दूरी तथा जिनके बीच केवल वायु है;

$$C_0 = \frac{q}{V} = \frac{q}{qd/\varepsilon_0 A}$$

$$= \frac{\varepsilon_0 A}{d} \qquad (16.26)$$





यह दर्शाता है कि समान्तर प्लेट संधारित्र की धारिता प्लेटों के क्षेत्रफल A के समानुपाती और उनके बीच की दूरी $d$ के व्युक्रमानुपाती होती है। इसका अर्थ यह हुआ कि अधिक धारिता के लिए प्लेटों का क्षेत्रफल अधिक होना चाहिए और उनके बीच की दूरी $d$ कम होनी चाहिए। यदि प्लेटों के बीच के माध्यम को परावैद्युत द्रव्य से, जिसकी विद्युतशीलता $\varepsilon$ हो भर दिया जाए तो उस स्थिति में समान्तर प्लेट संधारित्र की संधारिता होगी

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} = \frac{K\varepsilon_0 A}{d}$$

जहाँ $\varepsilon$ माध्यम की विद्युतशीलता और $K$ माध्यम का परावैद्युतांक है। अत:

$$C = KC_0 \qquad (16.27)$$

यदि संधारित्र को एक परावैद्युतांक $K$ वाले परावैद्युत पदार्थ से भर दिया जाए तो संधारित्र की धारिता वायु का निर्वात में संधारिता की $K$ गुना हो जाएगी।

### 16.3.3 आपेक्षिक विद्युतशीलता या परावैद्युताँक

कूलॉम के नियम के अनुसार निर्वात में r दूरी से पृथक्कृत दो आवेशों $q_1$ और $q_2$ के बीच लगने वाला बल

$$F_V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad (16.28)$$

जहां पर $\varepsilon_0$ निर्वात की विद्युतशीलता है। यदि इसी दूरी पर स्थित इन्हीं आवेशों के बीच एक माध्यम हो तो उनके बीच अन्योन्यक्रिया बल होगा

$$F_m = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad (16.29)$$

समीकरणों (16.28) और (16.29) का संयोजन करने पर हमे प्राप्त होता है

$$\frac{F_v}{F_m} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r \qquad (16.30)$$

जहां $\varepsilon_r$ ( या $K$) माध्यम की आपेक्षिक विद्युतशीलता है। इसे माध्यम का पैरावैद्युतांक भी कहते हैं। हम परावैद्युताँक को एक निश्चित दूरी से पृथक्कृत दो आवेशों के बीच निर्वात में लगने वाले स्थिर विद्युत बल और उनके बीच द्रव्य माध्यम रख दिए जाने की स्थिति में लगने वाले बल के अनुपात के रूप में भी परिभाषित कर सकते हैं।

परावैद्युतांक को निम्नवत् भी परिभाषित किया जा सकता है:

$$K = \frac{\text{प्लेटों के बीच परावैद्युत पदार्थ होने पर धारिता}}{\text{प्लेटों के बीच निर्वात होने पर धारिता}}$$

$$= \frac{C_m}{C_0}$$

अत:

$$C_m = KC_0 \qquad (16.31)$$

धातुओं के लिए $K = \infty$, और अभ्रक के लिए $K \approx 6$, और कागज के लिए $K = 3.6$.

## 16.4 संधारित्रों का संयोजन

संधारित्र विद्युत परिपथ के बहुत ही महत्वपूर्ण अवयव हैं। परिपथों में भिन्न-भिन्न धारिताओं के संधारित्रों की आवश्यकता पड़ती है। कभी-कभी एक इच्छित धारिता का संधारित्र उपलब्ध नहीं होता है। ऐसी स्थितियों में उपलब्ध संधारित्रों के संयोजन से हम वाँछित मान का संधारित्र बना सकते हैं। संधारित्रों के संयोजन की दो अति सामान्य विधियां हैं:

- श्रेणी संयोजन
- पार्श्व संयोजन

अब हम इनके बारे में ज्ञान प्राप्त करते हैं।

### 16.4.1 संधारित्रों का पार्श्व संयोजन

पार्श्व क्रम में प्रत्येक संधारित्र की एक (प्रथम) प्लेट को एक बिंदु A पर और सभी की दूसरी प्लेट को बिंदु B पर जोड़ा जाता है जैसा चित्र (16.10) में दर्शाया गया है।

मान लीजिए बिन्दुओं A और B के बीच विभवान्तर V लगाया गया है। ध्यान दीजिए इस प्रकार के संयोजन में सभी संधारित्रों की दो प्लेटों के बीच का विभवान्तर V है। अत: इनके आवेश भिन्न-भिन्न होंगे जो कि निम्न भांति होंगे:

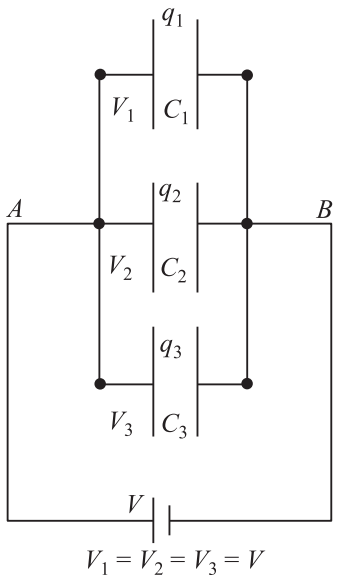
$$q_1 = C_1 V$$
$$q_2 = C_2 V$$
$$q_3 = C_3 V \qquad (16.32)$$

सभी संधारित्रों में कुल आवेश

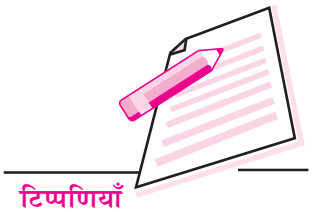
$$q = q_1 + q_2 + q_3$$
$$q = (C_1 + C_2 + C_3 + \ldots)V \qquad (16.33)$$

अत: यदि $C_p$ पार्श्व संयोजन तुल्य धारिता हो तो

$$q = C_p V$$




**चित्र. 16.10 :पार्श्व क्रम में जुड़े संधारित्र**





इन संबंधों से हमें प्राप्त होता है

$$q = C_p V = (C_1 + C_2 + C_3)V$$

जिससे संबंध प्राप्त होता है

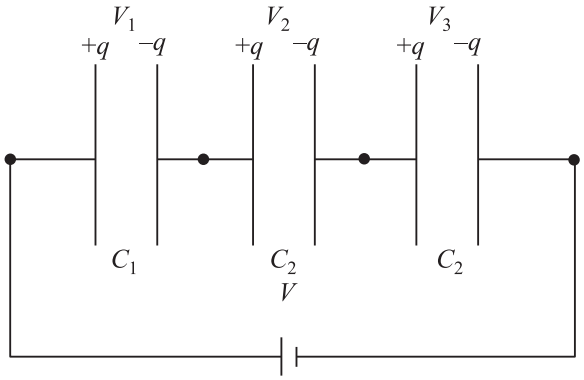
$$C_p = C_1 + C_2 + C_3 = \sum_{i=1}^{n} C_i \qquad (16.34)$$

इस प्रकार हम देखते हैं कि बहुत से संघारित्रों के पार्श्व संयोजन की तुल्य धारिता उनकी पृथक-पृथक धारिताओं के योग के बराबर होती है।

याद रखिए कि पार्श्व संयोजन में, सभी संधाारित्रों का विभवान्तर समान होता है लेकिन आवेश उनकी धारिताओं के अनुपात मे वितरित हो जाता है। ऐसा संयोजन आवेश संग्रह करने के लिए प्रयुक्त होता हे।

### 16.4.2 संधारित्रों का श्रेणी संयोजन

संधारित्रों के श्रेणी संयोजन में पहले संधारित्र की पहली प्लेट को विद्युत स्रोत से जोड़ा जाता है। पहले संधारित्र की दूसरी प्लेट को दूसरे संधारित्र की पहली प्लेट से जोडा जाता है और इसी प्रकार यह सिलसिला आवश्यकतानुसार वाँछित मान के लिए जारी किया जा सकता है। अंतिम संधारित्र की दूसरी प्लेट को भूसंपर्कित कर दिया जाता है (चित्र 16.11) माना लीजिए स्रोत द्वारा संधारित्र $C_1$ की प्रथम प्लेट के भीतरी को $+q$ ईकाई आवेश प्रदान किया जाता है। विद्युत प्रेरण द्वारा इसकी दूसरी प्लेट पर $-q$ आवेश और प्लेट के बाहर की ओर $+q$ आवेश उत्पन्न होगा जो कि $C_2$ में प्रवाहित हो जाता है और यह क्रम चलता रहता है चित्र 16.00) इस प्रकार प्रत्येक संधारित्र में $q$ मात्रा का आवेश आ जाता है। चूंकि इन सभी संधारित्रों की धारितायें भिन्न हैं, अत: इन दो प्लेटों के बीच विभवान्तर भिन्न-भिन्न होंगे। अत:




**चित्र.16.11 : श्रेणी संयोजन में संधारित्र, प्रत्येक संधारित्र में आवेश की मात्रा समान है**

$$V_1 = \frac{q}{C_1}, V_2 = \frac{q}{C_2}, V_3 = \frac{q}{C_3} \qquad (16.35)$$

यदि $C_s$ इस श्रेणी संयोजन की कुल धारिता हो तो,

$$V = \frac{q}{C_s}$$

और

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \qquad (16.36)$$

अत:
$$\frac{q}{C_s} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}$$

या
$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \qquad (16.37)$$

श्रेणी क्रम में जुड़े $n$ संधारित्रों के लिए हम लिख सकते हैं

$$\frac{1}{C_s} = \sum_{i=1}^{1} \frac{1}{C};$$

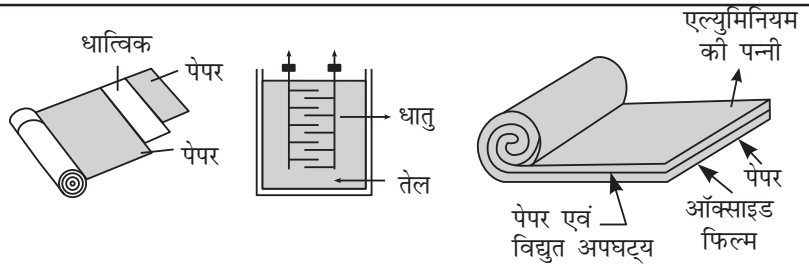
अत: **श्रेणी क्रम में अनेकों संधारित्रों की परिणामी धारिता का व्युत्क्रम सभी संधारित्रों की अपनी-अपनी धारिताओं के व्युत्क्रमों के योग के बराबर होता है।** समी. 16.37 से स्पष्ट हो जाता है कि $Cs$ का मान $C_1$, $C_2$ व $C_3$ में से छोटी धारिता से भी कम है। ध्यान दीजिये कि **श्रेणी क्रम में सभी संधारित्रों में समान आवेश रहता है लेकिन उनकी प्लेटों के बीच विभवान्तर अलग-अलग होता है जो कि उनकी धारिताओं का व्युत्क्रमानुपाती होता है।**

## विविध प्रकार के संधारित्र

सामान्यतया तीन प्रकार के संधारित्र व्यावसायिक उपयोग में लाये जाते हैं। इनका विन्यास चित्र 16.12 में दर्शाया गया है।

1. **पेपर संधारित्र:** पैराफीन द्वारा संसेचित बहुत बड़े और पतले पेपर (या मायलर) को उपयुक्त आकार (आयाताकार) में काटा जाता है। धातु की अनेक बारीक पन्नियां भी उसी आकार में काटी जाती हैं। फिर इन्हें एकान्तर क्रम में एक के ऊपर एक बिछाया जाता है। बाहरी शीट मायलर, फिर इसके ऊपर धात्विय पन्नी, फिर माइलर के क्रम में रखी जाती हैं। इस पूरे तंत्र को एक बेलन के रूप में मोड़ दिया जाता है और इस प्रकार एक छोटी युक्ति का निर्माण हो जाता है।

2. **धात्विक पट्टी संधारित्र:** बहुत सी धातुओं की पक्तियों को एकान्तर क्रम में दो धातु की छड़ों से चित्र 16.11b के अनुसार जोड़कर सिलिकॉन तेल में डुबो दिया जाता है जो कि प्लेटों के बीच परावैद्युत का काम करता है। उच्च वोल्टता वाले संधारित्र प्राय: इसी प्रकार के होते हैं। माइक्रो फैरड धारिता के परिवर्ती संधारित्र भी इसी प्रकार के होते हैं। उनमें परावैद्युत पदार्थ के रूप में हवा होती है। प्लेटों के एक समुच्चय को नियत रखा जाता है और दूसरे समुच्चय को चलनशील बनाया जाता है। चलनशील प्लेटों को घुमाने पर उनका प्रभावी क्षेत्रफल परिवर्तित होता है जिसके फलस्वरूप धारिता परिवर्तित हो जाती है। आप ऐसे संधारित्र रेडियो रिसीवर में देख सकते हैं। परिवर्ती धारिता विभिन्न रेडियो स्टेशनों की ट्यूनिंग में काम आती है।




**चित्र.16.12 : विभिन्न प्रकार के संधारित्र : a) पेपर संधारित्र, b) परिवर्तनी संधारित्र c) विद्युत अपघट्य संधारित्र**

3. **विद्युत अपघट्य संधारित्र:** विद्युत अपघट्य संधारित्र को चित्र 16.12 (c) में दर्शाया गया है। एक धात्वीय पन्नी को एक बेलन के आकार में इस प्रकार लपेटा जाता है कि इसकी दो परतों के बीच सदैव एक अंतर बना रहता है। इस तंत्र को एक विद्युत अपघट्य विलयन में डुबो दिया जाता है। यह विलयन आयनों के कारण चालक होता है। विद्युत अपघट्य और धात्विक पन्नी के बीच एक वोल्टेज लगाई जाती है। विद्युत अपघट्य के चालक गुण के कारण पन्नी पर विद्युतरोधी आक्साइड की पतली परत बन जाती है। यह आक्साइड परत एक परावैद्युत पदार्थ का काम करती है। चूंकि यह परावैद्युत परत अत्यंत पतली होती है, इस तंत्र से बड़े परिमाण (मात्रा) में धारिता प्राप्त की जा सकती है। इस प्रकार के संधारित्र में धनात्मक और ऋणात्मक सिरों को इंगित करना आवश्यक है, संधारित्र को गलत जोड़ दिए जाने पर ऑक्साइड की परत नष्ट हो जाती है और संधारित्र एक चालक की भांति कार्य करने लगता है। इस प्रकार का संधारित्र का उपयोग कम वोल्टेज पर बहुत अधिक आवेश संग्रहण के लिए किया जाता है।

**उदाहरण 16.3 :** किसी समान्तर प्लेट वायु संधारित्र की धारिता 22.0 μF है। प्लेटों के बीच की दूरी $d$ है। प्लेटों के बीच में $d/2$ मोटाई की एक $K = 5$ परावैद्युतॉक की पट्टी रखी जाती है। प्रभावी धारिता की गणना कीजिये।

**हल:** हवा में संधारित्र की धारिता

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 A}{d} = 22.0\ \mu F$$

नये तंत्र को दो संधारित्रों का श्रेणी संयोग माना जा सकता है:

$$C_1 = \frac{K\varepsilon_0 A}{d/2} = \frac{2K\varepsilon_0 A}{d} = 2\,KC_0$$

और

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 A}{d/2} = \frac{2\varepsilon_0 A}{d} = 2C_0$$

प्रभावी धारिता $C$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

या $$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$= \frac{2KC_0 \times 2C_0}{2KC_0 + 2C_0}$$

$$= \frac{2KC_0}{K+1}$$

$$= \frac{10 \times 22 \times 10^{-6}\text{F}}{6}$$

$$= 36.7\ \mu\text{F}$$

## पाठगत प्रश्न 16.2

1. धारिता की विमायें लिखिये।
2. एकसमान विद्युत क्षेत्र $E$ में $d$ दूरी से पृथक्कृत दो बिंदुओं के बीच विभवान्तर क्या होगा?
3. एक वायु संधारित्र से संबंधित राशियां $C_0, E_0$ व $V_0$ हैं। ये $C, E$ और $V$ से कैसे संबंधित हैं उस स्थिति में जबकि उपरोक्त संधारित्र में K परावैद्युतांक का पदार्थ भर दिया जाता है?
4. वायु से भरे संधारित्र का क्षेत्रफल ज्ञात कीजिये जबकि प्लेटों के बीच दूरी 50 cm है और उसकी धारिता का मान 1.0 μF है।

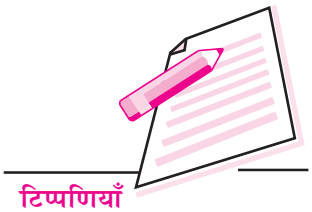
### 16.4.3 एक संधारित्र में संचित ऊर्जा

एक संधारित्र के चार्जिंग (आवेशन) की कल्पना ऐसे की जा सकती है कि मानो किसी बाह्य कारक, जैसे बैटरी द्वारा संधारित्र की धनावेशित प्लेट की ओर से इलेक्ट्रॉनों को निकाल कर उन्हें ऋणावेशित प्लेट को स्थानान्तरित किया जा रहा हो। इस आवेश के स्थानान्तरण में कुछ कार्य किया जाता है जो कि संधारित्र में स्थिर विद्युत स्थितिज ऊर्जा के रूप में संचित हो जाता है। यह ऊर्जा बैटरी (संचित रासायनित ऊर्जा) से प्राप्त होती है। जब इस संधारित्र को एक प्रतिरोधक के जरिए निरोविशत किया जाता है तो ऊर्जा ऊष्मा के रूप में निकलती है।

मान लीजिये एक अनावेशित संधारित्र को एक बैटरी से जोड़ देने पर वह अधिकतम q आवेश संचित करता है। चार्जिंग धीरे-धीरे होती है। संधारित्र की प्लेटों के बीच प्रारंभिक विभवान्तर शून्य और अंतिम विभवान्तर V है। पूरी प्रक्रिया के अंतराल में औसत विभवान्तर

$$\frac{0+V}{2} = \frac{V}{2}$$

$$= \frac{q}{2C}$$





चार्जिंग (आवेशन) में किया गया कार्य,

$$W = \text{आवेश} \times \text{विभवान्तर}$$

$$= q \frac{q}{2C} = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$$

अत: स्थितिज ऊर्जा

$$U = \frac{1}{2} qV = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} = \frac{1}{2} CV^2 \qquad (16.38)$$

यह ऊर्जा प्लेटों के बीच विद्युत क्षेत्र में संचित हो जाती है। संचित ऊजा धारिता की समानुपाती होती है। यह विभवान्तर बढ़ने के साथ बढ़ती है। लेकिन प्रत्येक संधारित्र एक निश्चित सीमा तक ही ऊर्जा संग्रह कर सकता है विभवान्तर का मान एक सीमा से अधिक हो जाने पर स्वत: विसर्जन प्रारम्भ हो जाता है। आवेशित संधारित्र की प्लेटों को छूना खतरनाक है। संधारित्र आपके शरीर के जरिये विसर्जित हो सकता है जिससे एक विद्युत झटका लगता है। ऐसा झटका यदि पूर्णावेशित उच्च धारिता मान के संधारित्रों से लगे तो वह प्राणघातक हो सकता है।

## 16.5 परावैद्युत पदार्थ और परावैद्युत ध्रुवण

हम जानते हैं कि परावैद्युत पदार्थ अचालक होते है जो विद्युत प्रभाव को बिना चालन के पारगमित कर देते हैं। परावैद्युत दो प्रकार के होते हैं: अध्रुवीय और ध्रुवीय। आइये अब हम इनके बारे में जानने का प्रयास करें।

### (a) अध्रुवीय परावैद्युत पदार्थ

इस प्रकार के परावैद्युत पदार्थों में अणुओं के धनात्मक आवेश का केन्द्र ऋणात्मक आवेश के केन्द्र का संपाती होता है। सामान्य अवस्था में प्रत्येक अणु का द्विध्रुव आघूर्ण शून्य होता है। ये अणु अधिकतर सममित होते हैं, जैसे नाइट्रोजन, आक्सीजन, बैन्जीन, मीथेन आदि।

### (b) ध्रुवीय परावैद्युत पदार्थ

ध्रुवीय परावैद्युत पदार्थों के अणुओं की आकृति असमित होती है, एक जैसे जल, अमोनिया, हाइड्रोक्लोरिक अम्ल आदि। इन अणुओं में धनात्मक एवं ऋणात्मक आवेशों के केन्द्र एक दूसरे से किसी निश्चित दूरी पर होते हैं और इनका एक निश्चित द्विध्रुव आघूर्ण होता है।

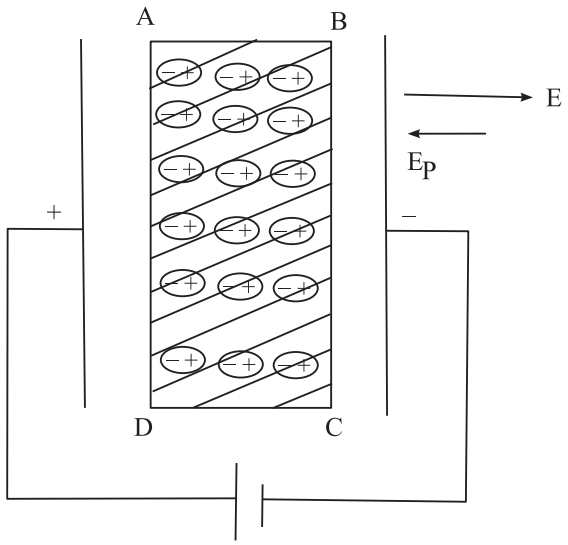
जब बाह्य विद्युत क्षेत्र **E** में अध्रुवीय परावैद्युत पदार्थ रखे जाते हैं तो प्रत्येक धनात्मक आवेश के अणु का केन्द्र **E** की विपरीत दिशा में विस्थापित होता है। बाह्य विद्युत क्षेत्र के कारण अध्रुवीय परावैद्युत अणु में धनात्मक और ऋणात्मक आवेशों के केन्द्रों के बीच कुछ दूरी हो जाती है तब परावैद्युत ध्रुवित कहलाता है और प्रत्येक अणु में एक छोटा सा द्विध्रुव आघूर्ण प्रेरित हो जाता है। यथार्थ में बाह्य विद्युत क्षेत्र के कारण बल जो आवेश केन्द्रों को दूर करता है केन्द्रों के आकर्षण बल से संतुलित हो जाता है (साम्यावस्था स्थापित हो जाती है) और अणु ध्रुवित हो जाता है। अणु द्वारा प्राप्त प्रेरित द्विध्रुव आघूर्ण के मान को हम निम्न प्रकार लिख सकते हैं।

$$\mathbf{p} = \alpha \varepsilon_0 \mathbf{E}$$

जहां $\alpha$ अनुक्रमानुपाती नियतांक है और परमाण्विक/आण्विक ध्रुवणता कहलाता है। मान लीजिये कि संधारित्र की प्लेटों के मध्य विद्युत क्षेत्र E में अध्रुवीय पदार्थ की पट्टी ABCD रखी गयी है जैसा कि चित्र 16.13 में दर्शाया गया है। परावैद्युत पट्टी ध्रुवित हो जाती है। परावैद्युत अणुओं के नाभिक ऋणात्मक प्लेट की ओर और इलेक्ट्रॉन धनात्मक प्लेट की ओर विस्थापित हो जाते हैं। ध्रुवण के कारण परावैद्युत के अंदर विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}_p$ उत्पन्न हो जाता है जिसकी दिशा E के विपरीत होती है। अत: अध्रुवीय परावैद्युत की उपस्थिति में प्लेटों के मध्य विद्युत क्षेत्र घट जाता है अर्थात् ध्रुवित परावैद्युत में प्रभावी विद्युत क्षेत्र का मान

$$\mathbf{E}(\text{प्रभावी}) = \mathbf{E} - \mathbf{E}_p \qquad (16.39)$$

इस प्रकार संधारित्र की प्लेटों के बीच विभवान्तर कम हो जाता है (क्योंकि $V = Ed$), तथा उसके फलस्वरूप संधारित्र की धारिता बढ़ जाती है (क्योंकि $C = q/V$).




**चित्र.16.13 : आवेशित संधारित्र की प्लेटों के बीच एक परावैद्युत पट्टी**

## स्थिर वैद्युकता के अनुप्रयोग

विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी के कई क्षेत्रों में लाभप्रद सहायता करने के साथ ही स्थिर वैद्युकता विद्युत चुम्बकत्व के सिद्धांत की आधारशिला है।

- संधारित्र अधिकतर इलेक्ट्रॉनिक एवं इलेक्ट्रिक परिपथों के आवश्यक अवयव हैं।ये विद्युत संप्रेषण में एक निर्णायक भूमिका अदा करते हैं।
- आवेश का पता करने के लिए प्रयोग की गयी एक सरल युक्ति स्वर्ण पत्र विद्युत दर्शी ने कॉस्मिक किरण-अनुसंधान का मार्ग प्रशस्त किया।
- बैंजामिन फ्रैंकलिन द्वारा आविष्कृत तड़ित चालक ऊँचे भवनों को तड़ित विद्युत के आघातों से बचाता है।
- फोटो प्रतिलिपि बनाने का उपकरण स्थिर वैद्युकता के सिद्धांत पर कार्य करता है।

## पाठगत प्रश्न 16.3

1. एक $C_1 = 12$ mF और दूसरा $C_2 = 4$ mF धारिता के संधारित्र संयोजित किये गये हैं। तंत्र की प्रभावी धारिता ज्ञात कीजिये जब उन्हें (a) श्रेणीक्रम में जोड़ा गया है (b) पार्श्व क्रम में जोड़ा गया है।

2. चार संघारित्रों को आपस में चित्र 16.13 की भांति जोड़ा गया है। तंत्र की तुल्य धारिता ज्ञात कीजिये।

3. एक वायु संधारित्र $C = 4$ mF एक 12V बैटरी से जुड़ा है। ज्ञात करें

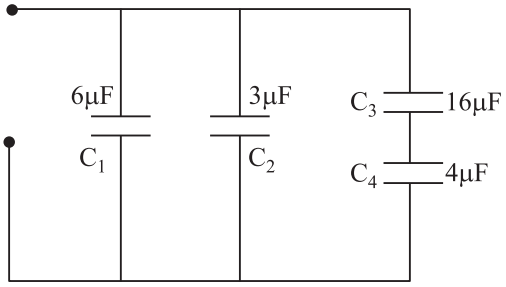
   (a) इसके पूर्णावेशित होने पर $Q$ का मान?

   (b) प्लेटों पर आवेश का मान जब इसकी प्लेटों के बीच K=5 स्थिर वैद्युताँक का परावैद्युत पदार्थ भर दिया जाए।

   (c) प्लेटों के बीच विभवान्तर

   (d) नये संधारित्र की धारिता

4. एक समान्तर प्लेट संधारित को एक बैटरी से जोड़कर V विभवान्तर तक आवेशित किया जाता है। बैटरी को हटाने के बाद, प्लेटों के बीच के खाली स्थान पर K परावैद्युतांक की पट्टी रख दी जाती है जो पूरी खाली जगह को घेर लेती है। संघारित्र में कितनी ऊर्जा संग्रहीत है? (a) पहली स्थिति में (b) दूसरी स्थिति में (c) कौन अधिक है और क्यों?




**चित्र 16.14 : संधारित्रों का संयोजन**

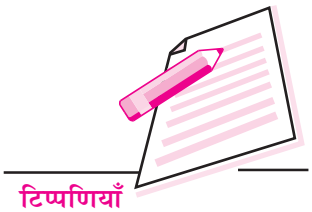
## आपने क्या सीखा

- स्थिर वैद्युत क्षेत्र संरक्षी होता है।
- विद्युत क्षेत्र से किसी बिंदु पर विभव एक इकाई धनावेश को अनंत से उस दूरी तक लाने में किए गए कार्य के बराबर होता है।
- किसी स्थिर विद्युत क्षेत्र में एक आवेश को एक बिंदु से दूसरे बिंदु तक स्थानान्तरित करने में किया गया कार्य पथ पर निर्भर नहीं करता है।
- यदि एक परीक्षण आवेश को अनंत से विद्युत क्षेत्र के किसी बिंदु तक लाने में किया गया कार्य 1 जूल हो तो उस बिंदु पर विभव का मान 1 वोल्ट होता है।

- किसी द्विध्रुव की विषुवत रेखीय स्थिति में किसी भी बिंदु पर विभव का मान शून्य होता है।
- एक समविभव तल में प्रत्येक बिंदु का विभव समान होता है।
- विद्युत क्षेत्र में किसी बिन्दु पर विभव की दूरी के साथ ऋणात्मक परिवर्तन की दर को विभव प्रणवता कहते हैं। यह क्षेत्र का परिमाण बताती है।
- स्थिर वैद्युत रक्षण दिक्स्थान में किसी क्षेत्र को बाह्य विद्युत प्रभाव से बचाने की घटना है।
- किसी चालक की धारिता इसके पदार्थ पर निर्भर नहीं करती वरन इसके माध्यम की प्रकृति पर निर्भर करती है।
- एक समान्तर प्लेट संधारित्र को हवा या निर्वात के बजाय K परावैद्युताँक के द्रव्य से भर देने पर संधारित्र की धारिता K गुना बढ़ जाती है।
- आपेक्षिक विद्युतशीलता परावैद्युत माध्यम वाले संधारित्र की धारिता और निर्वात माध्यम में संधारित्र की धारिता का अनुपात है।
- संधारित्रों के श्रेणी संयोजन में तुल्य धारिता सबसे कम धारिता से भी कम होती है।
- अध्रुवीय परावैद्युतों की उपस्थिति के कारण, संधारित्र की प्लेटों के बीच क्षेत्र घट जाता है।

## पाठांत प्रश्न

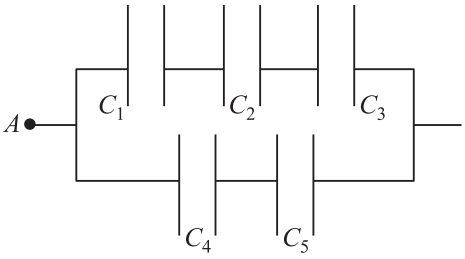
1. एक $q = 20\ \mu C$ के बिंदु आवेश से 30 cm दूरी पर स्थित एक बिंदु पर विभव का मान ज्ञात कीजिये।
2. एक समबाहु त्रिभुज के तीन कोनों पर 200 μC मान के तीन आवेश $q_1, q_2$ और $q_3$ रखे हुए हैं। एक भुजा की लंबाई 10cm है। इस निकाय की स्थितिज ऊर्जा ज्ञात कीजिए।
3. 3mm से पृथक्कृत प्लेटों के बीच विभवान्तर 12.0 V है। इस निकाय की स्थितिज ऊर्जा ज्ञात कीजिए।
4. दो आवेश $+e$ व $-e$ के आयन एक-दूसरे से $4.0 \times 10^{-10}$ m की दूरी पर स्थित हैं। इस निकाय की स्थितिज ऊर्जा ज्ञात कीजिए।
5. एक समान्तर प्लेट संधारित्र की दो प्लेटों $A$ व $B$ के बीच विभवान्तर 15 V है। एक प्रोटॉन ($m = 1.67 \times 10^{-27}$ kg) को $A$ से $B$.की ओर ले जाया जाता है। बिंदु B के पास प्रोटॉन की चाल ज्ञात कीजिए।
6. विमीय विधि से दिखाइए कि $Vq$ और $(½)mv^2$ तुल्य हैं? यहाँ संकेतों के सामान्य अर्थ हैं।
7. किन स्थितियों में समान्तर प्लेट संधारित्र की प्लेटों के बीच विद्युत क्षेत्र समान होता है?
8. एक r त्रिज्या का गोला $+q$ आवेश से आवेशित है। एक आवेश $q_0$ को इसके व्यास के एक सिरे से दूसरे सिरे तक ले जाने में किये गये कार्य की गणना कीजिए।





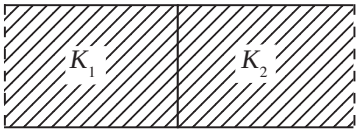
9. एक समान्तर प्लेट संधारित्र की धारिता $C_0$ व दो प्लेटों के बीच विभवान्तर $V_0$ है। एक प्लेट पर आवेश $+q_0$ है व प्लेटों के बीच की दूरी $d$ है। एक K=3 मान का परावैद्युत प्लेटों के बीच भर दिया जाता है। निम्न में से कौन सी राशियां बदलेंगी और क्यों: (i) धारिता (ii) आवेश (iii) विभवान्तर (iv) क्षेत्र घनत्व?

10. संधारित्रों के निम्न संयोजन को देखिये। A व B के बीच विभवान्तर 16V है।

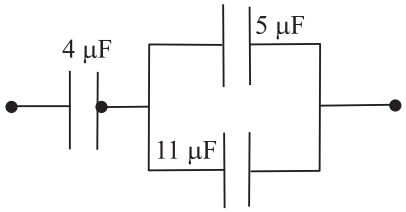



यदि $C_1 = 2\ \mu F$, $C_2 = 4\ \mu F$, $C_3 = 8\ \mu F$, $C_4 = 3\ \mu F$, $C_5 = 3\mu F$ हो तो ज्ञात कीजिए (a) A व B के बीच प्रभावी धारिता (b) प्रत्येक संधारित्र पर आवेश (c) प्रत्येक संधारित्र के दोनों प्लेटों के बीच विभवान्तर

11. एक वायु संधारित्र की धारिता 8μF है। दो समान आकार के परावैद्युत द्रव्य प्लेटों के बीच के स्थान को चित्र की भांति भर देते हैं परावैद्युतांक $K_1 = 3.0$ और परावैद्युतांक $K_2 = 6.0$। नये संधारित्र की धारिता ज्ञात कीजिए।



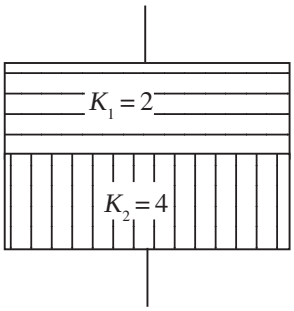

12. नीचे दियाये गये निकाय की तुल्य धारिता का मान ज्ञात कीजिए।




13. एक 3.0 μF परिमाण के संधारित्र 12.0 V तक आवेशित किया जाता है। फिर एक K = 7 मान के परावैद्युत पदार्थ से इसके खाली स्थान को भर दिया जाता है। दोनों दशाओं संचित ऊर्जा का अनुपात ज्ञात कीजिए।

14. एक $P = 3.5 \times 10^{-15}$ Cm द्विध्रुव आपूर्ण वाले द्विध्रुव को एक समान विद्युत क्षेत्र $E = 2.0 \times 10^4\ NC^{-1}$ में रखा जाता है। द्विध्रुव क्षेत्र से 60° का कोण बनाता है A (a) द्विध्रुव की स्थितिज ऊर्जा ज्ञात कीजिये (b) द्विध्रुव पर बल आघूर्ण का मान ज्ञात कीजिए।

15. एक समान्तर प्लेट संधारित्र की धारिता 12μF है। दो प्लेटों के बीच की दूरी 8mm है। दो समान आकार के भिन्न-भिन्न परावैद्युतॉक के परावैद्युत पदार्थ संधारित्र के खाली स्थान को निम्न प्रकार भरते हैं। नये संधारित्र की धारिता ज्ञात कीजिए।




## पाठगत प्रश्नों के उत्तर

### 16.1

1. $r\,(r > R)$ पर विभव

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r}$$

2. एक बिंदु आवेश के चारों ओर क्षेत्र की गोलीय सममिति होती है। अतः गोले का पृष्ठ सर्वत्र समविभव होता है। एक समविभव तल में आवेश के चलने में कोई कार्य नहीं किया जाता है।

3. $E = -\frac{dV}{dr}$ चूंकि $V$ का मान स्थिर है, $E$ का मान शून्य है।

अतः समीकरण (16.22) के अनुसार (16.22) :

$E = \frac{V_A - V_B}{d}$। चूंकि $V_A = V_B$, $E$ का मान शून्य होगा।

4. नहीं आवश्यक रूप से नहीं। जब $E = 0$, विभव का मान या तो शून्य होता है या स्थिर होता है।

5. नहीं, दो समविभव तल कभी भी एक दूसरे को नहीं काटते हैं, क्योंकि ऐसी स्थिति में कटान बिंदु पर विद्युत क्षेत्र की दिशा को दर्शाने के लिए हम दो लम्ब खींच सकते हैं जो कि विद्युत क्षेत्र की दो भिन्न-भिन्न दशाओं को दर्शायेगा।

16.2

1. $C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{\frac{\text{किया गया कार्य}}{\text{आवेश}}} = \frac{Q \times Q}{\text{किया गया कार्य}}$

$= \frac{Q^2}{\text{N.m.}}$

मूल मात्रक

$A = \frac{C}{s}$

$\therefore$ $C^2 = A^2 s^2$ और न्यूटन = द्रव्यमान $\times$ त्वरण = $kg \frac{m}{s^2}$

धारिता $= \frac{C^2}{Nm} = \frac{A^2 s^2}{kg \frac{m^2}{s^2}} = \frac{A^2 s^4}{kg\, m^2}$

$= A^2 s^4 (kg\, m^2)^{-1}$

2. एक समान्तर प्लेट संधारित्र में E का मान प्लेटों के बीच एक समान है। प्लेटों के बीच विभवान्तर

$V_A - V_B = E \times d.$

3. $C_0, E_0, V_0$ वायु संधारित्र के लिए

$C, E, V$ परावैद्युत संधारित्र के लिए

$k = \frac{C}{C_0}, k = \frac{V_0}{V}$ $k = \frac{E_0}{E}$.

4. $C = 1.0\ \mu F = 1.0 \times 10^{-6}$ F.

$d = 50$ cm $= 0.5$m.

$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d}$

$\therefore$ $A = \frac{Cd}{\varepsilon_0}$। चूंकि $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$,

$A = \frac{1.0 \times 10^{-6} \times 0.5}{8.85 \times 10^{-12}}$

$$= \frac{5\times10^{-7}}{8.85\times10^{-12}}$$

$$= 0.56 \times 10^5 \text{ m}^2$$

## 16.3

1 (a) 3 mF (b) 16 mF 2. 12.2μF

3. (a) 96mC (b) 0.480 C (c) 12 v (d) 40 mF

4. (a) $\frac{1}{2} C_0 V_0^2$ (b) $\frac{1}{2}\frac{(C_0V_0)^2}{C_0R} = \frac{1}{2k}C_0V_0^2$

(c) पहली स्थिति में ऊर्जा अधिक है क्योंकि यही ऊर्जा परावैद्युत को अंदर खींचने में प्रयुक्त होती है।

## पाठांत प्रश्नों के उत्तर

1. $6 \times 10^5$ V. 2. $1.08 \times 10^4$ J.

3. $4 \times 103$ V m $^{-1}$ 4. $-5.76 \times 10^{-19}$ J

5. $1.4 \times 109$ m $s^{-2}$

10. (a) $\frac{37}{14}$μF, (b) $\frac{128}{7}$μC, $\frac{128}{7}$μC, $\frac{128}{7}$μC, 24μC,

(c) $\frac{64}{7}$V, $\frac{32}{7}$V, $\frac{16}{7}$V, 8V, 8V

11. 36 μF. 12. $\frac{16}{5}$ μF.

13. 1 : 7 14. (a) $3.5 \times 10^{-11}$ J (b) $6 \times 10^{-11}$ N m.

15. 32 μF