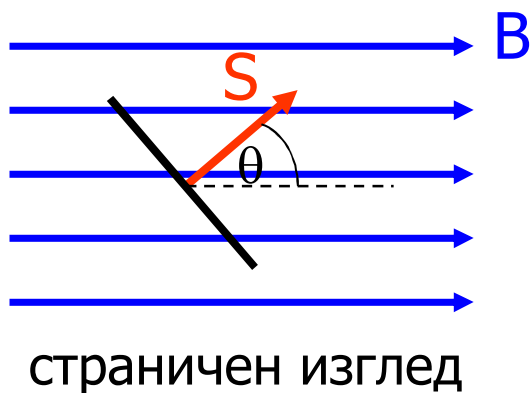
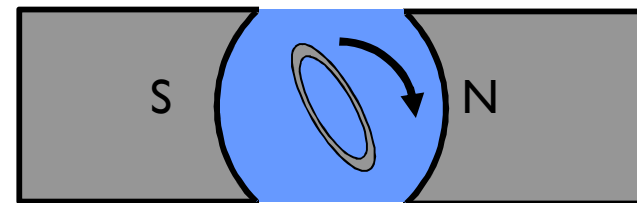


Приложение на закона на Фарадей

Пример: Токов контур в магнитно поле се върти с кръгова скорост ω . Какво е индуцираното ЕДН?



$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos(\theta)$$

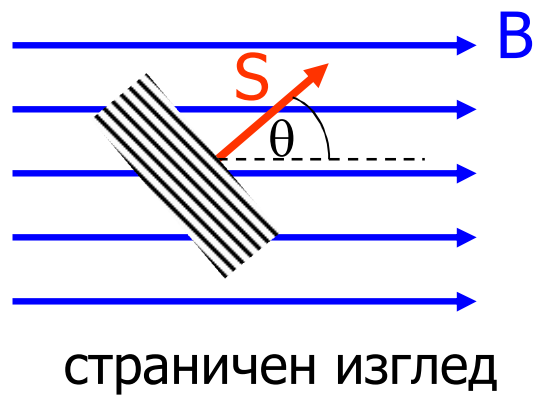
Избираме $\theta_0 = 0$. Тогава

$$\theta = \theta_0 + \omega t = \omega t.$$

$$\Phi_B = BS \cos(\omega t)$$

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} = - \frac{d(BS \cos(\omega t))}{dt}$$

$$\varepsilon = BS \omega \sin(\omega t)$$



Ако имаме N намотки

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\varepsilon = -N \frac{d(BS \cos(\omega t))}{dt}$$

$$\varepsilon = NBS \omega \sin(\omega t)$$

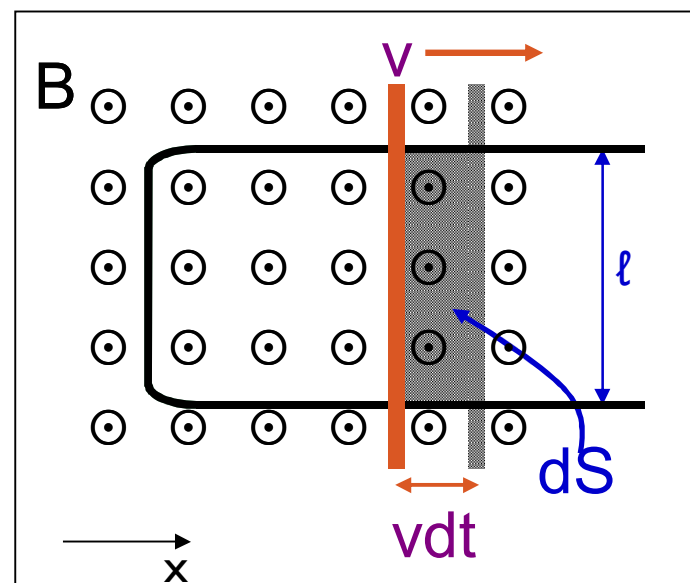
$|\varepsilon|$ е максимум когато $\theta = \omega t = 90^\circ$ or 270° ; т.е, когато Φ_B е нула. Скоростта с която магнитният поток се променя тогава е максимум. От друга страна, ε е нула когато магнитният поток има максимум.

Движение на проводник в магн. поле, чрез закона на Фарадей

Начин за индуциране на ЕДН е промяна на площта на затворения контур в м.п. Нека да видим как това работи.

U-образен проводник и подвижен проводящ прът затварящ контура са поставени в м.п.

Пръта се движи надясно с постоянна скорост v за време dt .



Пръта изминава разстояние vdt и площта заградена от затворения контур се увеличава с:

$$dS = l v dt .$$

Контур е перпендикулярен на м.п., така че магн. поток през контура е $\Phi_B = \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = BS$. ЕДН-то пресмятаме по закона на Фарадей.

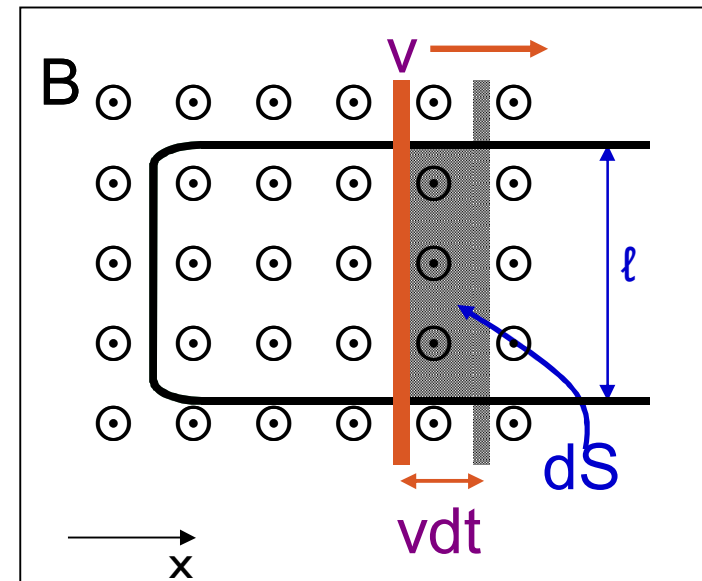
$$|\mathcal{E}| = \left| -N \frac{d\Phi_B}{dt} \right|$$

$$|\mathcal{E}| = \left| 1 \frac{d(BS)}{dt} \right|$$

$$|\mathcal{E}| = \left| \frac{B dS}{dt} \right|$$

$$|\mathcal{E}| = \left| B \ell \frac{dx}{dt} \right|$$

$$|\mathcal{E}| = B \ell v .$$

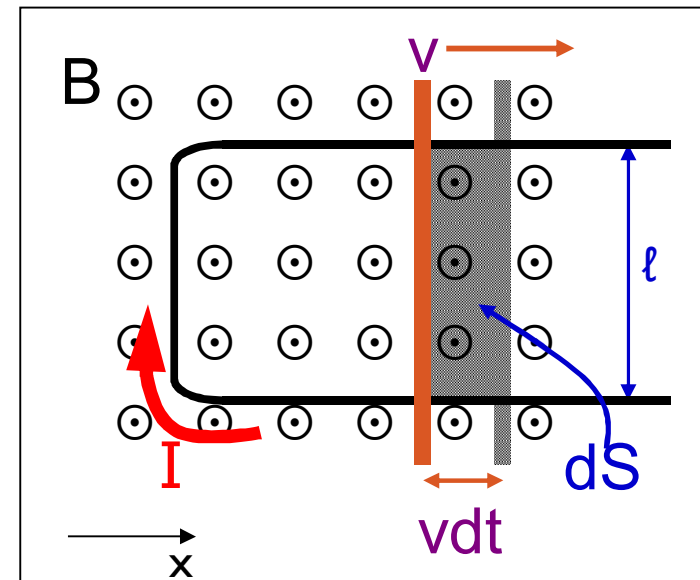


А посоката на тока?

Индуцираното ЕДН води до възникването на ел. ток.

Магнитния поток нараства (по-голяма площ).

Токът трябва да възпрепятства нарастването на магнитния поток (правилото на Ленц)



По часовниковата стрелка!

Движение на проводник в магнитно поле .. още един извод

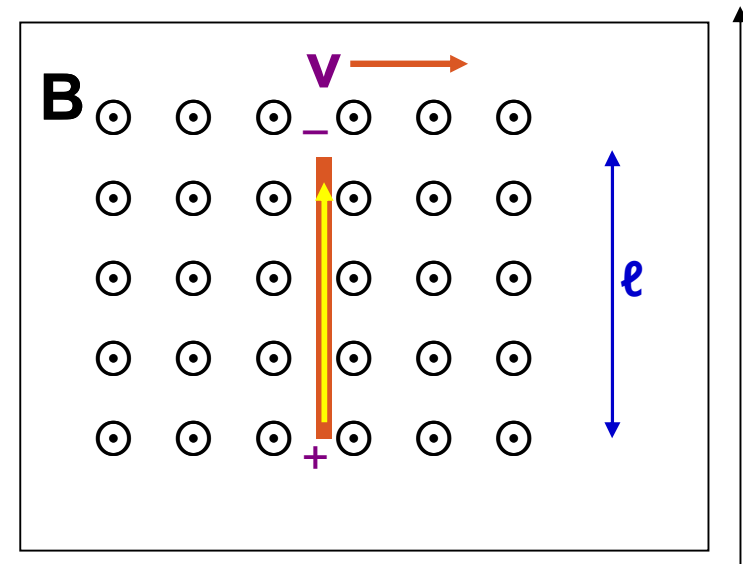
Разделените заряди в пръта създават електрично поле. Така ЕДН по проводника е:

$$\varepsilon = E\ell$$

Електричното поле действа със сила:

$$\vec{F}_E = q\vec{E} = -e\vec{E}$$

Равновесие имаме когато електричната и магнитната сила са равни по големина и противоположни по посока.



$$evB = eE = e\frac{\varepsilon}{\ell}$$

$$\Rightarrow \varepsilon = B\ell v$$

Променливо магнитно поле и вихрово електрично поле

- ✓ Циркулацията на магнитното поле $\neq 0$ а силовите му линии са затворени криви.
- ✓ Магнитното поле е вихрово.

Промяната на магнитното поле индуцира ли електрично?

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\Delta V = V_b - V_a = -Ed$$

$$\varepsilon = \Delta V = -Ed$$

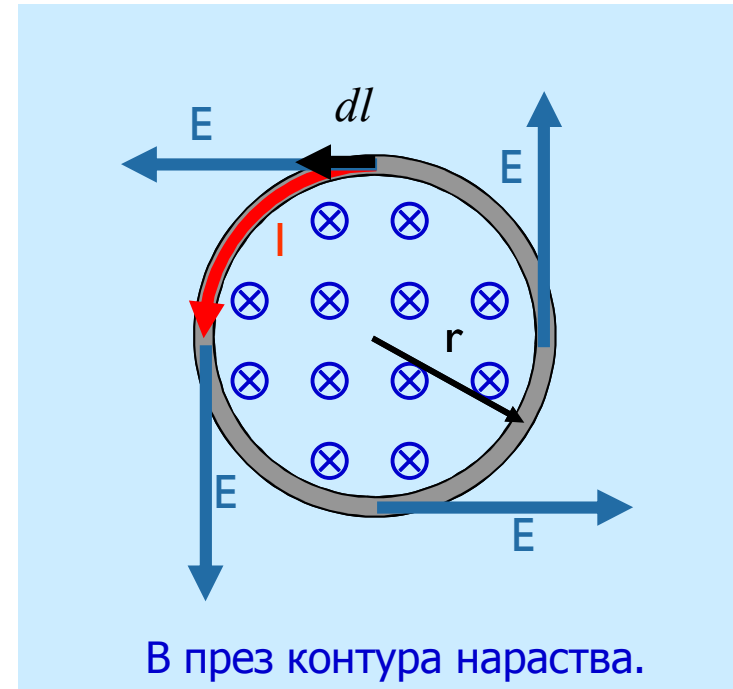
$$-N \frac{d\Phi_B}{dt} = -Ed$$

Промяната на магнитният поток създава електрично поле. Това е в сила не само за проводници а и навсякъде в пространството, където се променя магнитния поток.

Разглеждаме контур с радиус r ...

Според закона на Фарадей промяната на магнитния поток индуцира ЕДН ε в контура, а възникналото електрично поле действа със сила $\vec{F} = q\vec{E}$ върху зарядите.

Работата на електричното поле за преместване на зарядите по контура е:



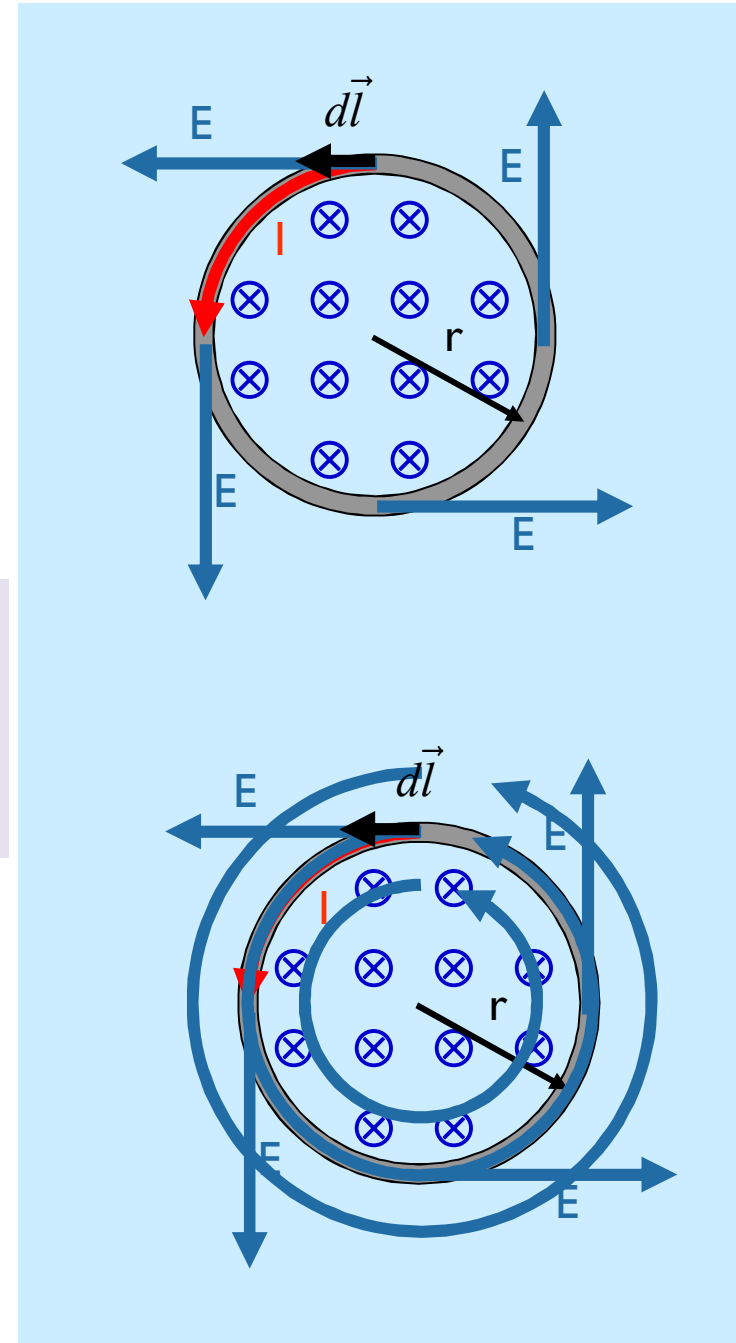
$$W = \oint_l \vec{F} \cdot d\vec{l} = q \oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = qE \int_0^{2\pi r} dl = qE(2\pi r) = q\varepsilon = q \left(-\frac{d\Phi_B}{dt} \right)$$

$$\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Електричното поле възниква независимо от контура т.е промяната на магнитния поток винаги води до възникване на електрично поле.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

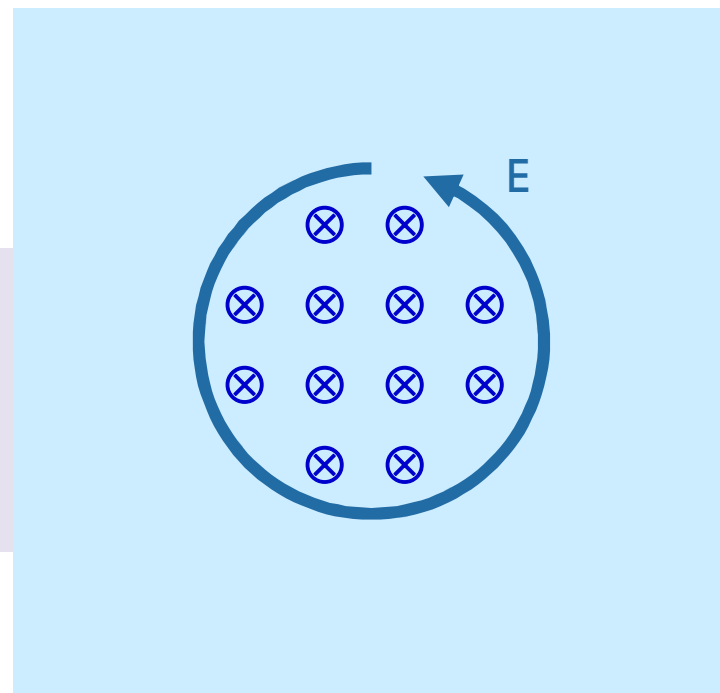
Силовите линии на вихровото електрично поле са затворени криви, които обхващат променливия магнитен поток създаващ вихровото електрично поле



Анализираме типа на възникналото електрично поле:

Знаем че!

- ✓ Потенциалната енергия е еднозначно дефинирана само за консервативни сили (работата на силата не зависи от пътя)



Ако възникналото електричното поле действа с консервативна сила, потенциалната енергия на заряда не трябва да се променя при движението му по контура.

Изчисляваме работата:

$$W = q \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = qE(2\pi r)$$

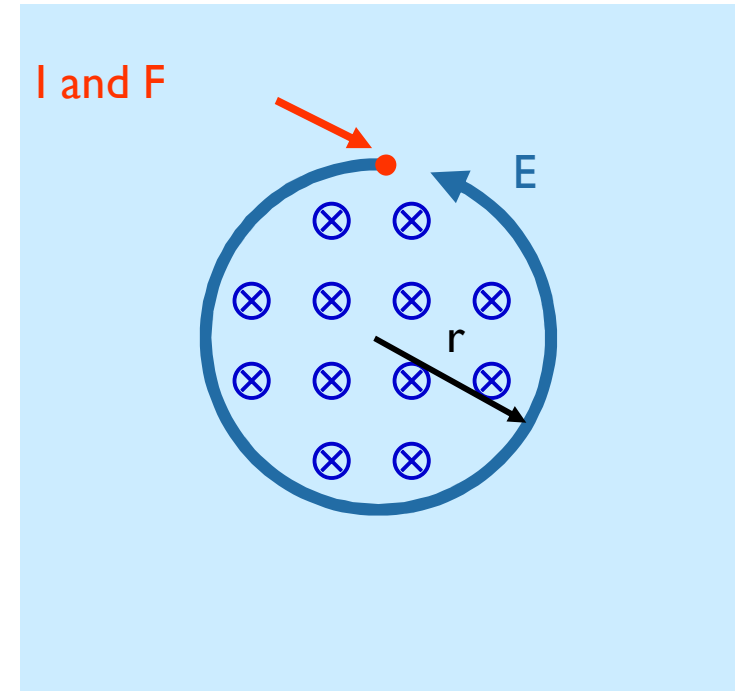
т.е резултатът е че Работата зависи от пътя!

Ако се опитаме да определим потенциалната енергия то тя не е еднозначна т.е E не се дължи на консервативна сила:

$$U_F - U_I = -q \int_I^F \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$U_F - U_I = -q \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \neq 0 \quad \text{дори ако } I = F$$

т.е U не е еднозначно в дадената точка от полето.



Вихрово (индуцирано) електрично поле: ключови идеи

Промяната на магнитния поток индуцира електрично поле :

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Това електрично поле, не е електростатично, т.е не е породено от присъствието на стационарни заряди

За разлика от електростатичното поле, **вихровото електрично поле е неконсервативно** т.е:

$$\vec{E} = \vec{E}_C + \vec{E}_{NC}$$

“консервативно,” или “кулоново”

“неконсервативно”

Съществуват два различни начина да генерираме електрично поле и съответно два типа електрично поле:

✓ **Електростатично** (кулоново) електрично поле

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

✓ **Вихрово** електрично поле

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

□ Силата породена от неподвижните заряди е консервативна но силата породена от вихровото електрично поле по своята природа е неконсервативна (странична).

Каква е посока на вихровото електрично поле ?

- ✓ Използва се правилото на Ленц - посоката на вихровото електр. поле е такава, че индуцираният в контура електр. ток да възпрепятства изменението на магнитния поток.

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Пример:

Соленоид има 500 навивки на метър и радиус 3.0 cm. Токът през него нараства с постоянна скорост 50 A/s. Каква е големината на вихровото (индуцираното) електрично поле близо до центъра на соленоида на 1.0 cm от оста?

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Липсващата връзка да се добави самостоятелно

$$E = \frac{r}{2} \mu_0 n \frac{dI}{dt}$$

$$E = 1.57 \times 10^{-4} \frac{V}{m}$$

напредваме с уравненията на Максвел

Досега знаем ...

законите на Гаус за електричеството и магнетизма (1) и (2) и **закона на Фарадей** за електромагнитната индукция (3)

$$(1) \quad \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q_{\text{enclosed}}}{\epsilon_0}$$

$$(2) \quad \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

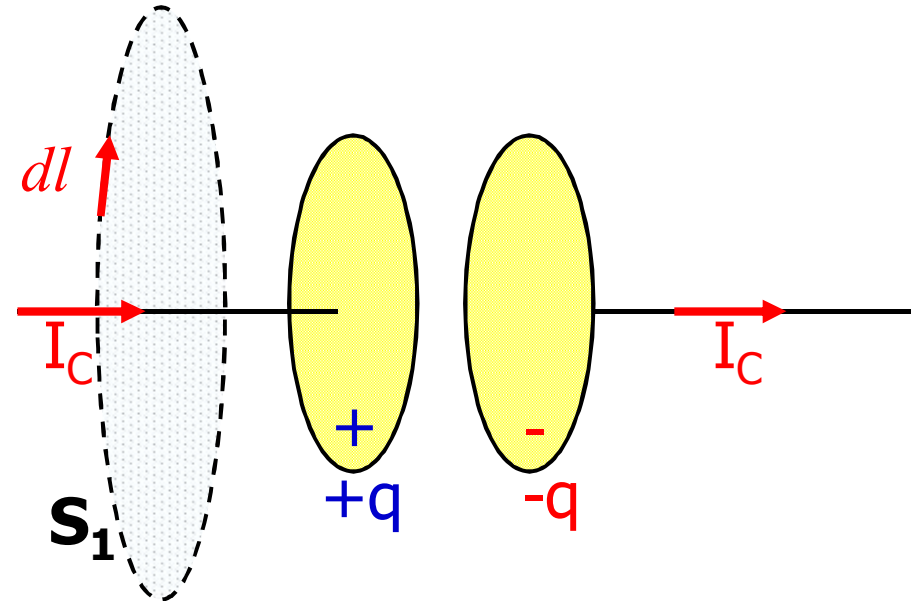
$$(3) \quad \oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Ток на отместване

Токът на отместване
обезпечава затваряне на
електрическата верига
през участъци, в които
липсват проводници

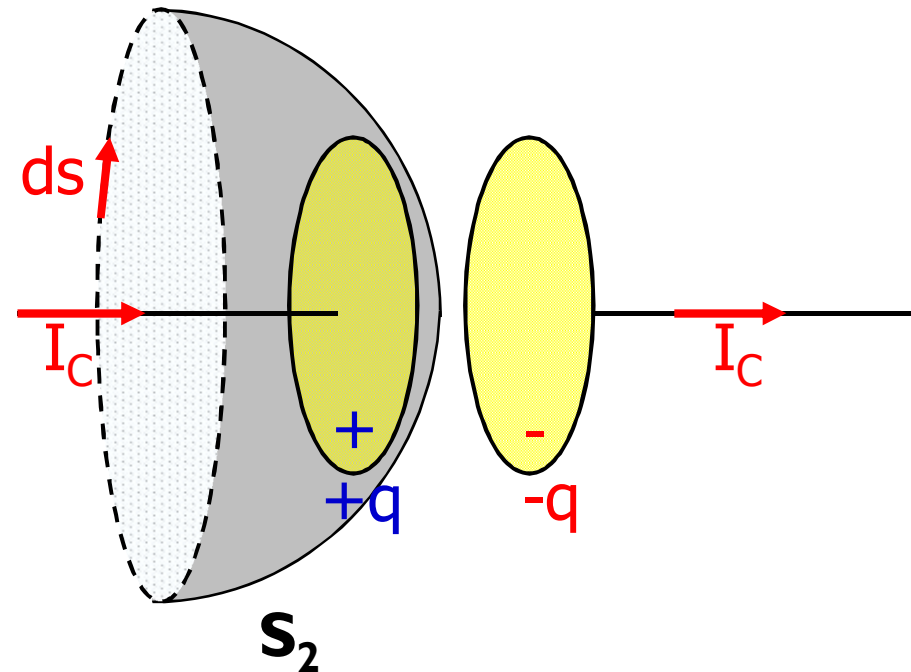
$$\oint_{S_1} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_C$$

Определяме циркулацията на
 \vec{B} по контура към
повърхността S_1 .



Каква е циркулацията магнитната индукция по контура към повърхността S_2 - зад положително заредената плоча ?

$$\oint_{S_2} \vec{B} \cdot d\vec{l} = 0$$



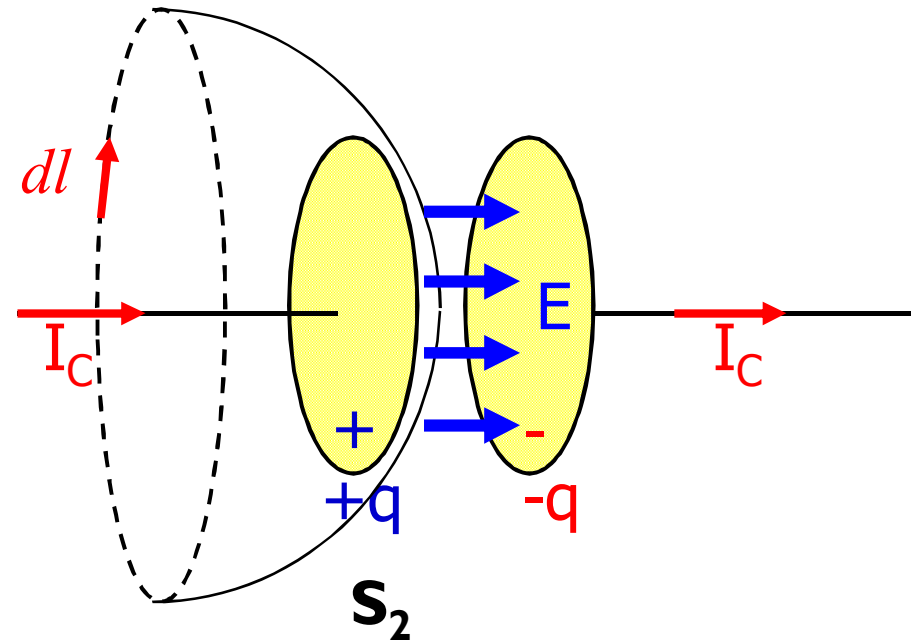
✓ Циркулацията на магнитната индукция B по контура към повърхността S_2 е нула т. като никакви токове не я пресичат

Когато кондензаторът се зарежда или разрежда, електричното поле между плочите се променя.

$$q = C\Delta V = \varepsilon_0 \frac{S}{d} (Ed)$$

$$= \varepsilon_0 ES = \varepsilon_0 \Phi_E$$

Токът и електричното поле се променят, потокът на ел. поле също се променя.



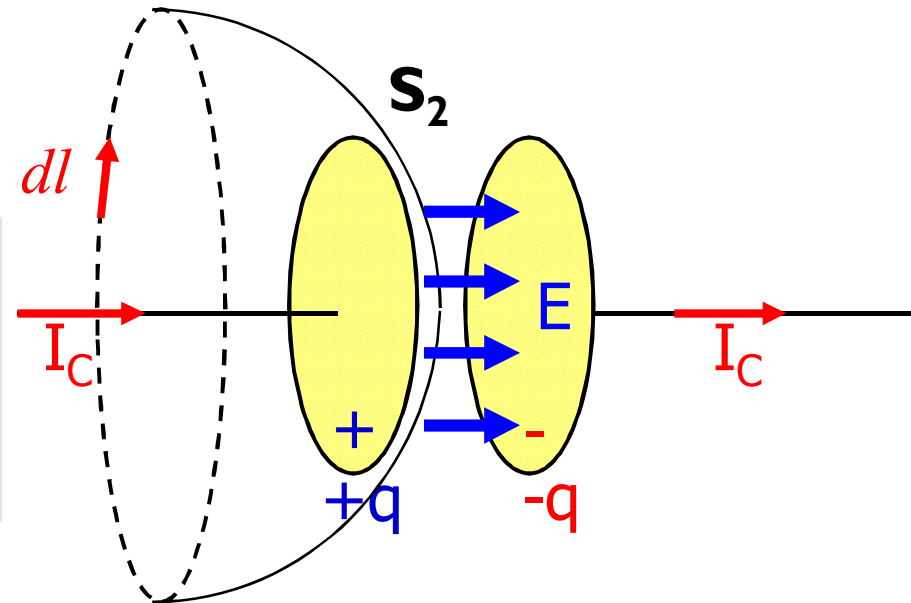
$$\frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt} (\varepsilon_0 \Phi_E) = \varepsilon_0 \frac{d}{dt} (\Phi_E)$$

Мерната единица е Ампер

Дефинираме тока на отместване:

$$I_D = \epsilon_0 \frac{d}{dt} (\Phi_E).$$

Промяната на потока на ел. поле през повърхността S_2 е еквивалентна на протичането на ток I_C през нея.



Дефинираме обобщения закон на Ампер:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (I_C + I_D)_{\text{encl}} = \mu_0 I_{\text{encl}} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Магнитното поле се създава както от токовете на проводимост така и от промяната на електричното поле.

и вече знаем 4-те уравнения на Максвел

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{enclosed}}}{\epsilon_0}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{encl}} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$