

INDUCCIÓ ELECTROMAGNÈTICA

Física 2n Batx

Marta Rada Arias. Traducció: Eduard Cremades (@eduardcremades)



Introducció

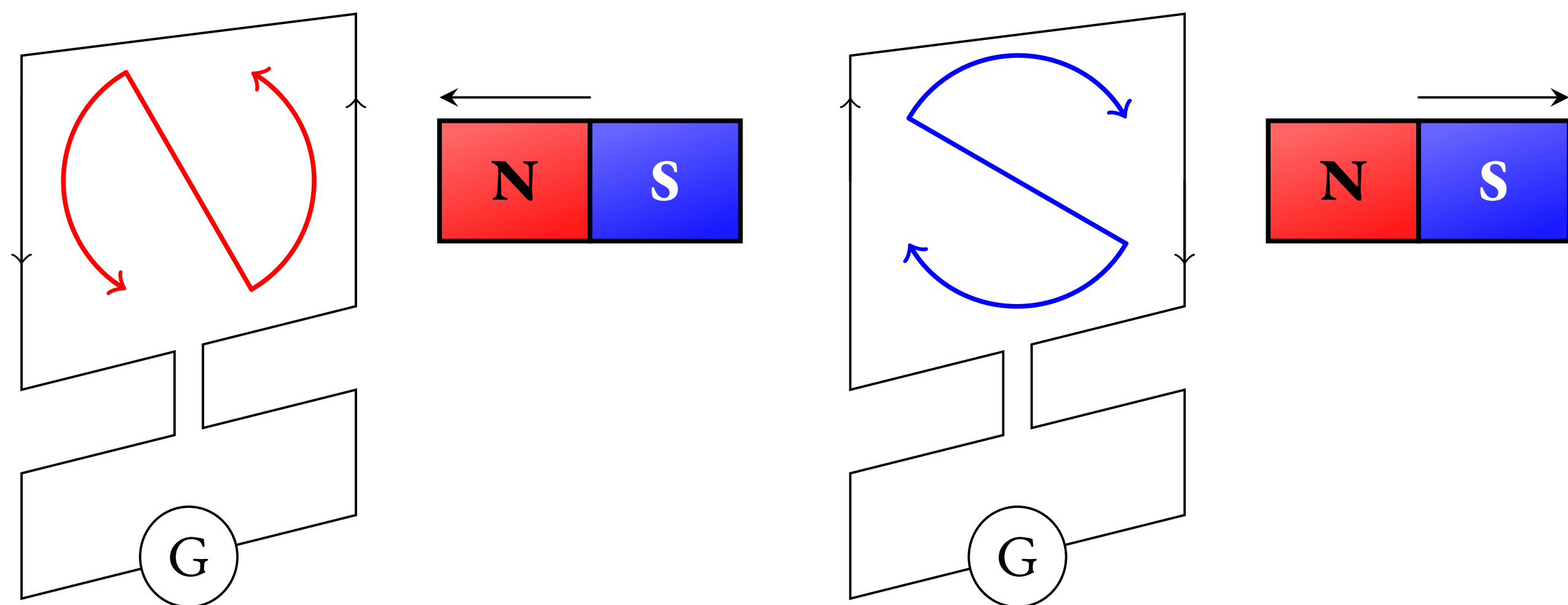
En l'anterior tema vam veure que el primer científic que va relacionar l'electricitat i el magnetisme va ser ØRSTED (1777–1851). En els seus experiments, va demostrar que un corrent elèctric era capaç de generar un camp magnètic. Poc després, el físic MICHAEL FARADAY (1791–1867) va dur a terme una sèrie d'experiències que li van permetre afirmar que la variació d'un camp magnètic pot induir un corrent elèctric (el procés oposat a Ørsted). Simultàniament, un altre científic estatunidenc anomenat JOSEPH HENRY (1797–1878) va arribar a la mateixa conclusió, encara que va publicar els seus resultats una mica més tard que Faraday.

En aquest tema estudiarem aquest fenomen conegut com a INDUCCIÓ ELECTROMAGNÈTICA: producció d'un corrent elèctric per l'acció d'un flux magnètic variable en el temps.

Experiències de Faraday

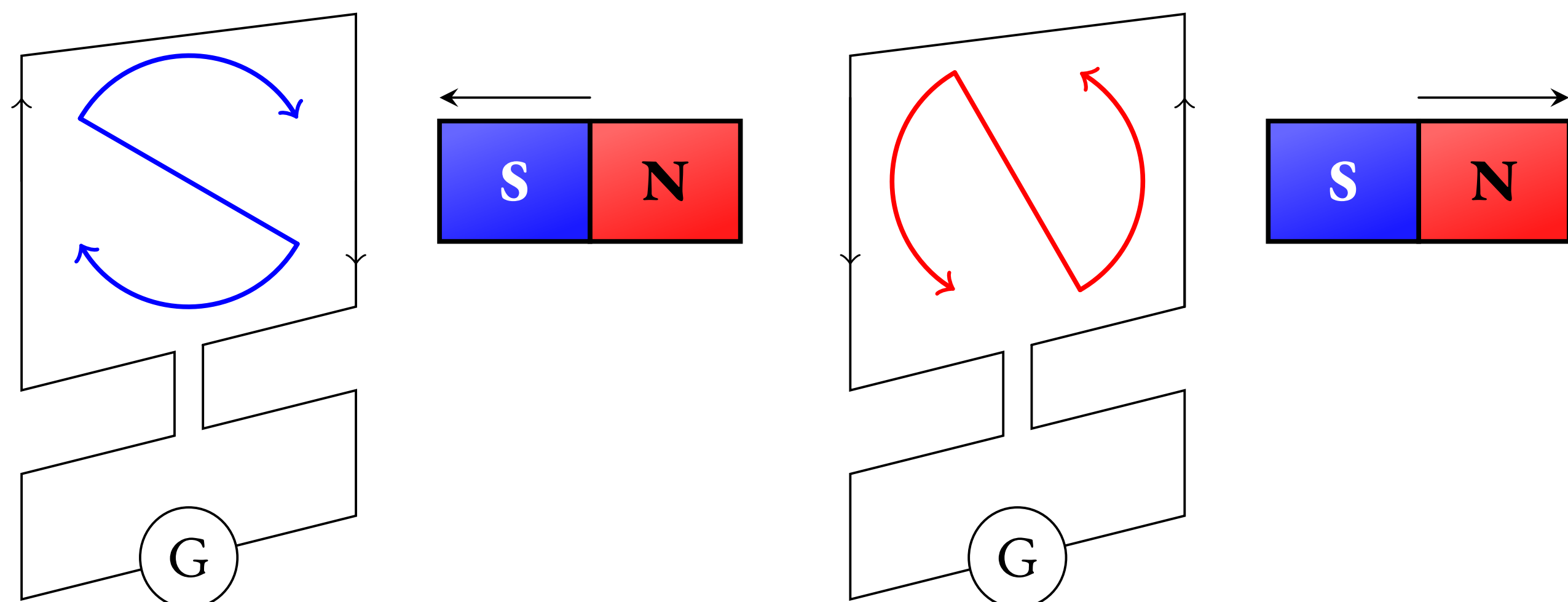
1a experiència

Es disposa d'una espira connectada a un galvanòmetre (dispositiu que mesura, en aquest cas, el pas de corrent elèctric I). S'observa que si s'allunya o s'acosta un imant a l'espira es produeix en ella un corrent induït, el sentit del qual depèn del pol de l'imant que s'utilitzi i si aquest s'acosta o s'allunya de l'espira.



En acostar el pol N es crea cara N que el repel·leix (I antihorària).

En acostar el pol N es crea cara S que l'atrau (I horària).



En acostar el pol S es crea cara S que el repel·leix (I horària).

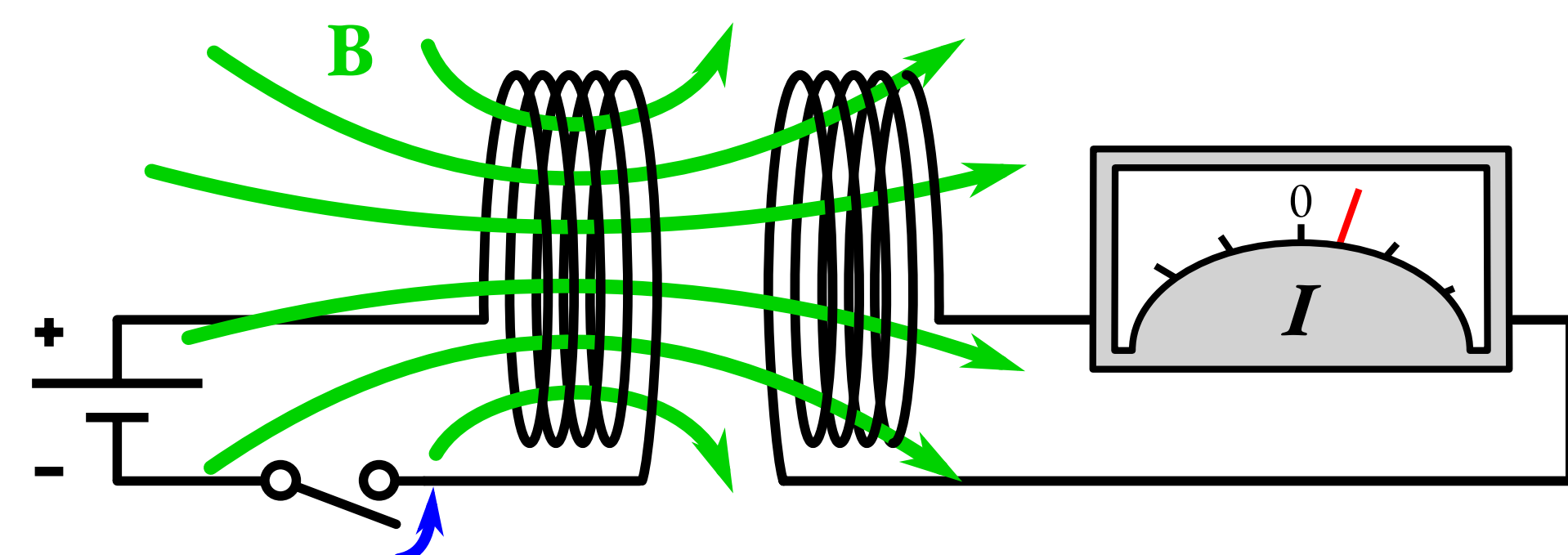
En allunyar el pol S es crea cara N que l'atrau (I antihorària).

2a experiència

Empra un muntatge similar substituint l'espira per un solenoide. S'observa el mateix, però de forma més acurada (resulta més fàcil mesurar la I induïda en el solenoide).

3a experiència

Es disposa d'un solenoide connectat a una font amb un interruptor. Paral·lel a ell hi ha un altre solenoide connectat a un galvanòmetre.

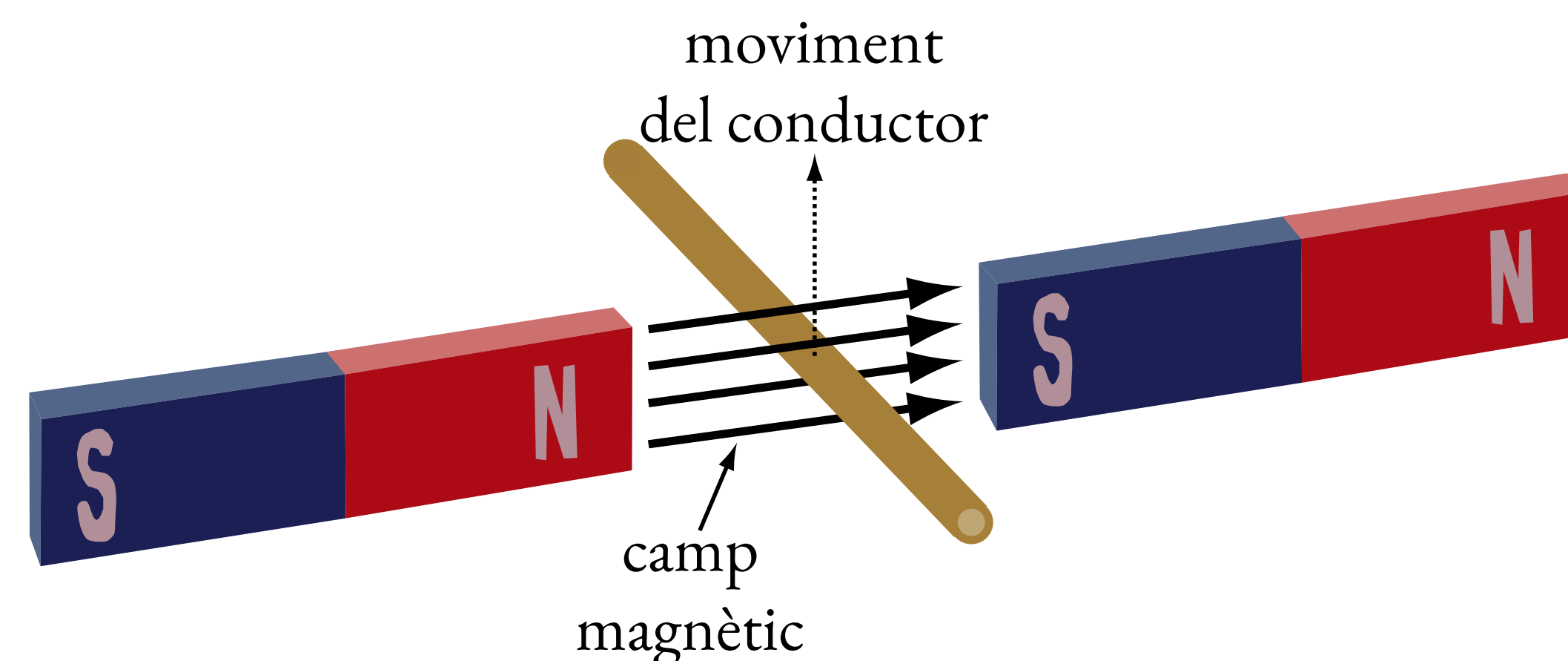


En obrir i tancar l'interruptor del primer circuit es genera de forma instantània un corrent induït en el segon circuit, el qual apareix únicament en l'instant en el qual s'obre o es tanca l'interruptor; si es deixa obert o tancat no es detecta corrent induït.

Adaptada de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Induction-by-a-changing-magnetic-field.svg>.

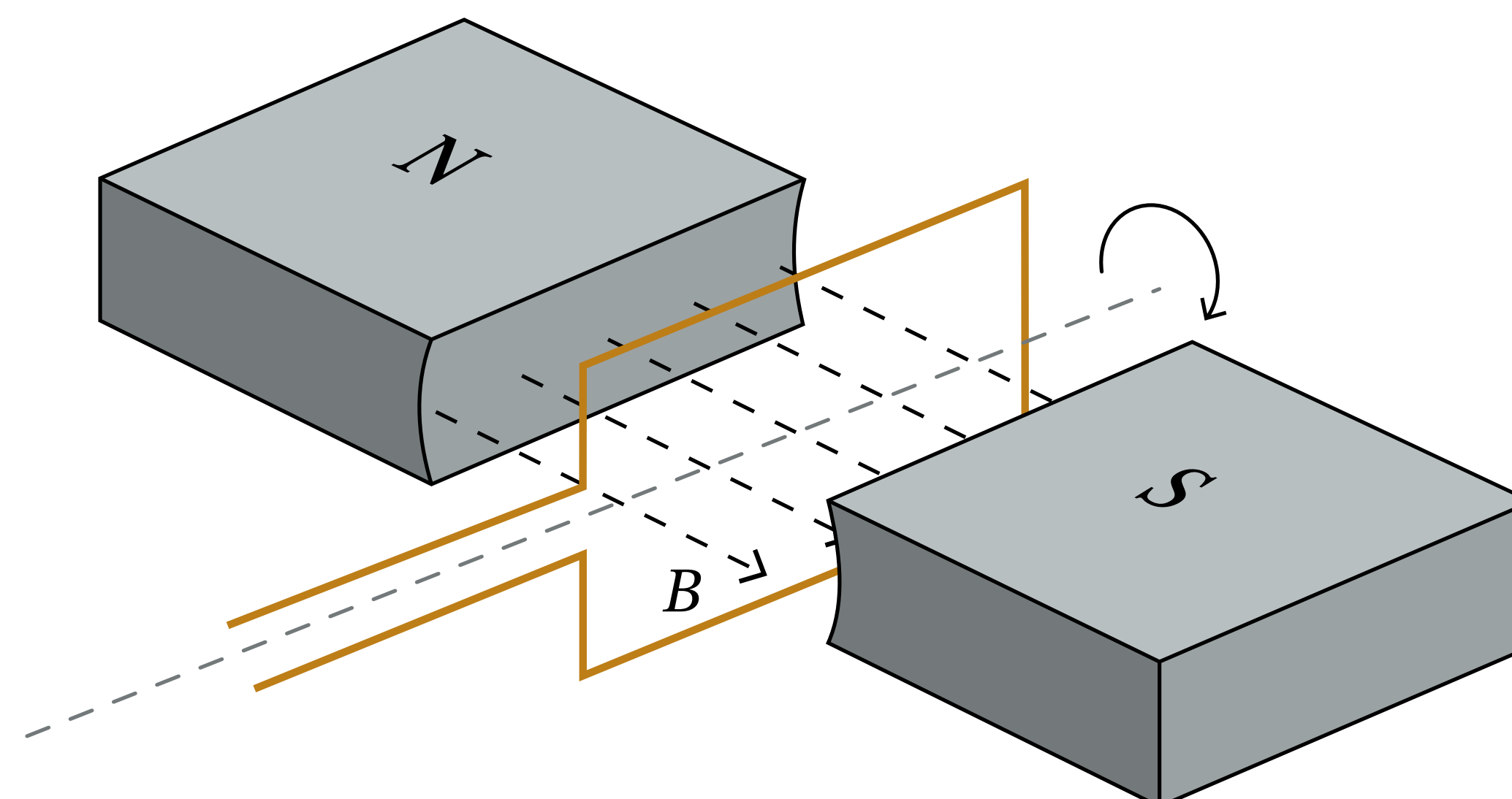
Experiència de Henry

HENRY va descobrir que, quan un conductor es movia perpendicularment a un camp magnètic, entre els seus extrems apareixia una diferència de potencial. Si el conductor forma part d'un circuit, en ell apareix un corrent induït.



Adaptada de http://physics-schooluk.com/magnetism_motor_effect.html.

Existeixen moltes altres experiències d'inducció electromagnètica. Per exemple, per a generar CORRENTS ALTERNES (aquells el sentit de circulació dels quals és variable), s'utilitza:



Es fa girar una espira (o solenoide) que es troba en un camp magnètic uniforme i s'observa que, en girar, apareix un corrent induït el sentit del qual varia cada mitja volta. Adaptada de <https://www.nagwa.com/en/explainers/357172034271/>.

Flux magnètic

Per a poder explicar els fenòmens d'inducció electromagnètica, resulta imprescindible definir prèviament el FLUX MAGNÈTIC, Φ , que travessa una superfície S d'un circuit tancat, relacionat amb el nombre de línies de camp que travessen la superfície. És expressat per:

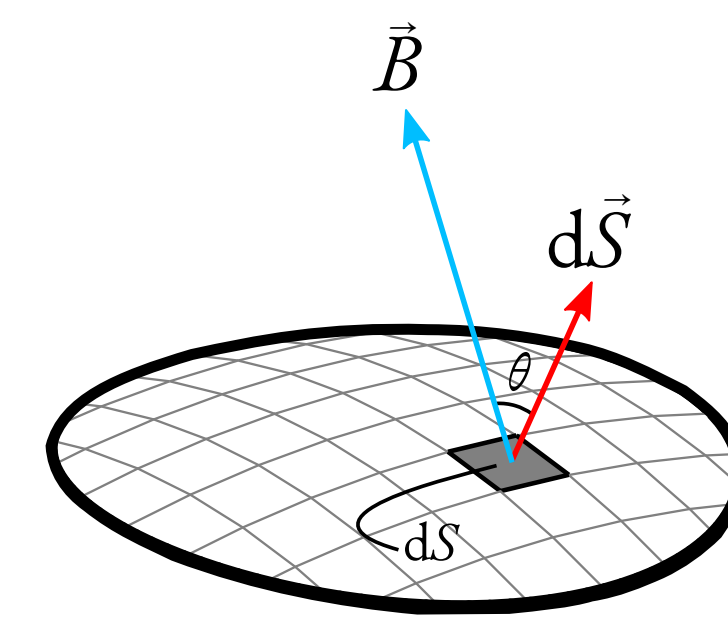
$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S B dS \cos \theta,$$

$d\vec{S}$ és el vector superfície la direcció del qual és perpendicular a la superfície i el sentit és cap a fora.

\vec{B} és el camp magnètic.

θ és l'angle entre \vec{B} i $d\vec{S}$.

La seva UNITAT en el SI és el WEBER ($\text{Wb} \equiv \text{Vs}$).



Adaptada de https://ggp.geosci.xyz/content/electromagnetics/electromagnetic_basic_principles.html.

Inducció electromagnètica

La inducció es produeix a causa d'una variació de flux magnètic, el qual pot produir-se per tres motius diferents:

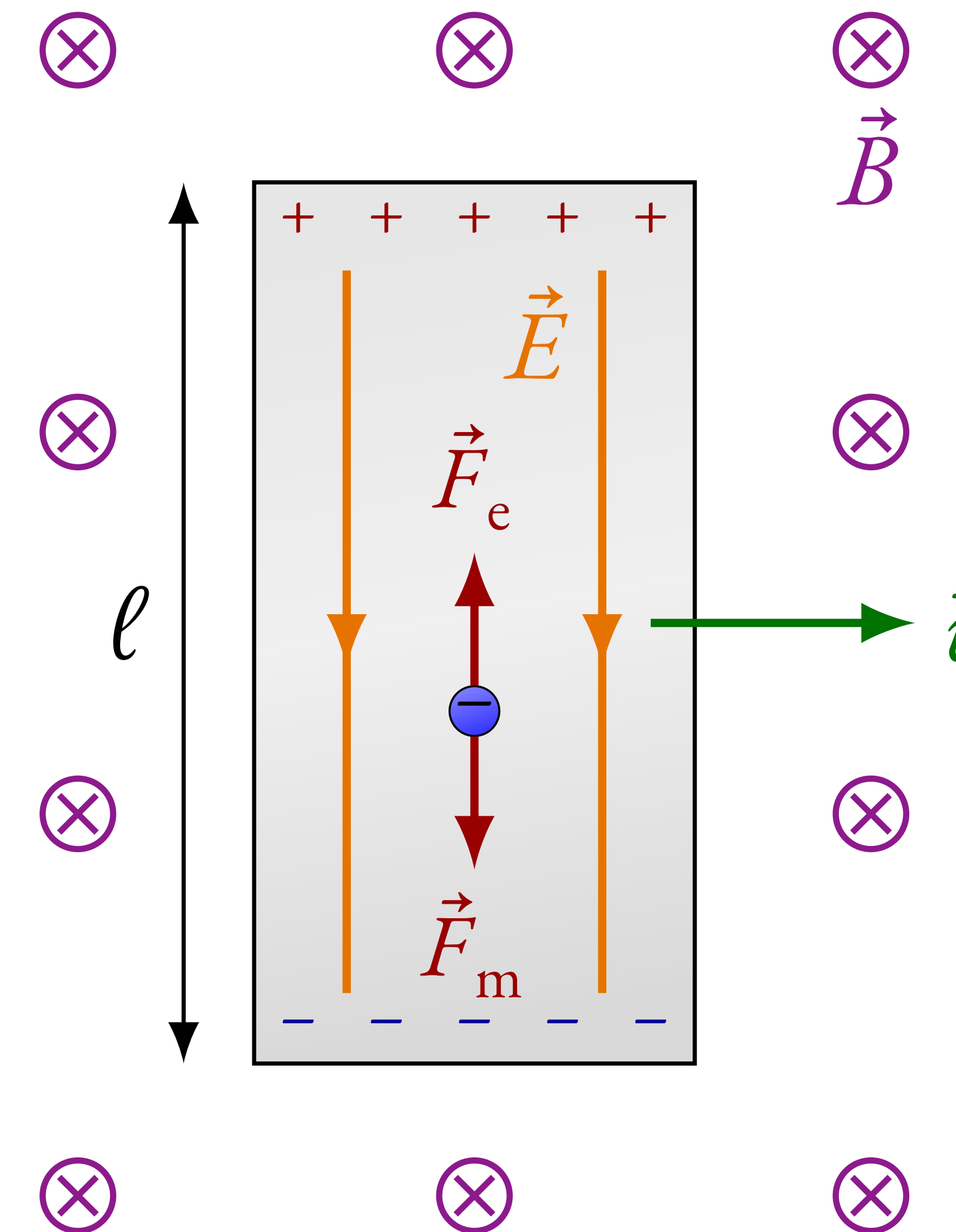
- \vec{B} canvia amb el temps: experiències de Faraday.
- θ canvia amb el temps: experiència del corrent altern.
- S canvia amb el temps: experiència de Henry.

A més a més, de les experiències anteriors es dedueix el sentit del CORRENT INDUÏT, ja que aquest serà tal que generi un camp magnètic induït que s'OPOSA A LA VARIACIÓ DEL FLUX que el produeix:

- Si Φ augmenta amb el temps: I_{ind} dona lloc a \vec{B}_{ind} que tendeix a disminuir Φ .
- Si Φ disminueix amb el temps: I_{ind} dona lloc a \vec{B}_{ind} que tendeix a augmentar Φ .

Força electromotriu (fem) induïda

Per comprendre bé per què en variar el flux magnètic es produeix un corrent induït, considerarem l'EXPERIÈNCIA DE HENRY:



Adaptada de https://tikz.net/magnetic_field_lens_law/.

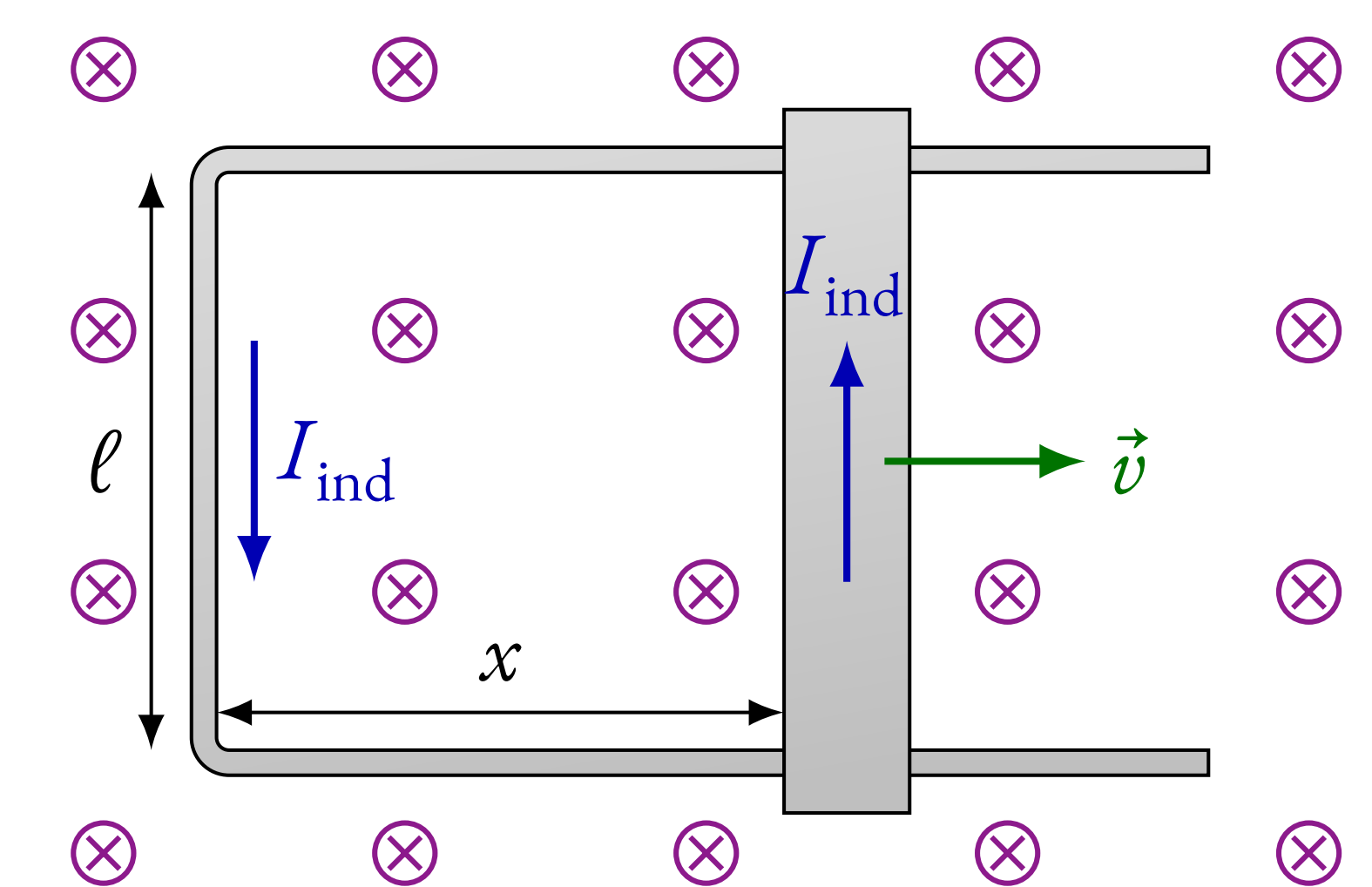
Suposem que el conductor té una longitud ℓ i es mou amb una velocitat \vec{v} en una regió en la qual existeix un \vec{B} uniforme ($\vec{v} \perp \vec{B}$). Els electrons del conductor, a causa del \vec{B} , es veuran sotmesos a una força magnètica \vec{F}_m donada per la LLEI DE LORENTZ:

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$$

A mesura que el procés avança, pràcticament instantàniament, es produeix una separació de càrregues (cations i electrons) i apareix, per tant, una diferència de potencial ΔV i un camp elèctric \vec{E} . Així, els electrons també es veuran sotmesos a una força elèctrica \vec{F}_e tal que:

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

S'arriba a l'equilibri en el qual $F_e = F_m \Rightarrow E = vB$. El camp elèctric roman constant sempre que el conductor es mogui amb velocitat constant. Si connectem el conductor a un circuit:

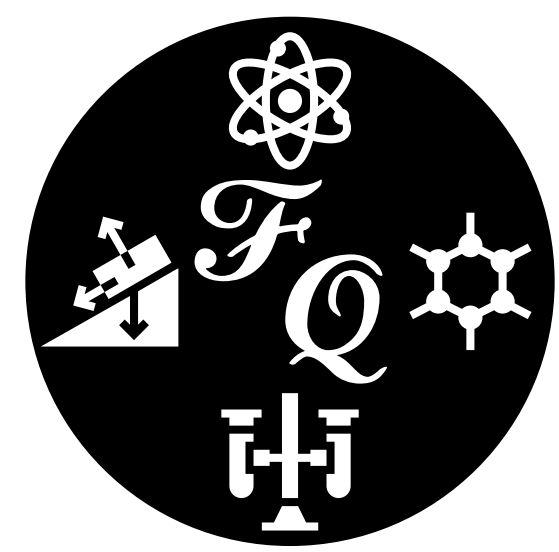


Per conveni, el sentit d' I s'escull com el sentit de moviment de càrregues positives. Adaptada de https://tikz.net/magnetic_field_lens_law/.

Perquè l' I_{ind} es mantingui és necessari mantenir la ΔV o equivalentment la separació entre càrregues. En el nostre cas la responsable és la velocitat del conductor, que fa que $\vec{F}_m \neq \vec{0}$ i els electrons comencin a moure's. Perquè es mogui el conductor hem d'aplicar un W_{ext} . Així, podem definir la FORÇA ELECTROMOTRIU FEM (\mathcal{E}) com el treball fet per unitat de càrrega per a mantenir la diferència de potencial:

$$\mathcal{E} = \frac{W_{\text{ext}}}{q} \quad \text{Unitat en el SI: V (volt)}$$

Normalment, és proporcionada per un generador elèctric.



INDUCCIÓ ELECTROMAGNÈTICA

Física 2n Batx

Marta Rada Arias. Traducció: Eduard Cremades (@eduardcremades)



Llei de Faraday-Henry i llei de Lenz

En les diferents experiències hem vist que apareix un corrent induït quan el flux magnètic varia amb el temps, i que es deu a la fem. A més, depèn també de la resistència del conductor. Per a calcular i relacionar aquestes magnituds cal tenir en compte les següents lleis:

Llei de Faraday-Henry

“El valor de la fem induïda en un circuit és igual a la variació temporal del flux magnètic que el travessa.”

$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi}{dt}$$

Llei de Lenz

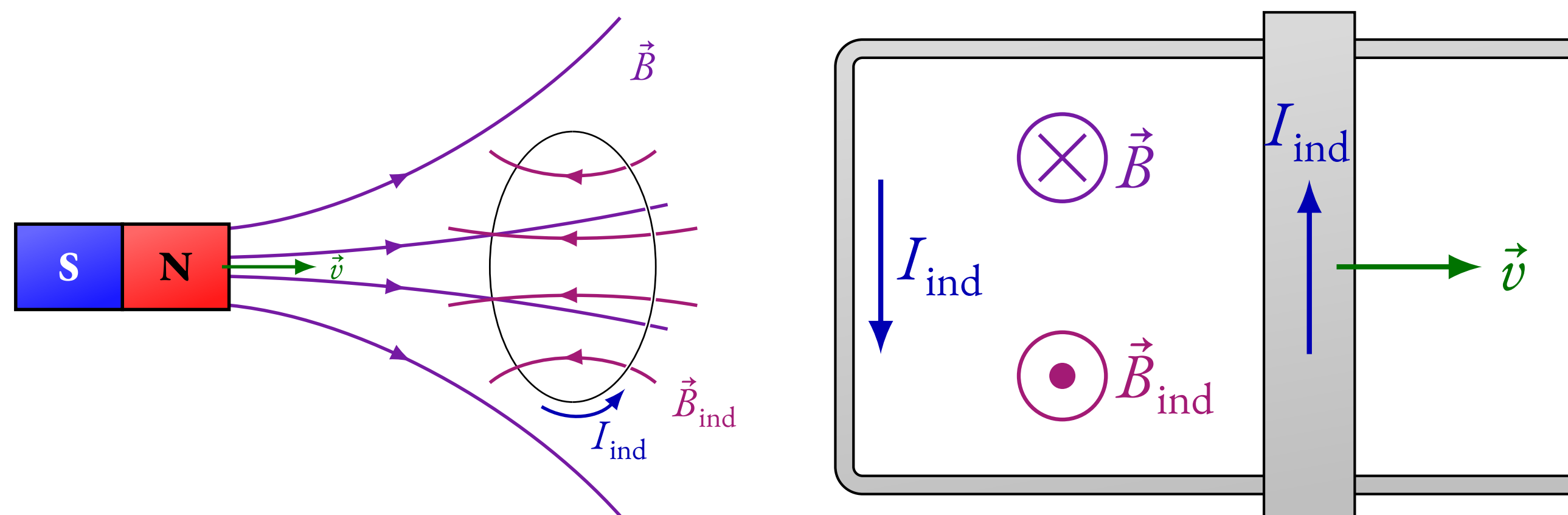
“El sentit del corrent induït és tal que s'oposa a l'efecte que el produeix.”

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Si Φ augmenta amb el t , la I_{ind} genera un \vec{B}_{ind} oposat al $\vec{B}_{inicial}$.

Si Φ disminueix amb el t , la I_{ind} genera un \vec{B}_{ind} igual al $\vec{B}_{inicial}$.

Exemples



Adaptada de https://tikz.net/magnetic_field_lenzs_law/.

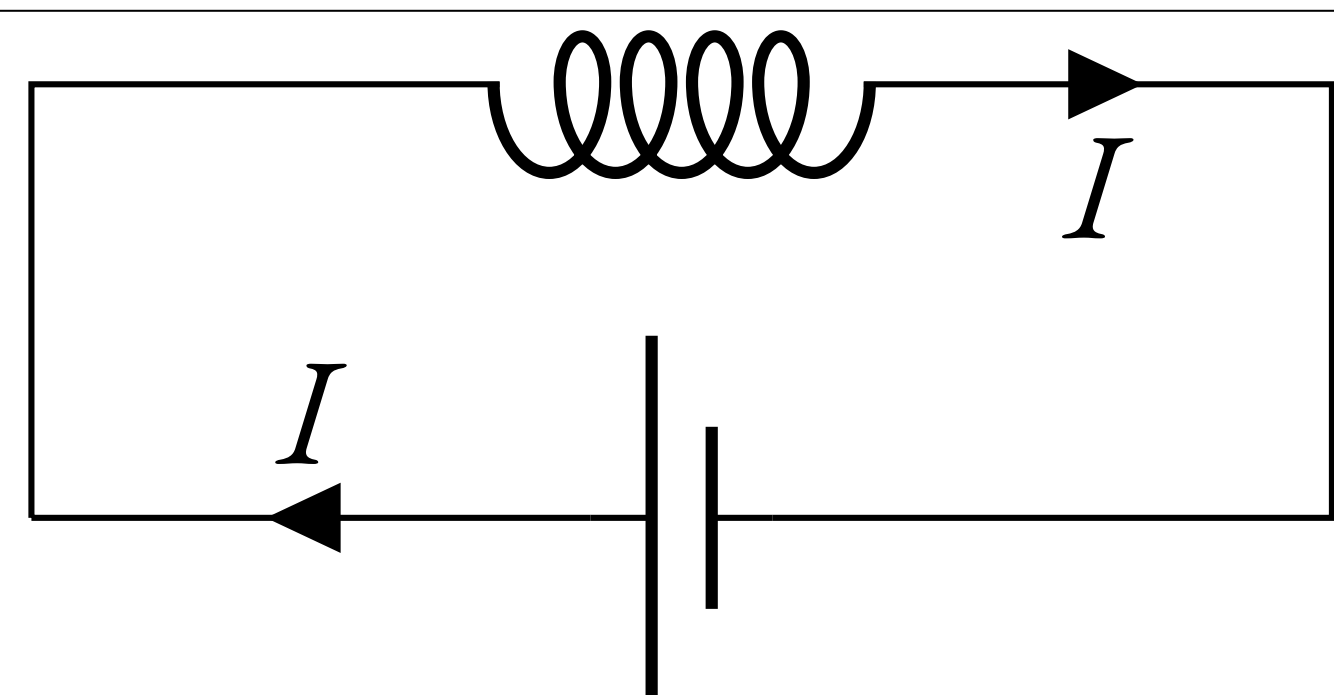
Un cop hem calculat la fem induïda, podem calcular la LLEI D'OHM:

$$I_{ind} = \frac{\mathcal{E}}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}$$

on R es mesura en ohms (Ω) i la I_{ind} es mesura en amperes (A) en el SI.

Autoinducció

L'AUTOINDUCCIÓ consisteix en la inducció d'un corrent sobre si mateix. Perquè es produeixi, és necessari que el corrent que recorre un circuit variï amb el temps. Considerem un solenoide de longitud ℓ i radi R format per N espires. El solenoide forma part d'un circuit en el qual existeix un generador de corrent continu, la resistència del qual és r .



El camp generat pel solenoide, \vec{B} , és paral·lel al seu eix i en l'interior pren un valor constant:

$$B = \frac{\mu NI}{\ell}$$

Per tant, el flux que travessa el solenoide:

$$\Phi = BS \cos \theta = BS = \frac{\mu NI}{\ell} \cdot N\pi R^2 = \frac{\mu N^2 \pi R^2}{\ell} I = LI,$$

on $L = \frac{\mu N^2 \pi R^2}{\ell}$ és el COEFICIENT D'AUTOINDUCCIÓ, constant definida per les característiques del solenoide, les UNITATS del qual en el SI són els HENRYS (H). Només apareixerà corrent induït si I és variable (p. ex. corrent altern). En aquest cas apareixerà en el solenoide una altra intensitat, $I_{autoind}$, que s'oposa a la variació del flux. La fem autoinduída corresponent, \mathcal{E}' , serà expressada per:

$$\mathcal{E}' = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

Així, la fem autoinduída depèn de la rapidesa amb la qual varia la I i s'oposa a la variació:

$$I_{autoind} = \frac{\mathcal{E}'}{r} = -\frac{L}{r} \frac{dI}{dt} \quad (\text{llei d'Ohm})$$

Inducció mútua

Fins ara hem vist que un circuit inductor genera un corrent induït en un altre circuit, l'induït. Però no hem considerat l'efecte que aquest segon circuit (induït) té en el primer (inductor). A aquest fenomen se'l denomina INDUCCIÓ MÚTUA. Considerem dos solenoides:

Solenoid 1 N_1 espires, longitud ℓ_1 , unit a un circuit pel qual circula I_1 i té una resistència r_1 .

Solenoid 2 N_2 espires, longitud ℓ_2 , unit a un circuit en el qual hi ha un galvanòmetre que permet mesurar el pas del corrent I_2 .

Suposem que la superfície de les espires és la mateixa en ambdós (S) i $\ell_1 = \ell_2 = \ell$.

Quan apareix I_1 en el solenoide 1 es genera B_1 tal que:

$$B_1 = \frac{\mu N_1 I_1}{\ell}$$

Aquest camp travessa les espires del solenoide 2, generant un flux magnètic Φ_2 tal que:

$$\Phi_2 = B_1 N_2 S = \frac{\mu N_1 N_2 S}{\ell} I_1 = M_{12} I_1,$$

on $M_{12} = \frac{\mu N_1 N_2 S}{\ell}$ és el COEFICIENT D'INDUCCIÓ MÚTUA que exerceix 1 sobre 2.

Si I_1 varia amb el temps, Φ_2 és variable i apareix un corrent induït i fem:

$$\mathcal{E}_2 = -M_{12} \frac{dI_1}{dt}$$

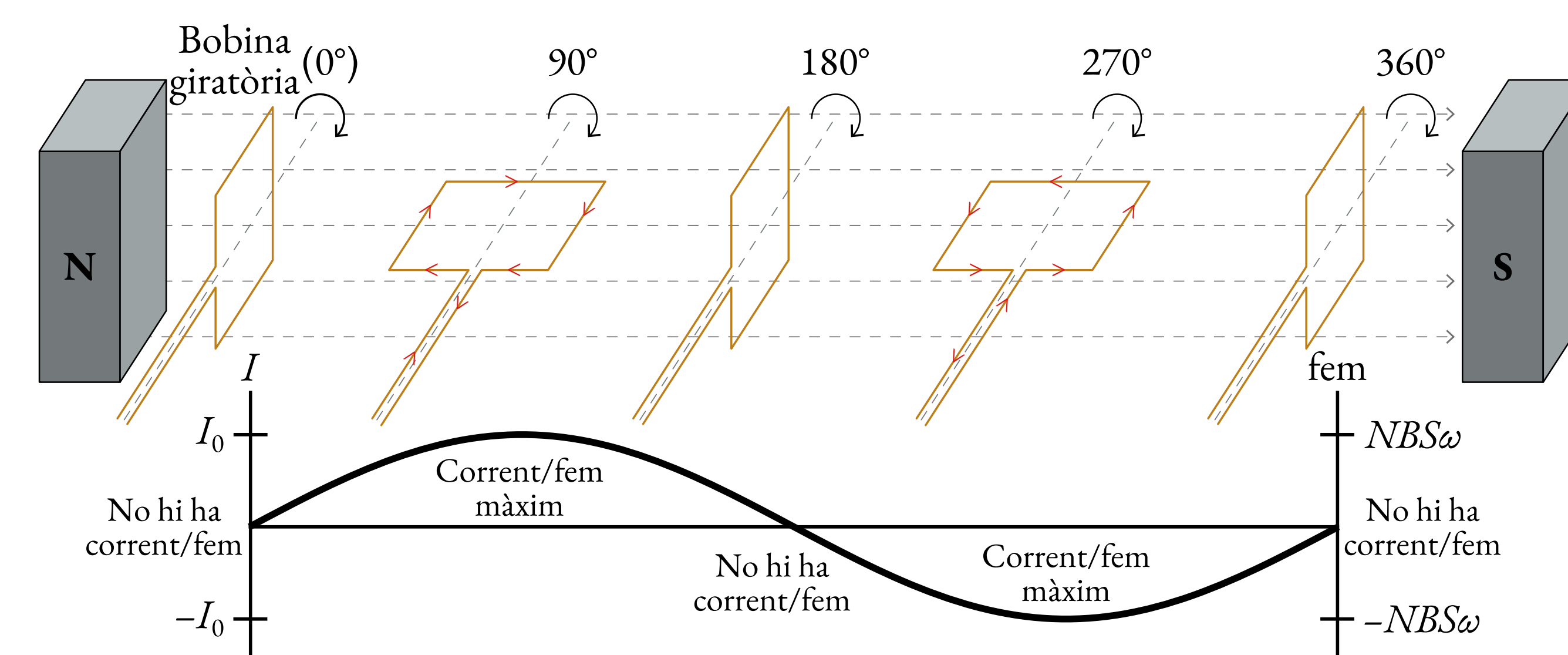
El fenomen també es produeix a la inversa:

$$\mathcal{E}_1 = -M_{21} \frac{dI_2}{dt}$$

És fàcil demostrar que $M_{12} = M_{21} = M = \frac{\mu N_1 N_2 S}{\ell}$.

Generació de corrents alterns

S'entén per CORRENT ALTERN aquell el SENTIT de circulació del qual és VARIABLE, distingint-se així del corrent continu. La GENERACIÓ de CORRENTS ALTERNs es basa en la INDUCCIÓ ELECTROMAGNÈTICA, específicament en la VARIACIÓ d'UN FLUX MAGNÈTIC.



GENERADOR DE CORRENT ALTERN, basat en la variació de l'angle format entre el camp magnètic i la superfície d'una bobina, que gira en el seu si amb velocitat angular constant. Adaptada de <https://www.nagwa.com/en/explainers/357172034271/>.

Suposant una espira que gira amb velocitat angular ω , el flux magnètic que la travessa es defineix:

$$\Phi = BS \cos \theta = BS \cos \omega t,$$

pel que la fem induïda s'expressa mitjançant la llei de Faraday-Henry:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin \omega t$$

En el cas d'una bobina de N espires, la fem pot expressar-se com:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t \quad \text{con } \mathcal{E}_0 = NBS\omega$$

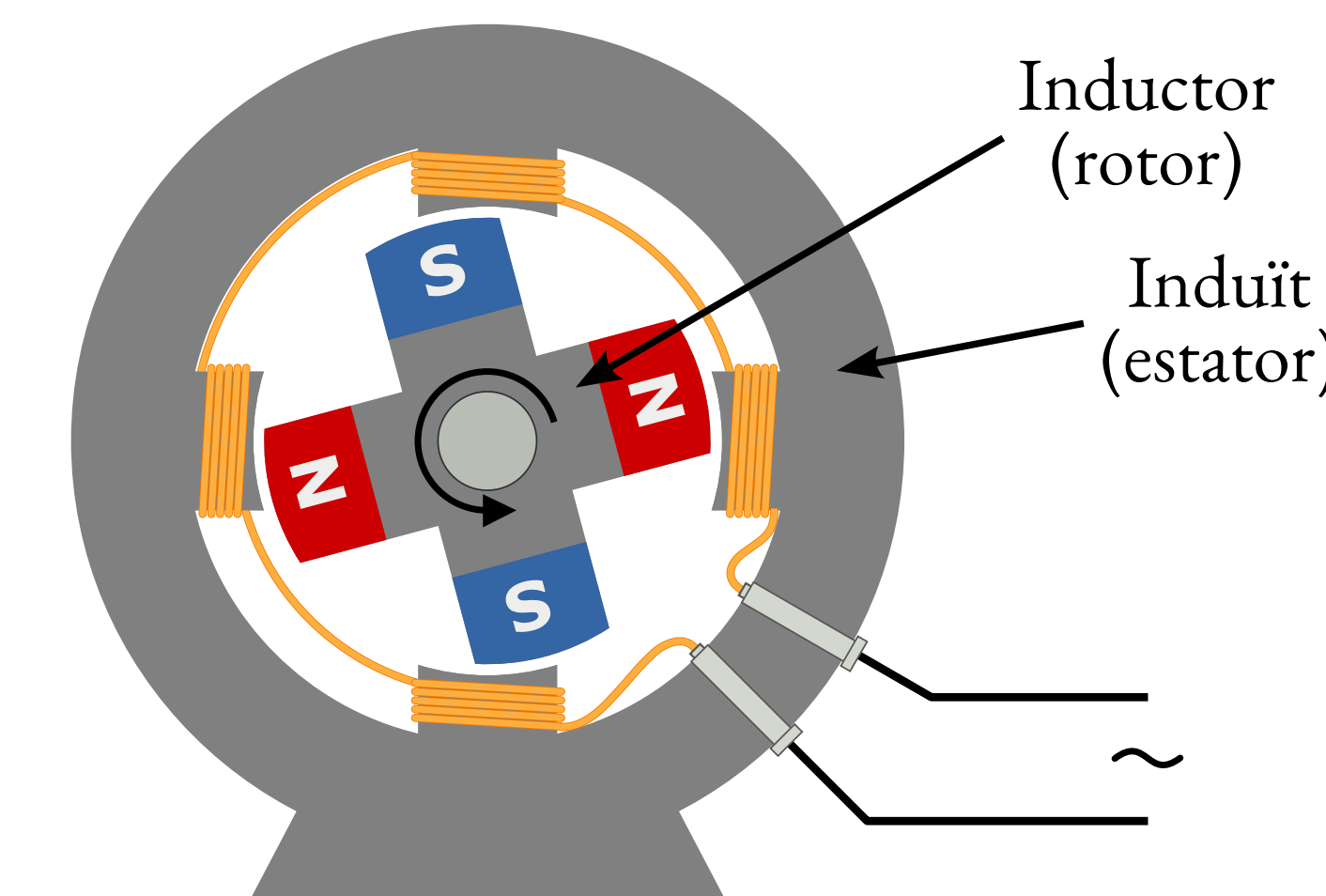
Si considerem que el generador descrit està integrat en un circuit senzill que consta només d'una resistència r , aplicant la llei d'Ohm pot obtenir-se la intensitat induïda, que varia sinusoidalment:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r} = I_0 \sin \omega t \quad \text{amb } I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{r}$$

Aplicacions de la inducció electromagnètica

Generadors de corrent altern (alternadors)

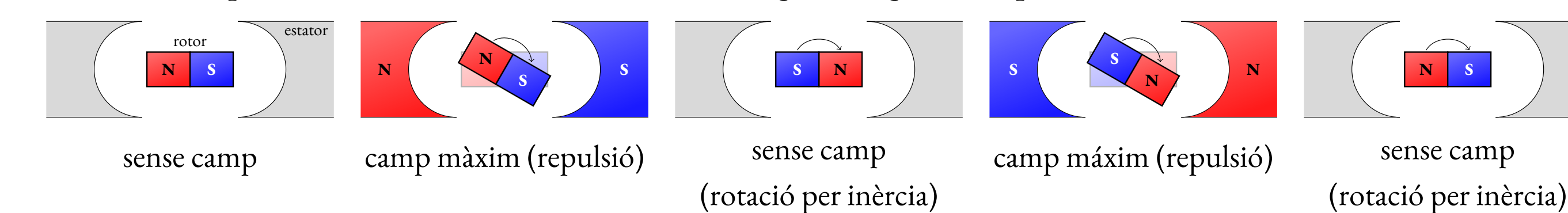
Un GENERADOR ELÈCTRIC és un dispositiu que TRANSFORMA l'ENERGIA MECÀNICA en ENERGIA ELÈCTRICA. Els generadors més senzills estan constituïts per un bobinat que gira en el si d'un camp magnètic uniforme, encara que aquesta configuració no és útil quan es requereixen potències elevades. És per això que els ALTERNADORS actuals es construeixen de forma que la part que gira és l'electroimant (rotor) i la part que roman fixa és el bobinat (estator).



ALTERNADOR. L'estator és una peça de ferro fixa amb diversos sortints que són pols. És en l'estator on s'enrotllen els bobinats, un en cada pol, de forma que cada bobinat tingui sentit oposat a l'adjacent. En el centre de l'estator s'ubica el rotor, proveït de tants pols com l'estator, que gira amb una velocitat angular determinada. Com major sigui el nombre de pols del rotor i l'estator, major serà la freqüència del corrent altern induït, donat que en una volta del rotor es completaran més cicles complets. Adaptada de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alternador.svg>.

Motors

Els MOTORS de corrent altern TRANSFORMEN ENERGIA ELÈCTRICA en ENERGIA MECÀNICA, just al contrari del que succeeix en els alternadors. En la següent figura s'esquemmatitza el seu funcionament:

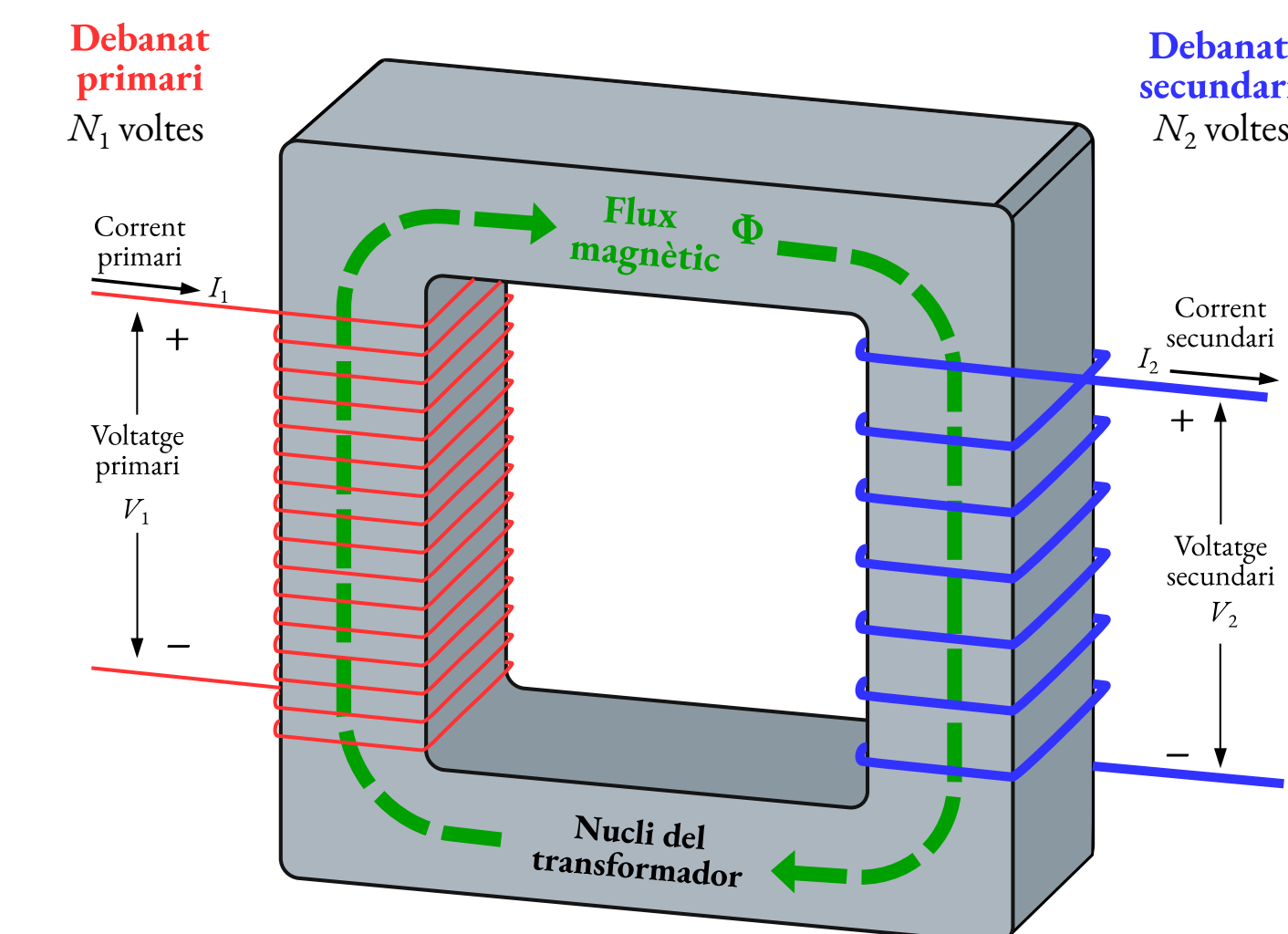


L'estator està proveït de bobinat enrotllat de forma que al pas de corrent dona lloc a dos pols magnètics. En l'interior se situa el rotor, que és un imant amb els seus pols N i S. El bobinat s'alimenta amb corrent altern. Quan el valor del corrent augmenta, l'imat pateix la repulsió provocada per pols iguals enfrontats, i gira fins que s'orienta segons el camp generat pels pols de l'estator. Just abans que s'inverteixi el sentit del corrent altern, no hi ha camp, i el rotor es desplaça a causa de la inèrcia. Un cop s'inverteix el sentit del corrent, també ho fan els pols de l'estator i el camp que generen. Per tant, el rotor, gràcies a la repulsió continua girant fins a orientar-se de nou, i així successivament.

Transformadors

La importància dels corrents alterns resideix en l'eficiència amb la qual permeten TRANSPORTAR l'ENERGIA ELÈCTRICA. Entre un generador elèctric i el punt de consum de l'energia elèctrica es produeixen, de forma ineludible, PÈRDUES degudes a l'EFECT JOULE, que té lloc en les línies de transport. Per a reduir aquestes pèrdues han d'emprar-se materials amb la mínima resistència possible. A més, com menor sigui la intensitat de corrent, o equivalentment major sigui el voltatge, menors seran les pèrdues. Això últim fa que el corrent altern pugui transportar-se de forma molt més eficient que la continua, donat que pot incrementar-se el voltatge a la sortida del generador, transportar-se per les línies d'alta tensió i reduir-lo de nou al seu valor de consum (220 V a Espanya) abans d'arribar al punt de consum.

Això s'aconsegueix amb l'ajuda de TRANSFORMADORS, dispositius capaços de TRANSMETRE l'ENERGIA ELÈCTRICA d'un circuit de corrent altern a un altre, sense modificar la seva freqüència. Aquesta transmissió va acompanyada d'un canvi de voltatge de forma que quan el transformador retorna una tensió més alta, s'anomena elevador, i quan retorna una tensió més baixa, es diu que és reductor.



Així, l'energia elèctrica es transfereix del primari al secundari, complint-se:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

TRANSFORMADOR reductor. Consta d'un nucli de ferro (Fe) al voltant del qual es disposen dos bobinats de fil de coure. El corrent altern arriba a un dels bobinats, denominat primari, donant lloc a un flux magnètic variable en el nucli de Fe, que travessa el segon bobinat, denominat secundari. Segons Faraday, es generarà en el secundari una fem induïda que s'oposa a la variació del flux. Si l'enrotllament primari té més espires que el secundari, el transformador és un reductor de tensió. En cas contrari, elevador de tensió. Adaptada de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Transformer3d_col3_es.svg.