ELEKTROMAGNETICKÉ POLE

- JIŽ SE NEUKLADOU OMEZUJÍCÍ PODMÍNKY → POLE JE OBECNÉ, ČAS. PROMĚNNÉ
- VZÁJEMNĚ ZÁVISLÉ NESTAC. MAG. A ELEKTR. POLE
- $c = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$
- MAKROSKOPICKÉ ELMAG POLE → PŘÍMO VYSTUPUJE Z MAXWELL. ROVNIC
  ↓ NÁBOJE PAK VYTVÁŘÍ MIKROSKOP. ELMAG. POLE
  - VĚTŠINOU DOPROVÁZ. RYCHLÝMI ZMĚNAMI A OBROVSKÝMI INTENZITAMI
  ⇒ POPISUJÍ „LORENTZOVY ROVNICE"

MAXWELLOVY ROVNICE

- ZMĚNA MAG. IND. TOKU Ψ → * EL. PROUD V UZAVŘ. OBVODU
  - INDUK. ELMOT. NAPĚTÍ ε_F $\left(\varepsilon_F = -\frac{d\Psi}{dt}\right)$
  - VÍCE PŘÍČIN VZNIKU
    - MĚNÍCÍ SE PROUD, MECH. OTÁČENÍ SMYČKY, ...
  - KMITOČTY KVAZISTAC. PROUDŮ (50–60 Hz)
    - ZANEDBÁ JEV INDUKCE V IMPEDANCI (OHM., JOULEOVO TEPLO)
  - VYSOKÉ KMITOČTY → VYZAŘ. ELMAG VLN
    - DODANÁ (E) SE TRANSFORMUJE → JOULEOVO TEPLO / JDE DO PROSTORU

INDUKOVANÉ ELEKTRICKÉ POLE

- DOMYŠLENÍ FARADAYE → JE PODSTATNÁ SMYČKA?
- ČAS. PROM. MAG. POLE → VYVOLÁ KONVENČNÍ PROUD VOLNÝM NAB. ČÁSTIC
  - PŮSOBÍ SILOU F $\bar{F} = Q\bar{E}_i$
    - ČAS. ZMĚNĚNÉ MAG POLE
    - VEKTOR. EL. POLE
- BUDE I V DANÉM BODĚ NENULOVÉ EL. POLE
  - STACIONÁR. E_s

⇒ ~~[illegible]~~

$$\boxed{\bar{F} = Q\cdot(\bar{E} + \bar{v}\times\bar{B})}$$ LORENTZŮV VZOREC

$\bar{E}$ ... TVOŘENA E_s, E_i
- NELZE JI JASNĚ PŘIŘADIT K PŮVODU
- NESTAC. EL. POLE

- NESTAC EL. POLE
  - JIŽ NENÍ POTENCIÁLNÍ
  - KDYŽ ZVOLÍM ℓ (UZAVŘENOU) → PŘI POHYBU NÁBOJE PO ℓ V POLI E
    - → JE KONÁNA PRÁCE ! $\oint_\ell \bar{E}\,d\bar{l}$

– PŘENESENÍ Q PO KŘIVCE → *I

$W = U \cdot I \cdot t = R t$

– PŘENOS NÁBOJE V KRÁTKÉM INTERVALU Δt → $W = \mathcal{E}_F \underbrace{I \Delta t}_{Q}$

$$\Rightarrow \underbrace{\oint_l \bar{E}\, d\bar{l}}_{\downarrow} = \underbrace{-\int_S \frac{\partial B}{\partial t}\, dS}$$

– POČÍTÁM PŘES LIBOVOL. PLOCHU KŘIVKOU l OHRANIČENOU

STOKESOVA VĚTA

$$\int_S \left(\nabla \times \bar{E} + \frac{\partial B}{\partial t}\right) dS = 0 \xrightarrow[\text{– ZÁPIS V DIF. TVARU}]{\text{LIBOVOLNOST PLOCHY}} \boxed{\mathrm{rot}\, \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}}$$

⇒ OBECNÉ NESTAC. POLE **NENÍ** POTENCIÁLNÍ

!

→ NELZE JE VYJÁDŘIT JAKO GRADIENT SKAL. POLE (POTENCIÁLU)

↓

– DÁVÁM DO RELACE $\bar{E}$ a $\bar{B}$

$$\boxed{\begin{array}{ll} \mathrm{div}\, \bar{D} = \varrho & \mathrm{div}\, B = 0 \\ \mathrm{rot}\, \bar{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} & \mathrm{rot}\, \bar{H} = \bar{j} \end{array}}$$

– PRO STACIONÁRNÍ / KVAZISTAC. POLE

↓

JAK POPÍŠU ~~...~~ NESTACIONÁRNÍ

$\mathrm{div}\, \bar{D} = \varrho$ ... GAUSS

– JE PLATNÝ PRO LIBOVOLNÉ SE POHYB. NÁBOJE

– PLATÍ I PRO NESTAC.

– ROZLIŠUJI STÁLE **VOLNÉ** A **VÁZANÉ** NÁBOJE

$\bar{D} = \varepsilon_0 \bar{E} + \bar{P}$

$\mathrm{div}\, \bar{B} = 0$ ...... NEEXISTENCE MAG. NÁBOJŮ

$\oint_S \bar{B}\, d\bar{S} = 0$ – UZAVŘENOST SILOČAR

$\mathrm{rot}\, \bar{H} = \bar{j}$ .... **DIF. TVAR AMPÉRA**

– NEPLATÍ PRO NESTAC. !

$\mathrm{div}\, \mathrm{rot}\, \bar{H} = \mathrm{div}\, \bar{j} = 0$ → ALE Z **ROVNICE KONTINUITY** PRO NESTAC. PŘÍPAD

$\mathrm{div}\, j + \frac{\partial \varrho}{\partial t} = 0$

$$\Rightarrow \boxed{\mathrm{div}\, \bar{j} = -\frac{\partial \varrho}{\partial t}}$$

VSUVKA

VEKTOR POTENC.

$E_i = \frac{\partial A}{\partial t}$ – INDUK. PROUD VE SMYČCE V BLÍZKOSTI TOROIDU, CÍVKY

⇒ DŮSLEDEK INDUK. EL. POLE $\bar{E}$ NA VOLNÉ NOSITELE

– $\bar{E}$ VZNIKÁ I V MÍSTĚ S NULOVOU MAG. INDUKCÍ

OBDRŽÍM

$\mathcal{E} = -\frac{\partial \psi}{\partial t} \wedge \mathcal{E}_{AB} = \int_A^B E^* dl$

→ OPAK MÁ VÝZNAM INDUK. VTIŠT. INTENZITY $\bar{E}_F^*$

MAGNETICKÉ POLE POSUVNÉHO PROUDU:

$\operatorname{rot}\bar H = \bar j$ — MUSÍM UPRAVIT, ABY NEBYLA V ROZPORU S **ROV. KONTINUITY**

— PLATÍ GAUSS $\boxed{\operatorname{div} D = \varrho}$ · A DOSADÍM ČAS. DER. $\frac{\partial}{\partial t}$

↓ RCE KONTINUITY VE TVARU

$$\operatorname{div}\bar j + \frac{\partial}{\partial t}\operatorname{div}\bar D = \operatorname{div}\left(\bar j + \frac{\partial \bar D}{\partial t}\right) = 0$$

$$\Rightarrow \bar j_c = \bar j + \frac{\partial \bar D}{\partial t}$$

j_c SPLŇUJE $\boxed{\operatorname{div}\bar j_c = 0}$

(JAKO HUST. STAC. PROUDU)

$$\Rightarrow \boxed{\operatorname{rot}\bar H = \bar j_c} \quad \text{or} \quad \boxed{\operatorname{rot}\bar H = \bar j + \frac{\partial \bar D}{\partial t}}$$

ZOBECNĚNÝ AMPÉRŮV ZÁKON V DIF. TVARU

— NESTAC. MAG POLE → PROJEVUJE SE **SIL. ÚČINKY** **(LORENTZ)** NA POHYB. NÁBOJ A **ELEKTROMAG INDUKCÍ**

— REPREZ. $\bar B$

— $\bar H$ ... INTENZITA MAG. POLE

$P_m = \mu_0 M$

$\bar B = \mu_0 \bar H + \bar P_m$ $\quad$ $B = \mu_0(\bar H + \bar M)$

$\bar j_c$ ... CELK. **HUSTOTA** MAKROS. NESTAC. PROUDU

~ ZÁV. NA t

$$\bar j_c = \underbrace{\bar j}_{\text{VOLNÝ}} + \underbrace{\varepsilon_0 \frac{\partial \bar E}{\partial t}}_{\text{MAXW}} + \underbrace{\frac{\partial \bar P}{\partial t}}_{\text{POLAR}} \qquad \frac{\partial D}{\partial t}$$

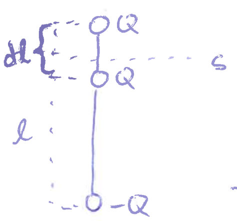
!

! — ZAHRNUJE HUST. **VOLNÉHO PROUDU** $\bar j$ (KOND. A KONV.) + HUST. **POLARIZ.** PROUDU $\bar j_p = \frac{\partial \bar P}{\partial t}$

+ HUST. **MAXWELL** PROUDU

$$\bar j_m = \cancel{[illegible]}\,\varepsilon_0 \frac{\partial \bar E}{\partial t}$$

(POSUVNÝ PROUD VE VAKUU)



— POLARIZAČNÍ PROUD V DIELEKTRIKU

— ORIENTOVANÉ **EL. DIPOLY** → JEDEN NÁBOJ (Q) OSCILUJE SKRZE POLOHU S

⇒ * MAKROSKOPICKÝ STŘÍD. PROUD

— HUSTOTA NÁB. ϱ_p A KONC. DIPOLŮ N, RYCHLOST POHYBU $\bar v_p$

⇒ PRO POSUV. PROUD

$$\bar j_p = \varrho_p \bar v_p = NQ\frac{d\bar l}{dt} = N\frac{d\bar p}{dt} = \frac{d\bar P}{dt}$$

HUSTOTA MAXWELL. PROUDU $\bar{j}_M$

- NENÍ PŘÍMO SPOJEN S **POHYBEM EL. NÁBOJŮ** ALE S ČASOVOU ZMĚNOU EL. POLE
- UZAVŘE OBVOD, KDE JE KOND. S VAKUOVOU MEZEROU
- MŮŽE A MUSÍ EXIST POUZE V PŘÍP. NESTAC. ~~MAG.~~ EL. POLE

- ZOBECNÍM AMPERA

$$\oint_l \bar{H} d\bar{l} = I_c$$

- PLATÍ ZCELA OBECNĚ, NEZÁV. NA ZPŮS. ROZLOŽENÍ PROUDU NA PLOŠE A VOLBĚ PLOCHY

- VE VAKUU PLATÍ

$$\bar{B} = \mu_0 \bar{H} \quad a \quad D = \varepsilon_0 E$$

- LIŠÍ SE DVOJICE $\bar{B} - \bar{H}$ A $\bar{D} - \bar{E}$ POUZE KONSTANTAMI BEZ FYZIK. OBSAHU

$$\Rightarrow \boxed{\mathrm{rot}\, \bar{B} = \mu_0 \bar{j} + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E}{\partial t}}$$

ÚPLNÁ SOUSTAVA MAXWELLOVÝCH ROVNIC

- EL. POLE ZÁVISÍ NA **ROZLOŽ.** **NÁBOJŮ** A **ZMĚNÁCH** **MAG.** POLE
- MAG. POLE ZÁVISÍ NA **ROZLOŽ. PROUDŮ** A **ZMĚNÁCH EL. POLE**
- Z MAXW. VYPLÝVÁ OBEC. ROV **KONTINUITY PROUDU**
- OMEZILI JSME SE NA **STATICKÉ** ŘEŠENÍ
  - V KLIDU VŮČI POČÁTKU
- PARCIÁLNÍ DIF. ROV 1. ŘÁDU
  - NEKONEČNĚ MNOHO ŘEŠ.

CHCI-LI JEDNOZNAČNÉ
- MUSÍM URČIT HRANIČNÍ PODMÍNKY

GAUSS | AMPÉR

$$\oint_S \bar{D} \cdot d\bar{S} = Q \qquad \oint_l \bar{H} d\bar{l} = I + \int_S \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} d\bar{S}$$

$$\oint_l \bar{E} \cdot d\bar{l} = -\int_S \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} d\bar{S} \qquad \oint_S \bar{B} \cdot d\bar{S} = 0$$

FARADAY | NEEXIST. MONOPOLŮ

1. SERIE →

$$\mathrm{div}\, \bar{D} = \varrho \qquad \mathrm{rot}\, \bar{H} = j + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$$

$$\mathrm{rot}\, E = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \qquad \mathrm{div}\, \bar{B} = 0$$

- CHCI $\bar{E}, \bar{B}, \bar{D}, \bar{H}$ → ZADÁM ROZLOŽ. NÁBOJŮ **2. SERIE** →
- CHCI VĚDĚT ROZLOŽ → ZADÁM E, B, D, H

RELACE $\bar{E} - \bar{B}$

- 4 NEZNÁMÉ (EBDH) → 12 NEZNÁMÝCH FCÍ → 8 SLOŽKOVÝCH FCÍ MAXW. ROVNIC → **NEDOSTAČUJE**
  - RACE POUŽIJI LÁTKOVÉ VZTAHY PROSTŘEDÍ

$$\bar{D} = \bar{D}(\bar{E}) \qquad \bar{B} = \bar{B}(\bar{H})$$

- MNOHO LÁTEK **LIN.** CHAR. $\bar{D} = \varepsilon \bar{E}$ $\bar{B} = \mu \bar{H}$
- STAČÍ ZNÁT ε, μ, γ

PAK $\bar{P} = \varepsilon_0 \varkappa_e \bar{E}$ $\bar{P}_m = \mu_0 \varkappa_m \bar{H}$

- PAK JEŠTĚ OHM $\bar{j} = \gamma (\bar{E} + \bar{E}^*)$

- DOPLNÍM MAXWELLOVY

DOPLNĚNÍ SOUSTAVY

↳ HLEDÁNÍ $\vec{E}(\vec{r},t)$ a $\vec{B}(\vec{r},t)$ SE ZJEDNODUŠÍ NA 6 ROVNIC

– FYZIKÁLNÍ VÝZNAM UDÁN LORENTZEM

VE VAKUU $\varepsilon=\varepsilon_0$ a $\mu=\mu_0$

$$\boxed{\begin{aligned} &\mathrm{div}\,\vec{E}=0 && \mathrm{rot}\,\vec{B}=\frac{1}{c^2}\frac{\partial E}{\partial t} \\ &\mathrm{rot}\,\vec{E}=-\frac{\partial B}{\partial t} && \mathrm{div}\,\vec{B}=0 \end{aligned}}$$

$\varepsilon_0\mu_0$

– POUZE V PROSTŘ. KDE SE MĚNÍ **SPOJITĚ**

– NA ROZHRANÍ **SELHÁVAJÍ** (TAM KDE DOCH. K NESPOJ. ZMĚNÁM)

PROČ PŘES ∮ ?

– POUŽITÍ **INTEGRAČNÍCH** VZTAHŮ

– ODVODÍM PŘÍKLAD TEČNÝCH A NORMÁLOVÝCH SLOŽEK D, B, E, H PŘI PŘECHODU

– PROTOŽE INTEGR. VZTAHY PRO $\vec{D}$ a $\vec{B}$ PLATÍ NA UZAVŘ. PLOCHÁCH ZŮSTÁVAJÍ PLATNÉ, I KDYŽ UVNITŘ PLOCHY JE PŘECHOD

→ PODMÍNKY $\vec{n}\cdot(\vec{D}_1-\vec{D}_2)=\sigma$

$\vec{n}\cdot(\vec{B}_1-\vec{B}_2)=0$

PRO TEČNÉ A NORM. SLOŽKY

– V INTEGR. TVARU PRO VEKTORY $\vec{E}$ a $\vec{H}$ CIRKULUJÍCÍ OKOLO ℓ

↳ ZOBRAZÍ SE NOVÉ ČLENY $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ a $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

– ANALOGICKY ZMENŠOVÁNÍM KŘIVEK VE TVARU MALÝCH OBDÉLNÍKŮ PŘIMKNUTÝM K ~~MALÉ~~ VÝŠETŘ. PLOŠE A DÍKY KONEČNÝM HODNOTÁM $\vec{B}$ a $\vec{D}$ A JEJICH DERIVACÍ

→ ČLENY VÝSLEDKY NEOVLIVNÍ

$\Rightarrow \vec{n}\times(\vec{E}_1-\vec{E}_2)=0$ $\quad \vec{n}\times(\vec{H}_1-\vec{H}_2)=\vec{j}_s$

– ZAVEDU-LI PLOŠNOU DIV. A ROTACI

$$\boxed{\begin{aligned} &\mathrm{DIV}\,\vec{D}=\sigma && \mathrm{rot}\,\vec{H}=j_s \\ &\mathrm{rot}\,\vec{E}=0 && \mathrm{DIV}\,\vec{B}=0 \end{aligned}}$$

SUMA: HLAVNÍ MAX. ROV. → MIC BEZ UŽITÍ HRANIČNÍCH PODMÍNEK

POTENCIÁLY ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

PODMÍNKY NA ROZHRANÍ

$$\boxed{\begin{aligned} &\mathrm{DIV}\,D=\sigma && \mathrm{rot}\,H=j_s \\ &\mathrm{rot}\,E=0 && \mathrm{DIV}\,B=0 \end{aligned}}$$

σ... PLOŠ. HUST. VOLNÝCH NÁB.

j_s... LIN. HUST. VOLNÝCH PLOŠ. PROUDŮ

→ POKUD SE V PROSTŘ. VYSKYT. POUZE VÁZ. NÁB. A PROUDY

→ BUDOU HODNOTY 0

→ ROV. SE ZJEDNODUŠÍ

POTENCIÁL ELMAG POLE

- UVEDLI JSME, ŽE VEKT. POLE, KTERÉ MÁ V URČITÉ OBLASTI $\text{rot} = 0$
  - MŮŽE BÝT VYJÁDŘENO JAKO **GRADIENT** NĚJAK. SKALÁR. **POLE φ**
  - ZAVEDLI JSME ELSTAT POTENCIÁL
  - ZJEDNODUŠUJE TO VÝPOČET POLE (ELEKTR.)
  - ⊕ – MÍSTO VÝPOČTU 3 SLOŽEK INTENZITY → JEN JEDNA ROVNICE
    - ⇒ **LAPLACEOVA**
    - OR POISSON
    - (1 SKAL. FCE)
  - φ ... DEF. NEJEDNOZNAČNĚ

- SOLENOID. POLE (VEKTOROVÉ) JEHOŽ DIV = 0 ⇒ ZAVEDLI JSME **VEKTOR. POTENCIÁL**
  (POLE BYLO ROVNO ROTACI TOHOTO POTENC.)
  $\boxed{B = \nabla \times A}$
  ZJEDNODUŠILO TO VÝPOČET MAG. POLE
  ⇒ VEKTOR POISS. RCE

- DEFINOVÁNO NA ADITIVNÍ POLE $\boxed{A}$ S PODMÍNKOU $\nabla \times A = 0$

- **OBEC. ELMAG.**
  - ANI POT. ANI SOLEN. → MŮŽU ZJEDNODUŠIT NA VÝP. POTENCIÁLU?

- Z MAXW. → SVÁZÁNÍM $\bar{B}$ S $\bar{E}$ → **SOLEN.** POLE → ZAVEDU $\bar{A}$ ... VEKT. POTENC.
  $\bar{B} = \nabla \times \bar{A}$

$\bar{A}$ .. ALE JIŽ PŘEDST. NESTAC. POLE $\bar{A}(\bar{r}, t)$

$$\text{rot}\left(\bar{E} + \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}\right) = 0$$

$\bar{E}$ ... NENÍ POTENC.

POLE $\bar{E} + \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}$ JE !

$$\boxed{\bar{E} + \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}} = -\text{grad}\,\varphi$$

ZAVEDU POTENC. DO 1. SERIE MR.
$\varphi, \bar{A}$

$$\boxed{\bar{E} = -\text{grad}\,\varphi - \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \qquad \bar{B} = \text{rot}\,\bar{A}}$$

→ 2. SERIE PAK JIŽ SPÍŠE VYSTUPUJE JAKO JISTÁ PODMÍNKA

DO 1. SERIE

$$\text{div}\left(\text{grad}\,\varphi + \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}\right) = \frac{-\varrho}{\varepsilon_0}$$

$$\text{rot}\,\text{rot}\,\bar{A} = \mu j - \varepsilon\mu \frac{\partial}{\partial t}\left(\text{grad}\,\varphi + \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}\right)$$

$\nabla \times \nabla \times \bar{A} = \nabla \nabla \cdot \bar{A} - \Delta \bar{A}$

$\cancel{\nabla\nabla\cdot\bar{A} - \varepsilon\mu \frac{\partial \varphi}{\partial t} \ldots \nabla\nabla\cdot\bar{A}}$

$-\Delta A = \mu j - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \varepsilon\mu \frac{\partial\,\text{grad}\,\varphi}{\partial t} - \nabla\nabla\cdot\bar{A}$

$+\Delta A + \varepsilon\mu \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\mu j - \text{grad}\left(\varepsilon\mu \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \text{div}\,\bar{A}\right)$

POMOCÍ VEKTOR ANAL.

$$\Delta \varphi = -\frac{\varrho}{\varepsilon} - \frac{\partial}{\partial t}\text{div}\,\bar{A}$$

$$\Delta \bar{A} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial t^2} = -\mu j + \text{grad}\left(\text{div}\,\bar{A} + \varepsilon\mu \frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)$$

$$\Delta\varphi = -\frac{\varrho}{\varepsilon} - \frac{\partial}{\partial t}\operatorname{div}\bar{A}$$

$$\Delta\bar{A} - \varepsilon\mu\frac{\partial^2\bar{A}}{\partial t^2} = -\mu\bar{j} + \operatorname{grad}\left(\operatorname{div}\bar{A} + \varepsilon\mu\frac{\partial\varphi}{\partial t}\right)$$

MOC SE NEZJEDNODUŠILO

BUDU KLÁST PODMÍNKU ABY $\varphi, \bar{A}$ →

$$\boxed{\operatorname{div}\bar{A} + \varepsilon\mu\frac{\partial\varphi}{\partial t} = 0}$$

PODMÍNKA „LORENTZOVA"

$$\boxed{\begin{aligned}\Delta\varphi - \varepsilon\mu\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} &= -\frac{\varrho}{\varepsilon}\\ \Delta\bar{A} - \varepsilon\mu\frac{\partial^2\bar{A}}{\partial t^2} &= -\mu\bar{j}\end{aligned}}$$

NEHOMOGENNÍ VLNOVÉ ROVNICE – JEDNA SKALÁR + DRUHÁ VEKTOR

POKUD V PROSTORU NEJSOU NÁBOJE (VOLNÉ) A PROUDY

$$\boxed{\begin{aligned}\Delta\varphi - \varepsilon\mu\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} &= 0\\ \Delta\bar{A} - \varepsilon\mu\frac{\partial^2\bar{A}}{\partial t^2} &= 0\end{aligned}}$$

HOMOGENNÍ

POPISUJE ŠÍŘENÍ ELMAG VLN V PROSTORU

PROČ ?

KALIBRAČNÍ TRANSFORMACE

VE STAC. POLI PŘEDTÍM PŘEDPOKLADEK $\operatorname{div}\bar{A} = 0$

– NEJEDN. URČENÉ POTENC.

$$\varphi' = \varphi - \frac{\partial\Lambda}{\partial t} \qquad \bar{A}' = \bar{A} + \operatorname{grad}\Lambda$$

Λ ... LIBOVOL. FCE

NEMĚNÍ SE PŘI NÍ $\bar{E}$ A $\bar{B}$

OVĚŘÍM

$$\bar{E}' = -\operatorname{grad}\varphi' - \frac{\partial\bar{A}'}{\partial t} = -\operatorname{grad}\varphi + \operatorname{grad}\left(\frac{\partial\Lambda}{\partial t}\right) - \frac{\partial\bar{A}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t}(\operatorname{grad}\Lambda)$$

$$= -\operatorname{grad}\varphi - \frac{\partial\bar{A}}{\partial t} = \bar{E}$$

$$\bar{B}' = \operatorname{rot}\bar{A}' = \operatorname{rot}\bar{A} + \operatorname{rot}\operatorname{grad}\Lambda = \operatorname{rot}\bar{A} = \bar{B}$$

⇒ ELEKTROMAGNETICKÉ POLE JE „**KALIBRAČNĚ INVARIANTNÍ**"

ENERGIE A HYBNOST ELMAG. POLE

- ZNÁM ZACH $\bar{E}$ A $\bar{P}$
- NÁBOJ $\rightarrow \rho(\bar{r},t)$ → POPÍŠU JEHO POHYB POLEM RYCHLOSTI $\bar{v}(\bar{r},t)$
- $\bar{f}$... HUSTOTA SÍLY
  - POLE PŮSOBÍ NA ROZLOŽENÝ NÁBOJ

$$\boxed{\bar{f} = \rho(\bar{E} + \bar{v}\times\bar{B})} \qquad \text{LORENTZ}$$

$$\boxed{h = j\cdot E} \quad \text{DIF. TVAR VÝKONU}$$

h ... VÝKON $\qquad h = \bar{f}\cdot\bar{v} = \rho(\bar{v}\cdot\bar{E}) + \rho\bar{v}\cdot(\bar{v}\times\bar{B}) = \bar{j}\cdot\bar{E}$

$\bar{j}$... PROUD. HUST.

↓

VEZMU Z MR → $h = \bar{j}\cdot\bar{E} = E\cdot\mathrm{rot}\bar{H} - \bar{E}\cdot\frac{\partial\bar{D}}{\partial t}$

$\nabla\times H = j + \frac{\partial D}{\partial t}$

$j = \nabla\times H - \frac{\partial D}{\partial t}$

$\mathrm{rot}\bar{E} = -\frac{\partial\bar{B}}{\partial t} \quad /\cdot\bar{H}$

$\bar{H}\cdot\mathrm{rot}\bar{E} + \bar{H}\cdot\frac{\partial\bar{B}}{\partial t} = 0$

$$h = \bar{j}\cdot\bar{E} = (\bar{E}\cdot\mathrm{rot}\bar{H} - \bar{H}\cdot\mathrm{rot}\bar{E}) - \left(\bar{E}\frac{\partial\bar{D}}{\partial t} + \bar{H}\frac{\partial\bar{B}}{\partial t}\right)$$

PLATÍ IDENTITA

$\mathrm{div}(\bar{E}\times\bar{H}) = \bar{H}\cdot\mathrm{rot}\bar{E} - \bar{E}\,\mathrm{rot}\bar{H}$

DÁVÁ ROZMĚR VÝKONU ⇒ ZBYTEK PRAVÉ STRANY MUSÍ

HULA

$$\bar{j}\cdot\bar{E} = -\mathrm{div}(\bar{E}\times\bar{H}) - \left(\bar{E}\frac{\partial\bar{D}}{\partial t} + \bar{H}\frac{\partial\bar{B}}{\partial t}\right)$$

→ OBECNÉ JE TO Z MR
- MUSÍ OBECNĚ PLATIT PRO LIBOVOL. ELMAG POLE

UPRAVÍM PRAVOU STRANU

- POUŽIJI MAT. VZTAHY

$\bar{D} = \varepsilon\bar{E} \qquad \bar{B} = \mu\bar{H}$

ε, μ NEZÁV. NA t

- JDE O „LIN. MĚKKÉ PROSTŘ."

$$\bar{E}\frac{\partial\bar{D}}{\partial t} + \bar{H}\frac{\partial\bar{B}}{\partial t} = \varepsilon\bar{E}\frac{\partial\bar{E}}{\partial t} + \mu\bar{H}\frac{\partial\bar{H}}{\partial t} = \boxed{\frac{\partial}{\partial t}\Big[\underbrace{\tfrac{1}{2}(\bar{E}\cdot\bar{D} + \bar{H}\cdot\bar{B})}_{w}\Big]}$$

$$\boxed{\bar{j}\cdot\bar{E} = -\mathrm{div}\bar{S} - \frac{\partial w}{\partial t}}$$

$$\boxed{\bar{S} = \bar{E}\times\bar{H}}$$

$$\boxed{w = \frac{1}{2}(\bar{E}\cdot\bar{D} + \bar{H}\cdot\bar{B})}$$

HUST. E ELMAG. POLE

- w... MÁ FYZIKÁLNÍ ROZMĚR OBJEM. HUSTOTY ENERGIE
  $\bar{S}$... VEKTOR KOLMÝ NA $\bar{B}$ A $\bar{E}$
  - MÁ ROZMĚR HUSTOTY TOKU (E) $\quad J/(m^2 s)$
- V PROSTORU BEZ VOLNÝCH Q A $\bar{j} = 0$

$$\Rightarrow \boxed{\mathrm{div}\bar{S} + \frac{\partial w}{\partial t} = 0} \quad \text{FORMÁLNĚ SHODNÉ S ROVNICÍ KONTIN. PROUDU}$$

$$\boxed{\operatorname{div}\vec S + \frac{dw}{dt} = 0}$$

– FORM. SHODNÝ S ROV. KONTINUITY PROUDU;
(JEN OPERUJE SE ZÁK. ZACH. Q)

INTERPRETUJI JAKO LOKÁLNÍ TVAR ZÁK. ZACH. E!

→ POKUD VEZMU $\vec j$ JAKO KOND. PROUD SPLŇ. OHMA

$$\to \vec j\cdot \vec E = \frac{j^2}{\gamma} - \vec j\cdot \vec E^{*}$$

VTIŠTĚNÁ

$\vec j = \gamma \vec E$

$\frac{j^2}{\gamma} = E\cdot j$

$$\Rightarrow \vec E^{*}\cdot\vec j = \frac{j^2}{\gamma} + \frac{\partial w}{\partial t} + \operatorname{div}\vec S$$

– VOLÍM UZAVŘ. PLOCHU Σ OHRANIČ. V

$$\int_V \vec E^{*}\cdot\vec j\,dV = \int_V \frac{j^2}{\gamma}\,dV + \frac{d}{dt}\int_V w\,dV + \underbrace{\int_V \operatorname{div}\vec S\,dV}_{\text{PŘEV. NA PLOŠNÝ DLE GAUS. VĚTY}}$$

DODANÝ VÝKON – VTIŠTĚNÝ

$$\int_V \vec E^{*}\cdot\vec j\,dV = \underbrace{\int_V \frac{j^2}{\gamma}\,dV}_{\text{ZMĚNA NA J. TEPLO}} + \frac{d}{dt}\int_V w\,dV + \oint_\Sigma \vec S\,d\vec\Sigma$$

TOK VEKTORU PLOCHOU

→ „ENERGETICKÁ" BILANCE V OBJ. V"

E ELMAG. POLE V OBJEMU V

ČAS. ZMĚNA E

„VYTÉKAJÍCÍ ENERGIE"

„VÝKON DODANÝ DO OBJEMU VTIŠTĚNÝMI INTENZITAMI SE SPOTŘEBUJE JEDNAK NA **JOULEOVO** TEPLO A NA ZMĚNU E ELMAG POLE, JEDNAK ČÁST TOHOTO VÝKONU VYTEČE PLOCHOU Σ OHRANIČENOU OBJ. V"

POYNTINGOVA VĚTA $\vec S = \vec E\times\vec H$

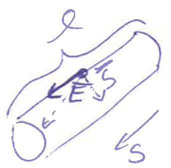
– HUSTOTA TOKU ENERGIE
– POYNTINGŮV VEKTOR

- LZE MĚŘIT
- V MĚKKÉM LIN. PROSTŘEDÍ ZAHRNUJE JAK E SAMOT. POLE, TAK I NUTNOU POLARIZAČNÍ E

VE VAKUU →

$$w = \frac{1}{2}\left(\varepsilon_0 E^2 + \frac{B^2}{\mu_0}\right) = \frac{1}{2\mu_0}\left(\frac{E^2}{c^2} + B^2\right)$$

$$\Rightarrow \boxed{\vec S = \frac{1}{\mu_0}(\vec E\times\vec B)}$$



$\frac{u}{l} = E$

$E \parallel \vec j$ (SMĚROVĚ)

$H = ?$

$H\cdot 2\pi r = I$

MÁ TEČNÝ SMĚR KE KRUŽ.

$H = \frac{I}{2\pi r}$

$S = \frac{u}{l}\,\frac{I}{2\pi R}$

$\oint_\Sigma S\,d\Sigma = uI$

ELEKTROMAG. VLNY

ROVINNÁ VLNA

— POSTUPNÁ ROVINNÁ VLNA

VLNOVÁ ROVNICE $\Delta f - \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = 0$ v... FÁZ. RYCHLOST

$\frac{1}{c^2} = \mu_0 \varepsilon_0$

$\bar{E}, \bar{B}$

LIN. PROST

$\operatorname{div} D = \varrho$ $\qquad \operatorname{rot} B = \mu \cdot j + \mu \frac{\partial B}{\partial t}$

$\operatorname{rot} \bar{E} + \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = 0$ $\qquad \operatorname{div} B = 0$

- $\operatorname{rot}\operatorname{rot} \bar{E} + \operatorname{rot} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = 0$ — VE VOL. PROSTORU $\varrho = 0$ $\bar{j} = 0$ — LIN. CHARAKTER $\varepsilon \cdot E = D$ $B \cdot \mu = H$

$-\Delta \bar{E} + \nabla \underbrace{(\nabla \cdot \bar{E})}_{=0} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$

$+\Delta \bar{E} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$ POROVNÁM $\Delta f - \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = 0$

- $\operatorname{rot}\operatorname{rot} \bar{B} - \mu \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{rot} \bar{E} = 0$

$-\Delta \bar{B} + \nabla \underbrace{(\operatorname{div} \bar{B})}_{=0} - \mu \varepsilon \frac{\partial}{\partial t}\left(-\frac{\partial B}{\partial t}\right) = 0$

$\Delta B - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} = 0$

— ŘEŠENÍ ROVNICE →

ROVINNÁ VLNA

$f(\bar{s}\bar{r} - vt)$ — OBSAH. INF. O DÉLCE PERIODY

↑ FUNKCE — ČAS. I PROST. ZÁVISLOST

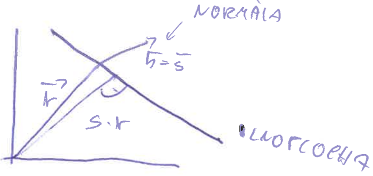
$\lambda = v \cdot T$

$f(\xi) = f(\xi + T)$

ŘEKNU, ŽE FCE JE PERIOD.

$f\left(t - \frac{\bar{s} \cdot \bar{r}}{v}\right)$

ČAS JE ARGUMENT



$\bar{s}$ JE JEDNOTKOVÝ VEKTOR VE SMĚRU $\bar{S}$ (POYNT.)

$\bar{E} = \bar{E}\left(t - \frac{\bar{s} \cdot \bar{r}}{v}\right)$ — OBECNÝ ZÁPIS

DER.

$\frac{\partial \bar{E}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \cdot \left(-\frac{s_x}{v}\right)$

$(\operatorname{rot} E)_x = \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\frac{\partial E_z}{\partial t} \cdot \frac{s_y}{v} + \frac{\partial E_y}{\partial t} \cdot \frac{s_z}{v}$

$= -\frac{1}{v}\left(\frac{\partial E_z}{\partial t} s_y - \frac{\partial E_y}{\partial t} s_z\right) = -\frac{1}{v}\left(\bar{s} \times \frac{\partial E}{\partial t}\right)_x$

$\operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial B}{\partial t}$

$\Rightarrow B = \frac{1}{v}(\bar{s}\times\bar{E})$

– B JE ⊥ NA E

$E = -v(\bar{s}\times\bar{B})$

$\nabla\times B = -\frac{1}{v}\left[\bar{s}\times\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}\right]$

$\mu\varepsilon\frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = -\frac{1}{v}\left[\bar{s}\times\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}\right]$

$\bar{E} = -\frac{v^2}{v}\left[\bar{s}\times\bar{B}\right]$

$E = -v\left[\bar{s}\times\bar{B}\right]$

B – PSEUDOVEKTOR
– VYJADŘUJÍ ROTACI / RYCHLOST ROTACE

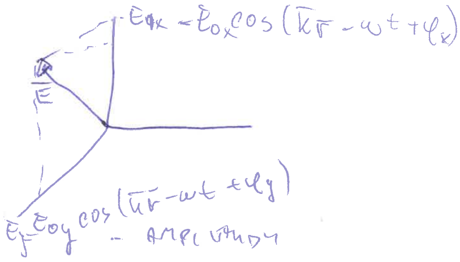
- PŘI INV. SOUŘ. → ∗ LEVOTOČ.

– PSEUDOV. NEMĚNÍ SMĚR, ALE PRAVÉ ANO

$E = \bar{E}\left(\underbrace{k\cdot\bar{s}}_{\bar{k}}\bar{r} - kvt + \varphi\right)$ $\omega = 2\pi\nu$

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$

$\bar{E}(\bar{k}\cdot\bar{r} - \omega t + \alpha)$



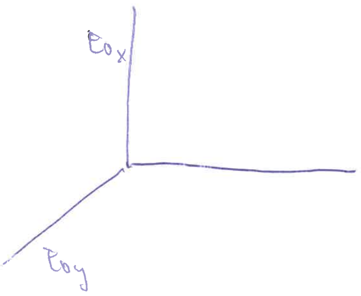
SIN θ

$\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 = 2\,\frac{E_xE_y}{E_{0x}E_{0y}}\cos\delta = \sin^2\delta$

2. NEBO Σ ??

$\delta = n\cdot\pi$

$\Rightarrow \left(\frac{E_x}{E_{0x}} \pm \frac{E_y}{E_{y0}}\right)^2 = 0$



$E_{x_0} = E_{y0}$ – KRUŽNICE.