

Elektrický Bohm – Aharonův jev

Jan Faltýnek

Historické okénko

neintuitivní důsledky přechodu od klasické fyziky ke kvantové

- 1949 zmiňuje Ehrenfest
- O deset let později rozpracovávají Bohm se svým studentem (Aharonov)
- 1.8.1959 – vychází článek v The Physical Review „O významu potenciálů“

Potenciály

- v klasické fyzice – **potenciál** = „nefyzikální“ veličina → pouze nepřímý fyzikální význam převedený na pole
- Aharonov, Bohm: „**Pole má vliv na částici i když vymizí!**“

1. INTRODUCTION

IN classical electrodynamics, the vector and scalar potentials were first introduced as a convenient mathematical aid for calculating the fields. It is true that in order to obtain a classical canonical formalism, the potentials are needed. Nevertheless, the fundamental equations of motion can always be expressed directly in terms of the fields alone.

Potenciály

- v klasické fyzice – **potenciál** = „nefyzikální“ **veličina** → pouze nepřímý fyzikální význam převedený na pole
- Aharonov, Bohm: pole má vliv na částici i když je nulové a to ačkoliv i v QM platí **kalibrační invariance**

1. INTRODUCTION

IN classical electrodynamics, the vector and scalar potentials were first introduced as a convenient mathematical aid for calculating the fields. It is true that in order to obtain a classical canonical formalism, the potentials are needed. Nevertheless, the fundamental equations of motion can always be expressed directly in terms of the fields alone.

V klasické elektrodynamice byl zaveden skalární a vektorový potenciál pouze jako pohodlný matematický nástroj pro výpočet polí. Ano, pro potřeby kanonického formalismu jsou sice tyto potenciály vyžadovány. Nicméně pohybové rovnice lze vždy vyjádřit přímo pomocí polí samotných.

Potenciály

- v klasické fyzice – **potenciál = „nefyzikální“ veličina** → pouze nepřímý fyzikální význam převedený na pole
- Aharonov, Bohm: pole má vliv na částici i když je nulové a to ačkoliv i v QM platí **kalibrační invariance**

1. INTRODUCTION

IN classical electrodynamics, the vector and scalar potentials were first introduced as a convenient mathematical aid for calculating the fields. It is true that in order to obtain a classical canonical formalism, the potentials are needed. Nevertheless, the fundamental equations of motion can always be expressed directly in terms of the fields alone.

V klasické elektrodynamice byl zaveden skalární a vektorový potenciál pouze jako pohodlný matematický nástroj pro výpočet polí. Ano, pro potřeby kanonického formalismu jsou sice tyto potenciály vyžadovány. **Nicméně pohybové rovnice lze vždy vyjádřit přímo pomocí polí samotných.**

NE TAK V KVANTOVÉ FYZICE

Potenciály

- v klasické fyzice – **potenciál** = „nefyzikální“ **veličina** → pouze nepřímý fyzikální význam převedený na pole
- Aharonov, Bohm: pole má vliv na částici i když je nulové a to ačkoliv i v QM platí **kalibrační invariance**

1. INTRODUCTION

IN classical electrodynamics, the vector and scalar potentials were first introduced as a convenient mathematical aid for calculating the fields. It is true that in order to obtain a classical canonical formalism, the potentials are needed. Nevertheless, the fundamental equations of motion can always be expressed directly in terms of the fields alone.

V klasické elektrodynamice byl zaveden skalární a vektorový potenciál pouze jako pohodlný matematický nástroj pro výpočet polí. Ano, pro potřeby kanonického formalismu jsou sice tyto potenciály vyžadovány. **Nicméně pohybové rovnice lze vždy vyjádřit přímo pomocí polí samotných.**

NE TAK V KVANTOVÉ FYZICE

(např. se ukazuje že Lorentzův vzorec pro silové působení jen aproximací)

Elektrická verze

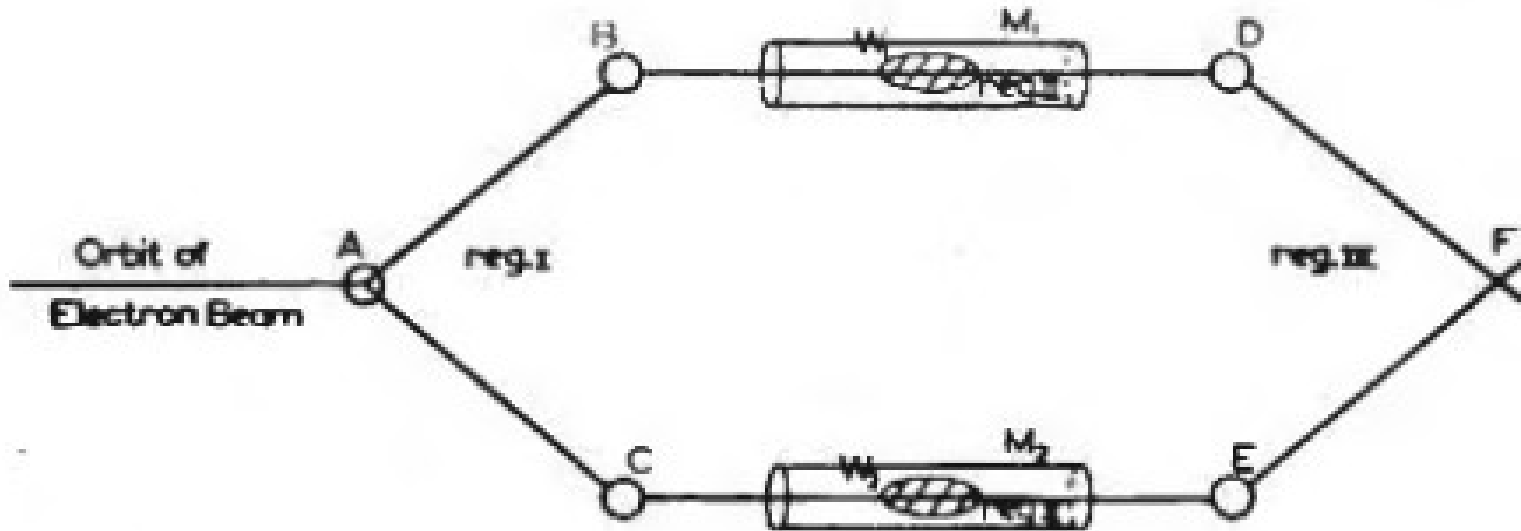
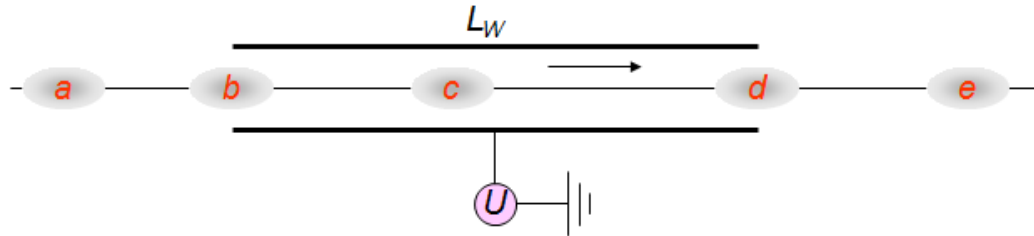


FIG. 1. Schematic experiment to demonstrate interference with time-dependent scalar potential. A, B, C, D, E : suitable devices to separate and divert beams. W_1, W_2 : wave packets. M_1, M_2 : cylindrical metal tubes. F : interference region.

Z přednášky...



Pět stadií průletu klubka W.F. pro dva režimy jeho činnosti

| stadium | statický režim | $U(t)$ | AB režim, časový | $U(t)$ |
|-----------------------------------|--|--------|-------------------------------------|--------|
| a volný let, <i>in</i> -dráha | Energie E , vln. vektor k | U | Energie E , vln. vektor k | 0 |
| b vstup do filtru | Akcelerace | U | Energie E , vln. vektor k | 0 |
| c průlet filtrem | Energie E , vln. vektor $k + \Delta k$ | U | "Energie" $E + U$, vln. vektor k | U |
| d výstup z filtru | Zpomalení | U | Energie E , vln. vektor k | 0 |
| e volný let, <i>out</i> -dráha | Energie E , vln. vektor k | U | Energie E , vln. vektor k | 0 |

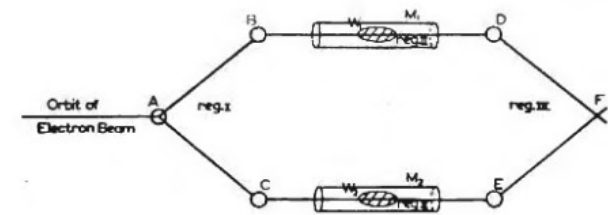


FIG. 1. Schematic experiment to demonstrate interference with time-dependent scalar potential. A, B, C, D, E : suitable devices to separate and divert beams. W_1, W_2 : wave packets. M_1, M_2 : cylindrical metal tubes. F : interference region.

$$I(y) = I_0 (1 + V \cdot \cos \Delta\Phi)$$

$$\Delta\Phi = \frac{1}{\hbar} \int_{t_0}^t d\bar{t} (V_1(\bar{t}) - V_2(\bar{t}))$$

Elektrická verze

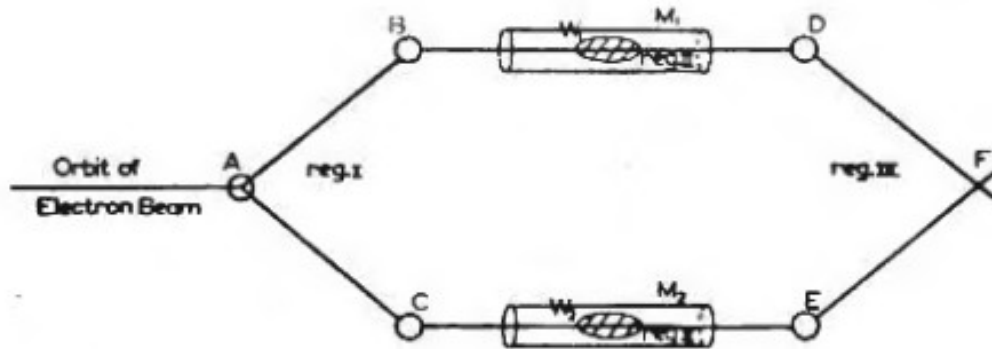


FIG. 1. Schematic experiment to demonstrate interference with time-dependent scalar potential. *A, B, C, D, E*: suitable devices to separate and divert beams. *W₁, W₂*: wave packets. *M₁, M₂*: cylindrical metal tubes. *F*: interference region.

řešení SR bez potenciálu

$$\psi(x,t) = \psi_1^0(x,t) + \psi_2^0(x,t)$$

a s potenciálem jako funkcí pouze času

$$\psi = \psi_1^0 e^{-iS_1/\hbar} + \psi_2^0 e^{-iS_2/\hbar},$$

$$S_1 = e \int \varphi_1 dt, \quad S_2 = e \int \varphi_2 dt.$$

změna fáze

$$(e/\hbar) \oint \varphi dt$$

Elektrická verze

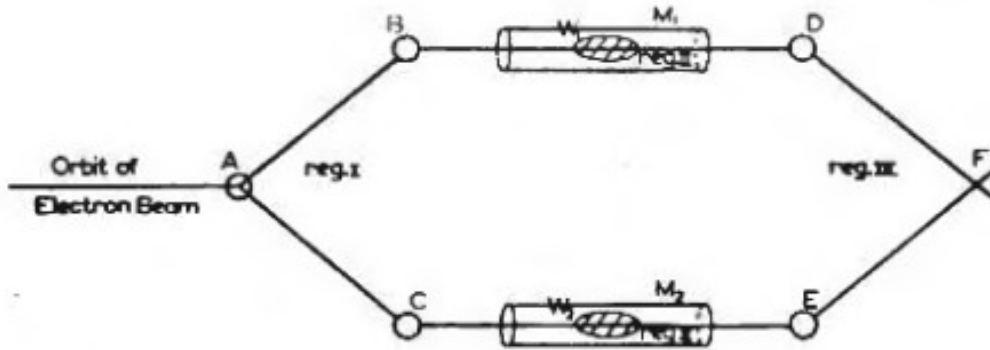


FIG. 1. Schematic experiment to demonstrate interference with time-dependent scalar potential. *A, B, C, D, E*: suitable devices to separate and divert beams. *W₁, W₂*: wave packets. *M₁, M₂*: cylindrical metal tubes. *F*: interference region.

řešení SR bez potenciálu

$$\psi(x,t) = \psi_1^0(x,t) + \psi_2^0(x,t)$$

a s potenciálem jako funkcí pouze času

$$\psi = \psi_1^0 e^{-iS_1/\hbar} + \psi_2^0 e^{-iS_2/\hbar},$$

$$S_1 = e \int \varphi_1 dt, \quad S_2 = e \int \varphi_2 dt.$$

změna fáze

$$(e/\hbar) \oint \varphi dt$$

BĚHEM POBYTU UVNITŘ VÁLČŮ (Wienův filtr) NA CHVÍLI (u jednoho) ZMĚNIT POTENCIÁL z 0 na V

Elektrická verze

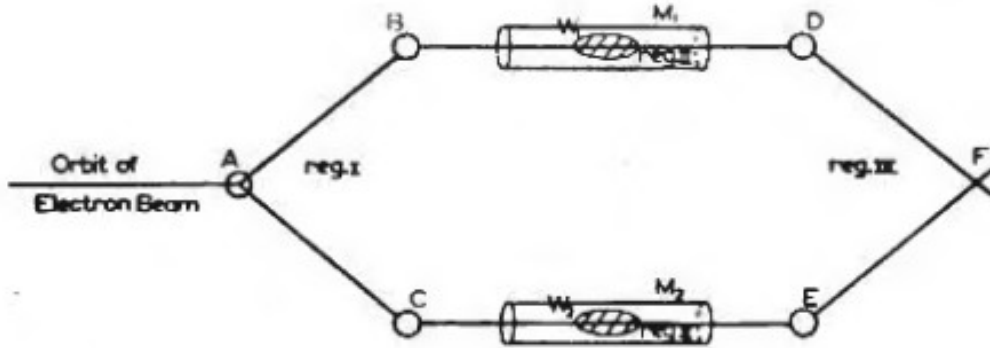


FIG. 1. Schematic experiment to demonstrate interference with time-dependent scalar potential. A, B, C, D, E : suitable devices to separate and divert beams. W_1, W_2 : wave packets. M_1, M_2 : cylindrical metal tubes. F : interference region.

řešení SR bez potenciálu

$$\psi(x,t) = \psi_1^0(x,t) + \psi_2^0(x,t)$$

a s potenciálem jako funkcí pouze času

$$\psi = \psi_1^0 e^{-iS_1/\hbar} + \psi_2^0 e^{-iS_2/\hbar},$$

$$S_1 = e \int \varphi_1 dt, \quad S_2 = e \int \varphi_2 dt.$$

změna fáze

$$(e/\hbar) \oint \varphi dt$$

KDY ale sepnout a **KDY** vypnout???

ergo kdy je klubko dostatečně uvnitř?

Elektrická verze

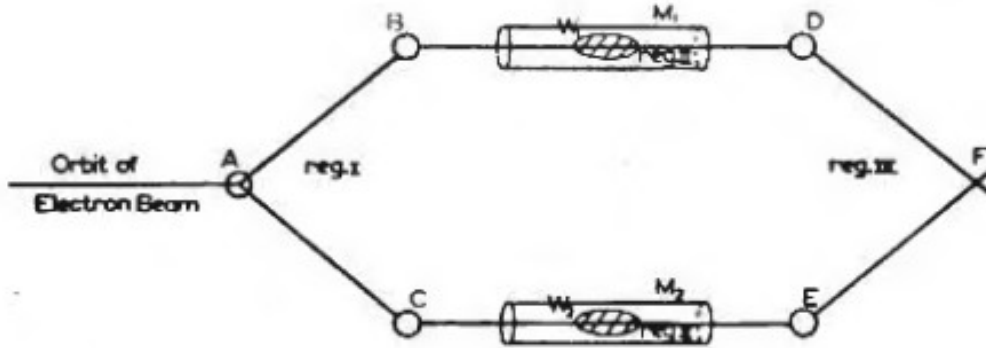


FIG. 1. Schematic experiment to demonstrate interference with time-dependent scalar potential. *A, B, C, D, E*: suitable devices to separate and divert beams. *W₁, W₂*: wave packets. *M₁, M₂*: cylindrical metal tubes. *F*: interference region.

řešení SR bez potenciálu

$$\psi(x,t) = \psi_1^0(x,t) + \psi_2^0(x,t)$$

a s potenciálem jako funkcí pouze času

$$\psi = \psi_1^0 e^{-iS_1/\hbar} + \psi_2^0 e^{-iS_2/\hbar},$$

$$S_1 = e \int \varphi_1 dt, \quad S_2 = e \int \varphi_2 dt.$$

změna fáze

$$(e/\hbar) \oint \varphi dt$$

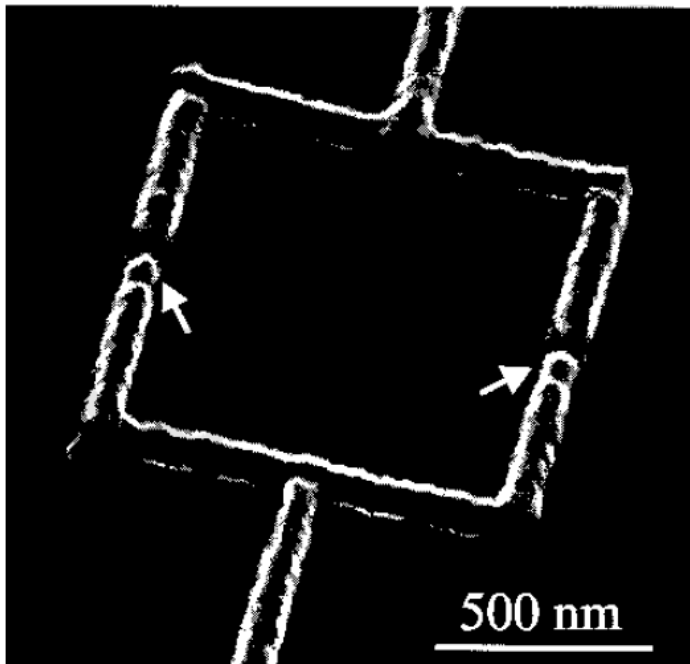
KDY ale sepnout a **KDY** vypnout???

TECHNICKY JE TO
UTOPIE

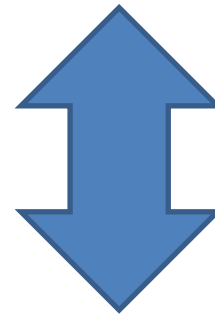
přesto se lze dočíst, že elektrický AB jev byl pozorován...

Magneto elektrická verze

Očekávali bychom, že podobně jako je spjato elektrické a magnetické pole, najdeme i nějaký experiment, kde se uplatní jak magnetická tak elektrická představa zároveň...

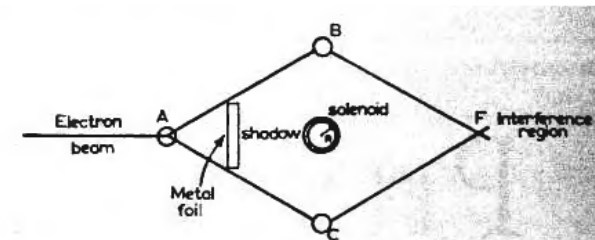


mikrometrové prstence



magnetický AB jev

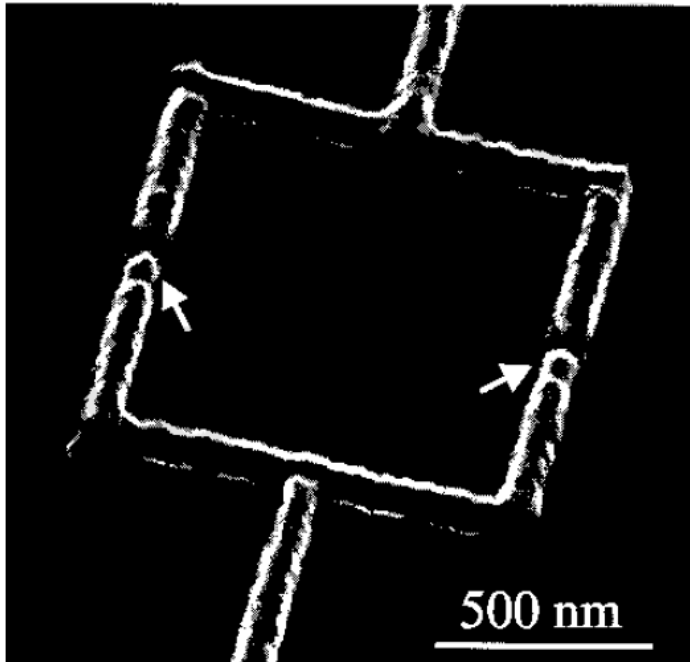
elektrický příspěvek???



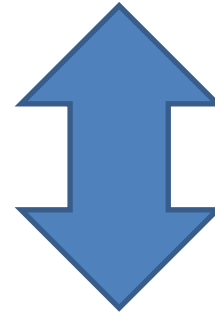
bohužel ve vodivých prstencích vytvořit nějaký potenciálový schod je obtížné

Magneto elektrická verze

Očekávali bychom, že podobně jako je spjato elektrické a magnetické pole, najdeme i nějaký experiment, kde se uplatní jak magnetická tak elektrická představa zároveň...

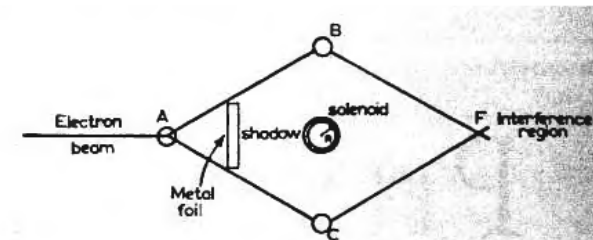


mikrometrové prstence



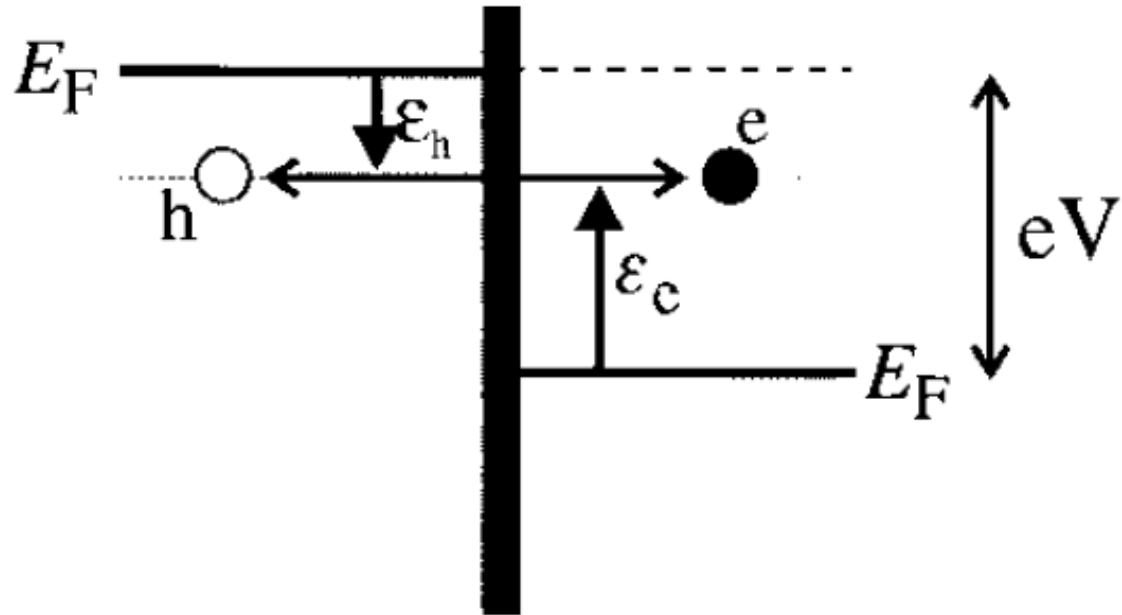
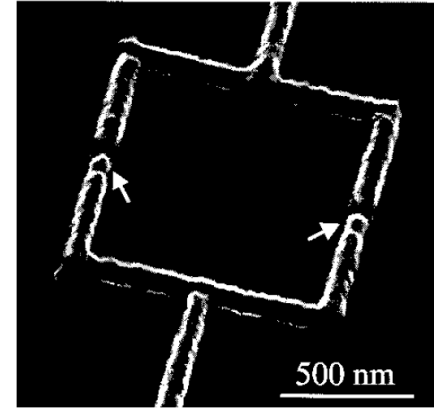
magnetický AB jev

elektrický příspěvek???

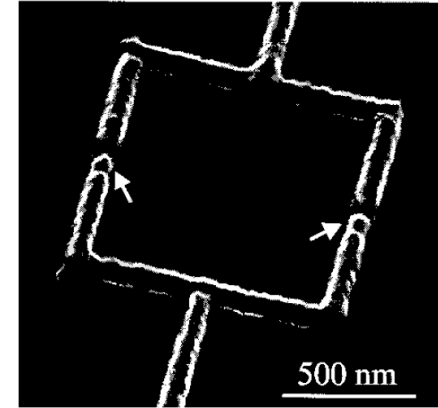
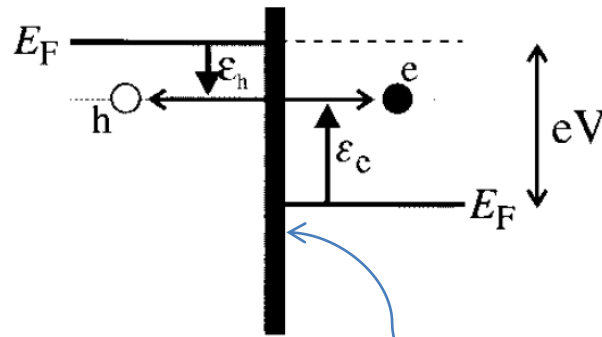


bohužel ve vodivých prstencích vytvořit nějaký potenciálový schod je obtížné a tedy pozorovat tento příspěvek není možné

ovšem pokud prstence přeručíme...



ovšem pokud prstence přeručíme...

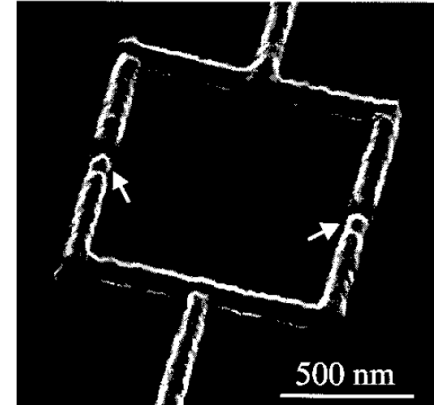
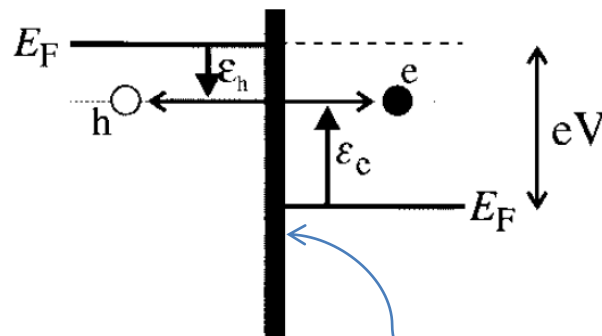


Elektrony zleva (obsazené stavy) mohou **tunelovat** skrz **bariéru** doprava (volno)

TO JE EKVIVALENTNÍ TVORBĚ PÁRŮ elektron-díra

pak nastává difuze elektronů a děr v opačných polovinách prstence

ovšem pokud prstence přerušíme...

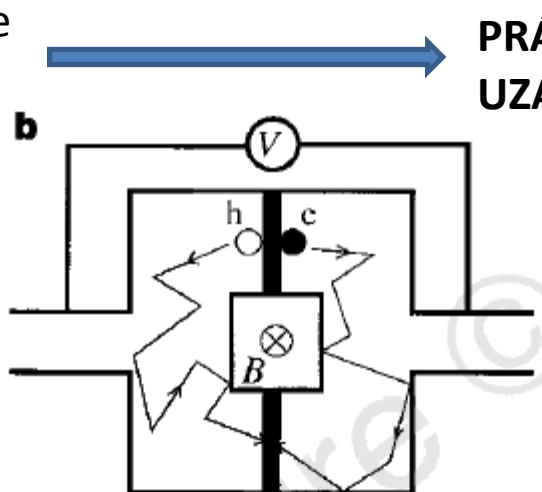


Elektrony zleva (obsazené stavy) mohou **tunelovat** skrz **bariéru** doprava (volno)

TO JE EKVIVALENTNÍ TVORBĚ PÁRŮ elektron-díra

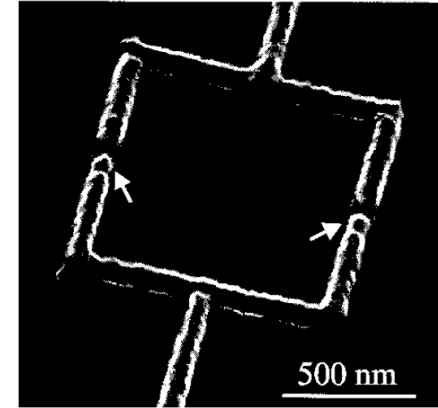
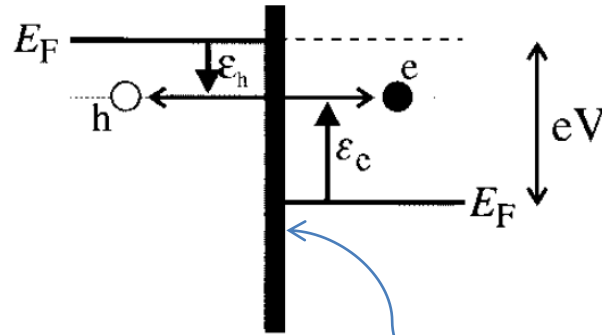
pak nastává difuze elektronů a děr v opačných polovinách prstence

Pravděpodobnost rekombinace vlny elektronu a díry je tedy **nenulová!**



PRÁVĚ TEHDY JE VYTVOŘENA UZAVŘENÁ SMYČKA

ovšem pokud prstence přeručíme...

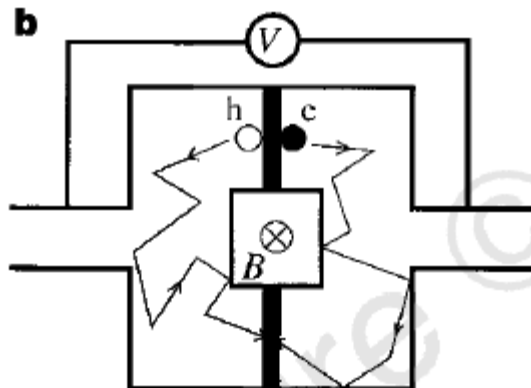


Elektrony zleva (obsazené stavy) mohou **tunelovat** skrz **bariéru** doprava (volno)

TO JE EKVIVALENTNÍ TVORBĚ PÁRŮ elektron-díra

pak nastává difuze elektronů a děr v opačných polovinách prstence

Pravděpodobnost rekombinace vlny elektronu a díry je tedy **nenulová!**



PRÁVĚ TEHDY JE VYTVOŘENA UZAVŘENÁ SMYČKA



právě tehdy se uplatní magnetický AB jev

$$\Delta\phi_B = \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{r} = 2\pi eBS/h$$

ALE... díky rozdílu napětí

$$E_e \neq E_d; E_e + E_d = eV$$

vznikne i rozdíl fází!!!!

$$\Delta\phi_V = 2\pi eVt/h.$$

ALE... díky rozdílu napětí

$$E_e \neq E_d; E_e + E_d = eV$$

vznikne i rozdíl fází!!!!

$$\Delta\phi_V = 2\pi eVt/h$$

Pro srovnání vzorec odvozený na přednášce pro elektrický AB jev:

$$\Delta\Phi = \frac{eUL}{\hbar v} \quad t = \frac{L}{v}$$

a z první folie:

$$(e/\hbar) \oint \varphi dt$$

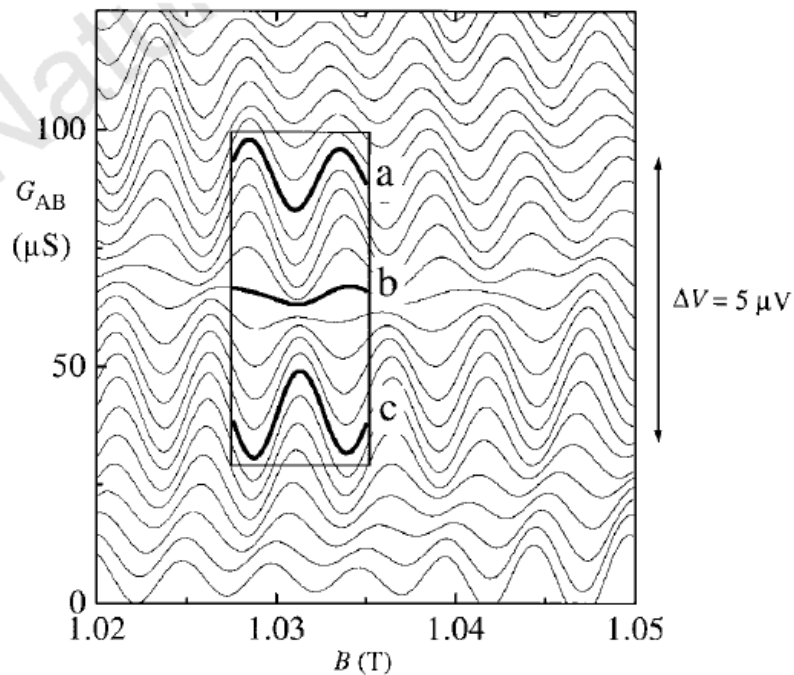


Figure 3 Aharonov-Bohm conductance as a function of magnetic field B at $T = 20$ mK for bias voltages separated by $0.48 \mu\text{V}$. The traces have been offset by $5 \mu\text{S}$ with respect to the conductance-axis for clarity. The Aharonov-Bohm conductance G_{AB} has been extracted from G by rejecting the Fourier components of G for magnetic frequencies smaller than 0.1 mT^{-1} . The bold traces a-c in the rectangular box show an example of the combined manifestation of the magnetic and electrostatic Aharonov-Bohm effect.

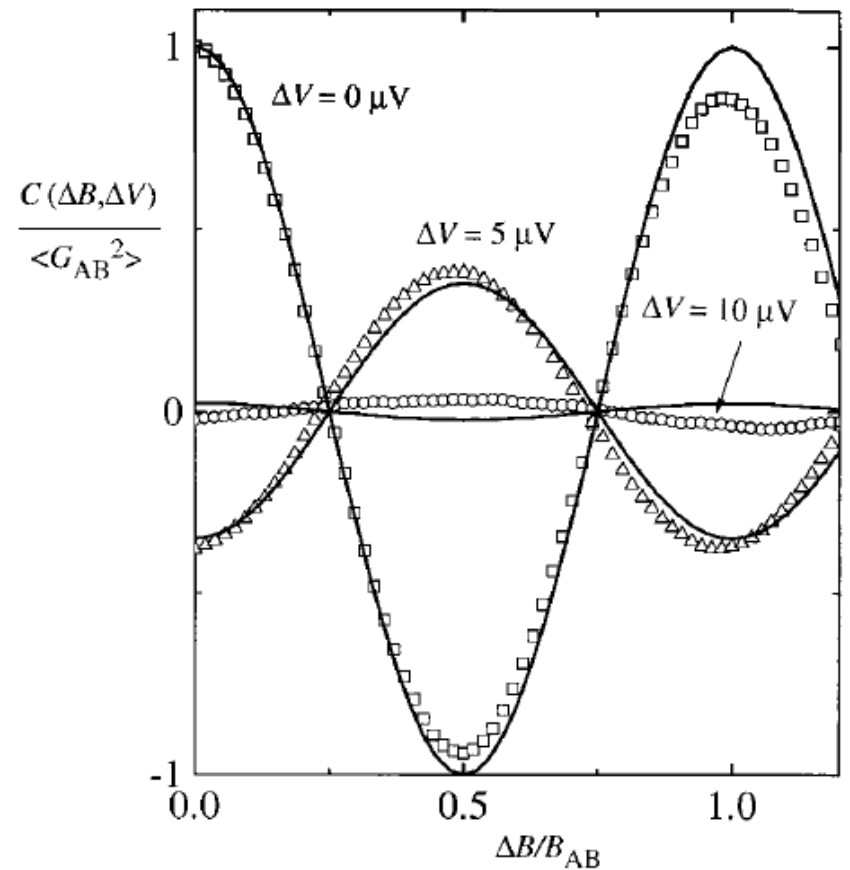


Figure 4 Normalized correlation function versus $\Delta B / B_{\text{AB}}$ at $T = 20$ mK.

Děkuji za pozornost!

- **Zdroje:**

Singificance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory

The Physical Review; American Physical Society; Vol. 115; 1. August 1959; p. 768-770

Magneto electric AB efect

Nature; Macmillan Publishers Ltd.; Vol. 391; 19. February 1998; p. 485-491

Bohm - Aharonův jev

přednášky z předmětu F4110