

## 6.2.6 Dvojštěrbinový experiment

**Předpoklady:** 060205

**Pedagogická poznámka:** Následující dvě hodiny jsou z převážné části převyprávěním dvou kapitol z Feynmanových přednášek z fyziky. V klasických učebnicích nic podobného není, což považuji za chybu. Soupis výsledků, které jsou v nich uvedeny, totiž nedává ani přibližnou představu o tom, jak se mikročástice chovají. Následující hodiny jsou pokusem to změnit.

Fyzika mikrosvěta se chová divně:

- světlo, které jsme měli za vlnění, se někdy chová jako částice,
- elektron, který jsme měli za částici, se někdy chová jako vlna.

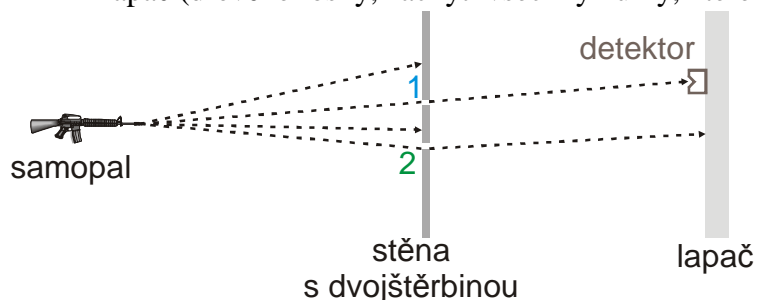
Ve skutečnosti je to docela pohodlné, všechny mikroskopické objekty se chovají stejně - jako "částice-vlny". To, co se na makroskopické úrovni zdálo zcela oddělené, se na mikroskopické úrovni spojí do jednoho nezvyklého objektu.

Chování "mikročástice" si srovnáme s chováním objektů z normálního světa - částicemi a vlnami. Třikrát "provedeme" podobný (dvojštěrbinový) pokus.

### Pokus s částicemi (kulka ze samopal)

Uspořádání experimentu:

- samopal vystřelující kulky náhodně v určitém úhlu,
- ocelová deska s dvěma otvory takové velikosti, aby každým z nich mohla projít právě jedna kulka,
- detektor (dřevěná krabice s pískem, každá kulka, která do ní dopadne v ní zůstane),
- lapač (dřevěné fošny, zachytí všechny kulky, které do nich narazí).



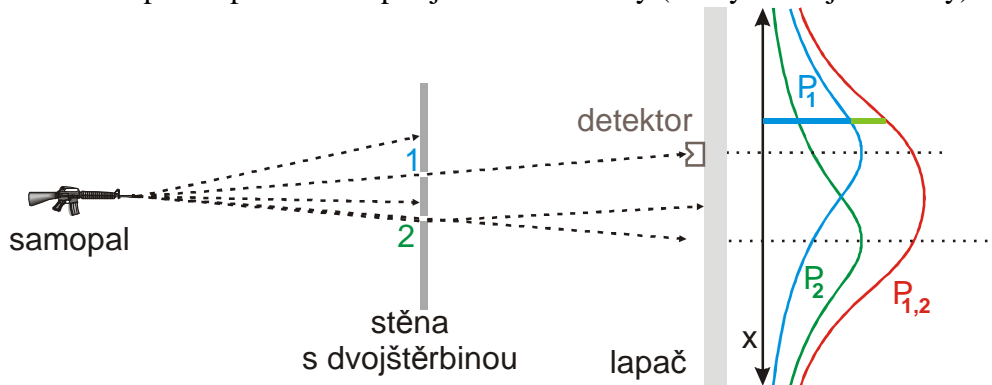
Měříme pravděpodobnost (nevíme, kam která kulka poletí), že kulka, která proletí libovolným otvorem v desce, dopadne do bodu  $x$  (místo, kde máme detektor)  $\Rightarrow$  stačí chvíli střílet a spočítat poměr mezi kulkami v desce a v krabici. Posunování detektoru naměříme tuto pravděpodobnost pro různá místa, z nich pak můžeme sestavit křivku s rozložením pravděpodobnosti.

Zjednodušení pokusu: Kulky jsou nezničitelné, nemohou se rozlomit, vždy dopadají v celku.

**Př. 1:** Odhadni výsledky pokusu (chování kulek dopadajících na detektor, lapač, místa s největší pravděpodobností dopadu kulky při otevření jednotlivých otvorů a při otevření obou otvorů).

Dopadá nic nebo jedna celá kulka. Všechny kulky jsou stejně velké, jejich velikost nezáleží na tom, zda střílíme jednotlivé výstřely nebo dávkou.

Rozložení pravděpodobnosti pro jednotlivé otvory (druhý otvor je zavřený).



- Pokud je otevřený pouze otvor 1, dopadnou kulky s největší pravděpodobností do místa, které leží na přímce určené ústím samopalů a otvorem 1. Čím je vzdálenost od tohoto bodu menší, tím je menší i pravděpodobnost dopadu kulky. Rozložení pravděpodobností zachycuje modrá křivka  $P_1$ .
- Pokud je otevřený pouze otvor 2, dopadnou kulky s největší pravděpodobností do místa, které leží na přímce určené ústím samopalů a otvorem 2. Čím je vzdálenost od tohoto bodu menší, tím je menší i pravděpodobnost dopadu kulky. Rozložení pravděpodobností zachycuje zelená křivka  $P_2$ .

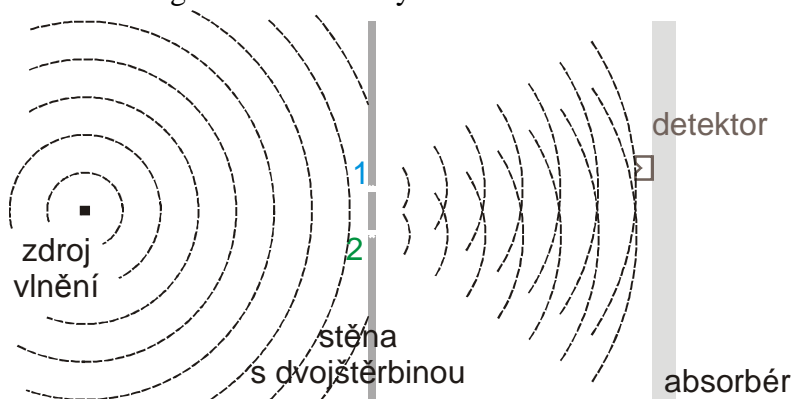
Pokud otevřeme obě štěrbinu, může kulka proletět k lapači buď přes otvor 1 nebo přes otvor 2, pravděpodobnost, že dopadne do určitého místa při otevření obou otvorů tak získáme jako součet pravděpodobností  $P_1$  a  $P_2$ :  $P_{1,2} = P_1 + P_2$  (pravděpodobnosti se sčítají).

### Pokus s vlnami (vlnění vodní hladiny)

Uspořádání experimentu:

- mělká nádrž s vodou,
- destička kmitající nahoru-dolů, vytvářející kruhové vlny na hladině,
- ocelová deska s dvěma otvory velikosti srovnatelné s vlnovou délkou vln,
- detektor (přístroj měřící výšku vln, okalibrovaný tak, aby výšku rovnou přepočítával na energii-druhou mocninu výšky),
- absorbér (písečná pláž, která neodráží vlny).

Měříme energii vlnění na různých místech za ocelovou deskou.

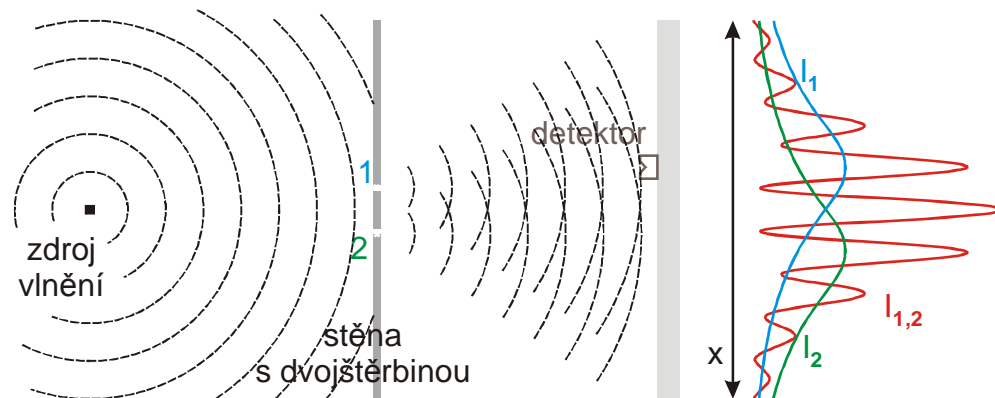


**Př. 2:** Odhadni výsledky pokusu (chování vln dopadajících na absorbér, místa absorbéru s největší intenzitou vlnění při otevřených otvorech, při otevřeném otvoru).

Energie vlnění se nešíří v celcích, ale spojitě. V závislosti na tom, jak intenzivně kmitá zdroj před deskou, se spojitě mění intenzita vlnění za deskou.

Vlna není lokalizována na jedno místo. Dopadá celou plochu absorbéru (je najednou v různých místech).

Měříme se stále stejnou intenzitou kmitání zdroje a sledujeme, jak se s polohou detektoru mění intenzita vlnění.



Podle Huygensova principu se obě štěrbinou stávají zdroji nového vlnění.

- Pokud je otevřen pouze otvor číslo 1, naměříme největší intenzitu vlnění za tímto otvorem, směrem od tohoto místa do obou stran intenzita klesá (modrá křivka  $I_1$ ).
- Pokud je otevřen pouze otvor číslo 2, naměříme největší intenzitu vlnění za tímto otvorem, směrem od tohoto místa do obou stran intenzita klesá (zelená křivka  $I_2$ ).

Pokud jsou otevřeny oba otvory, záleží na tom, jaký je ve zkoumaném místě fázový rozdíl obou vlnění:

- pokud se fázový rozdíl rovná sudému počtu půlvln, vlnění se sčítají (výsledná amplituda vlnění se rovná součtu amplitud obou vlnění),
- pokud se fázový rozdíl rovná lichému počtu půlvln, vlnění se odčítají (výsledná amplituda vlnění se rovná rozdílu amplitud obou vlnění).

Intenzita vlnění projevuje interferenci  $\Rightarrow$  neplatí  $I_{1,2} = I_1 + I_2$ .

**Dodatek:** Výsledná intenzita interferujících vlnění je rovna  $I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi$ , kde  $\varphi$  je fázový rozdíl v daném bodě..

### **Pokus s mikročásticemi (elektrony z rozžhaveného vlákna)**

Uspořádání experimentu:

- Elektronové děle - rozžhavené kovové vlákno, uzavřené v plechové krabici s otvorem (elektrony vylétající z vlákna jsou urychlovány k otvoru  $\Rightarrow$  vylétají z něj přibližně stejnou rychlostí),
- tenká ocelová deska s dvěma otvory velikosti vlnové délky elektronu (vše, otvory i jejich vzdálenost jsou velmi malé, srovnatelné s vlnovou délkou elektronu  $\Rightarrow$  takto se tento experiment provést zatím nedá),
- detektor (počítač elektronů – při jejich dopadu pípne),
- lapač (ocelová deska pohlcující elektrony, která dopadají mimo detektor).

Spustíme experiment:

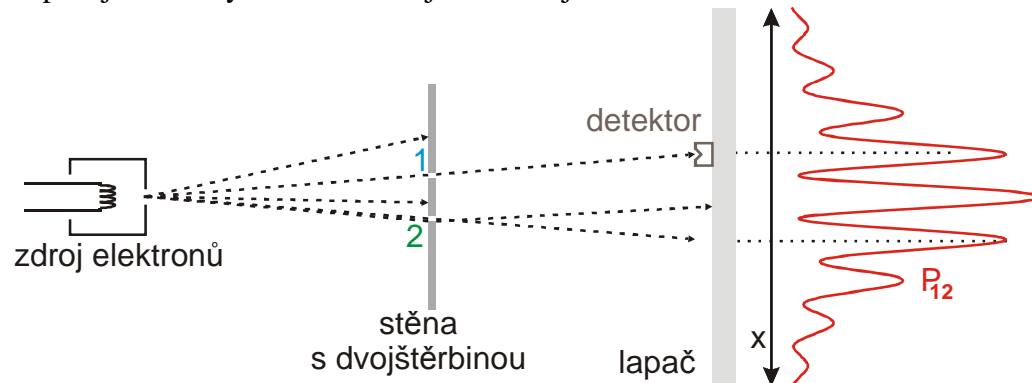
Vždy slyšíme stejná pípnutí  $\Rightarrow$  elektrony dopadají jako kulky v celcích.

Snížíme teplotu vlákna  $\Rightarrow$  počet pípnutí se snížil (slyšíme jich méně), ale jsou stále stejná  $\Rightarrow$  zmenšil se počet elektronů, které vylétají z vlákna, ale stále to jsou stejné elektrony jako před chvílí.

Použijeme druhý detektor  $\Rightarrow$  vždy pípne jenom v jedno z detektorů, nikdy ne oba najednou.

**Elektrony létají v nedělitelných celcích, dopadají na jedno konkrétní místo (jako kulky – částice).**

Necháváme detektor na různých místech a sledujeme pravděpodobnost s jakou elektrony dopadají do různých míst  $\Rightarrow$  stejná křivka jako u vln.



**Pravděpodobnost, že elektron dopadne za dvojštěrbinou na určité místo projevuje interferenci (jako vlny na vodě).**

Jde o jednu z ilustrací skutečnosti, že se elektron chová jako vlna-částice.

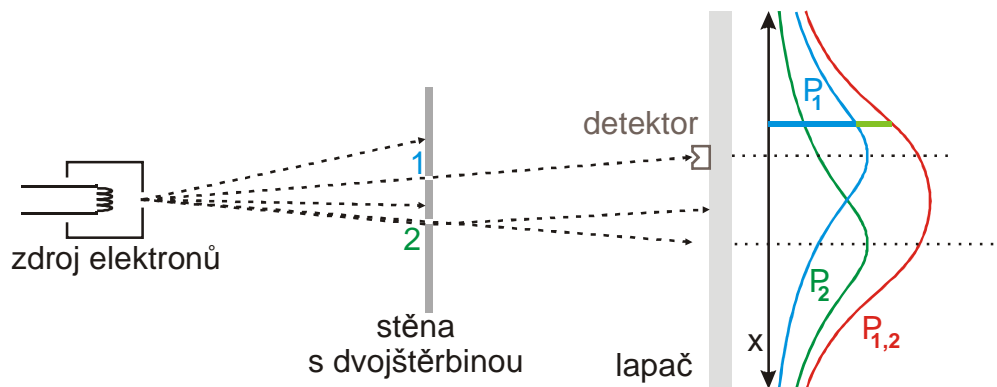
[Simulace](#) (vyžaduje ShockWave)

Jak je možné, že jsme nezískali stejnou křivku  $P_{1,2}$  jako u kulek? Jak mohou elektrony vytvořit interferenční obrazec?

Předpokládáme: „Elektron projde buď otvorem 1 nebo 2.“  $\Rightarrow$  Zakryjeme jeden z otvorů a měříme výsledky:

- Pro elektrony, které projdou otvorem 1, platí rozložení  $P_1$  (stejně, jako u kulek).
- Pro elektrony, které projdou otvorem 2, platí rozložení  $P_2$  (stejně, jako u kulek).

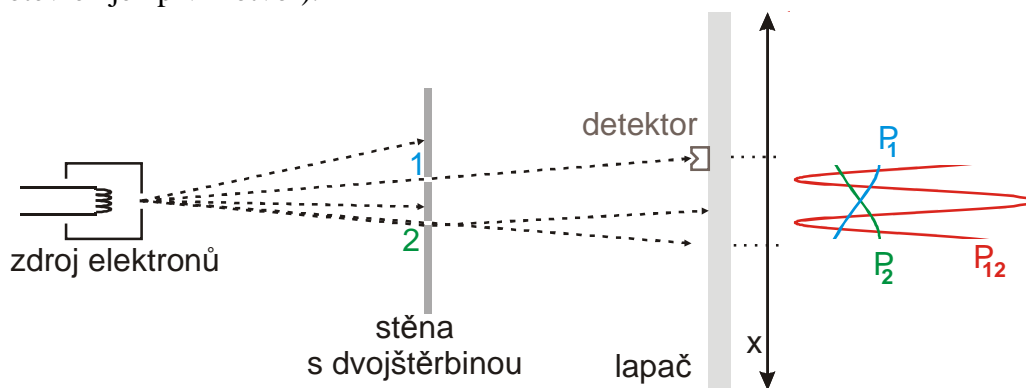
Všechny elektrony letí buď prvním nebo druhým otvorem  $\Rightarrow$  pokud známe rozložení při otevřeném otvoru 1 (křivka  $P_1$ ) a rozložení při otevřeném otvoru 2 (křivka  $P_2$ ) máme zaznamenané údaje o všech elektronech (nemohou letět jinudy než otvorem 1 nebo otvorem 2) a křivku  $P_{1,2}$  získáme v každém bodě jako součet křivek  $P_1$  a  $P_2$ .



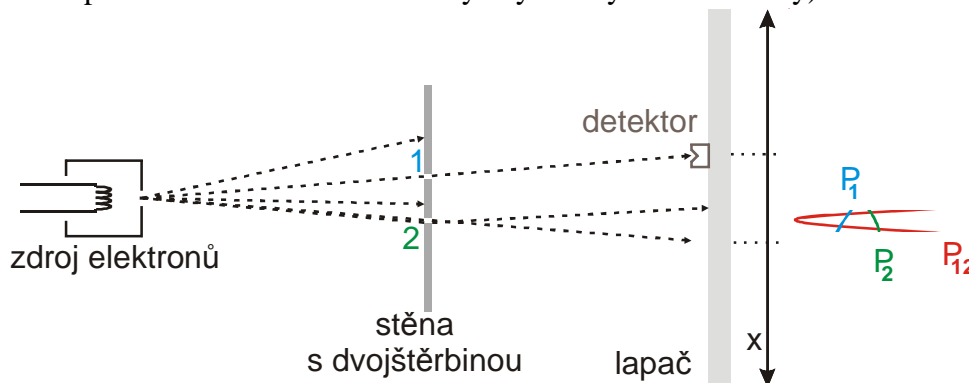
⇒ **Problém:** Získáme křivku  $P_{1,2}$ , která se shoduje s křivkou  $P_{1,2}$  pro pravděpodobnost dopadu kulky při otevření obou otvorů. ⇒ Způsob, jakým elektrony procházejí přes otvor 1, závisí na tom, zda je otevřen otvor 2.

Je možné najít jiné komplikovanější dráhy, kterými se elektrony dostávají přes dvojštěrbinu a vytvářejí interferenční obrazec, který nemůžeme odhalit zakrýváním otvorů? ⇒ problémy:

- Křivka  $P_{12}$  je ve středu vyšší než součet  $P_1 + P_2$  (⇒ otevřením druhého otvoru přinutíme, elektrony, aby létaly do takového místa prvním otvorem více než, když byl otevřen jen první otvor).



- V mnoha místech je hodnota křivky  $P_{12}$  nižší než hodnoty obou křivek pro jednotlivé otvory (⇒ otevřením druhého otvoru přinutíme elektrony, aby létaly do takového místa prvním otvorem méně než když byl druhý otvor zavřený).



Neexistuje žádná teorie, která by dokázala interferenční křivku vysvětlit pomocí složitých drah elektronů, které prolétají jenom jednou dírou.

Popsat křivku  $P_{12}$  matematicky je jednoduché, pouze je těžké přijmout, že elektron „pozná“, otevření obou otvorů a chová se podle něj (začne projevovat interferenci).

Zdá se, že není pravda: Elektron projde buď otvorem 1 nebo 2.

---

**Shrnutí:** Elektron při průchodu dvojštěrbinou projevuje interferenci.