

### 4.4.3 Jak to dělají vlnočástice

**Předpoklady:** 040402

**Pedagogická poznámka:** Následující dvě hodiny jsou pokusem přiblížit žákům alespoň částečně, jak moc je kvantová mechanika „divná“. Běžná učebnicová formulace – elektron má vlastnosti vlny i částice, totiž pro žáky nic divného neznamena. Cílem hodiny není, aby žáci dokázali kreslit interferenční obrazce elektronu na dvojštěrbíně, jde o to, aby si uvědomili, že na této úrovni jsou věci doopravdy dost odlišné než jsou zvyklí.

Věci v mikrosvětě se chovají divně:

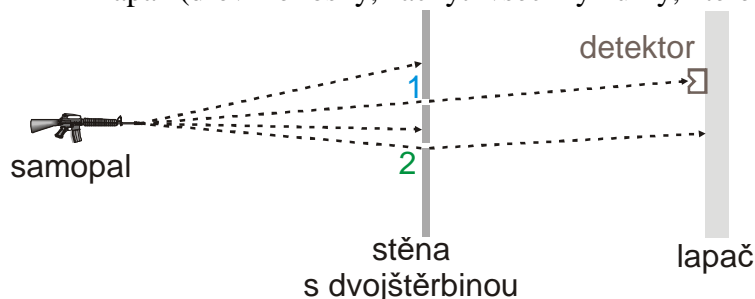
- světlo, které jsme měli za vlnění, se někdy chová jako částice,
- elektron, který jsme měli za částici, se někdy chová jako vlna.

Obecně řešené to nevypadá zdaleka tak divně, jak to ve skutečnosti je. Zkusíme si divnost přiblížit na myšlenkovém pokusu (který provedeme s klasickou částicí, vlnou a poté mikročásticí, která má obojí vlastnosti).

#### **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).



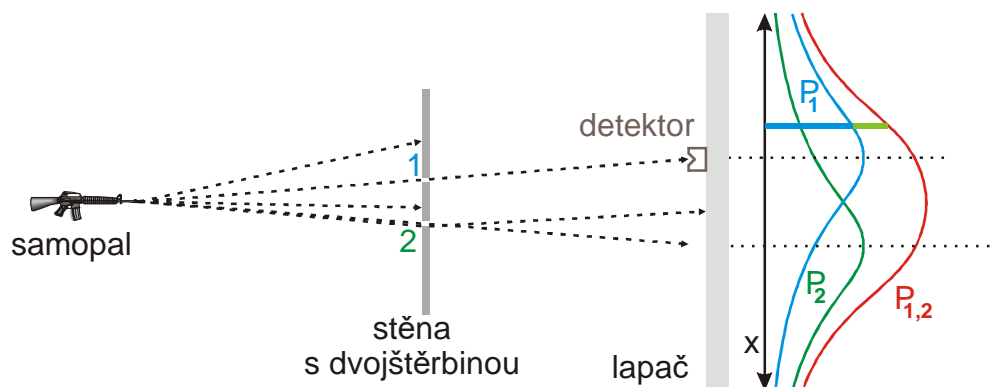
Měříme pravděpodobnost (nevíme, kam která kulka poletí), že kulka, která proletí libovolným otvorem v desce, dopadne do bodu  $x$  (místo, kde máme detektor)  $\Rightarrow$  stačí chvíli střílet a spočítat poměr mezi kulkami v desce a v krabici. Posunování detektoru naměříme tuto pravděpodobnost pro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

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

#### **Výsledky**

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).

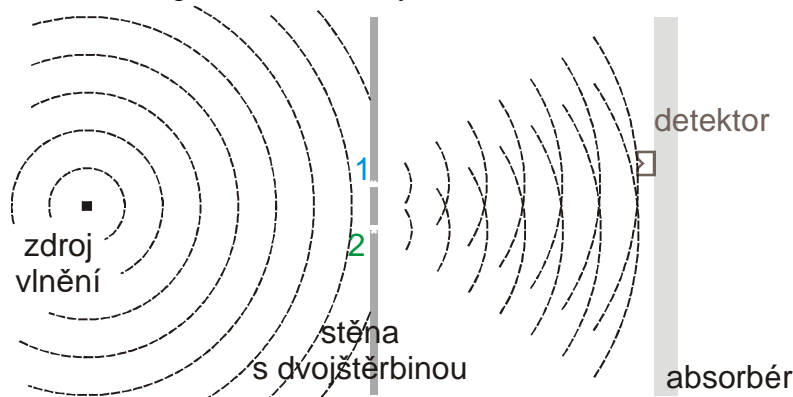
Na výsledcích není nic překvapivého.

### 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.

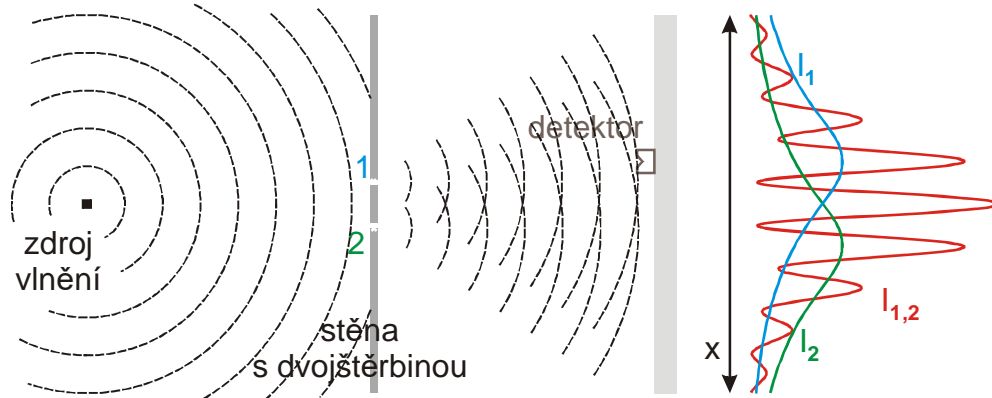


### Výsledky

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.



- 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 vlny od obou otvorů v místě potkají se stejnou výchylkou, vlnění se sčítají (výsledná amplituda vlnění se rovná součtu amplitud obou vlnění),
- pokud se vlny od obou otvorů v místě potkají s opačnou výchylkou, vlnění se odčítají (výsledná amplituda vlnění se rovná rozdílu amplitud obou vlnění).

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

Opět nic překvapivého, stejné výsledky jako když jsme poslouchali sinusový pazvuk ze dvou reproduktorů.

### **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),
- detektor (počítač elektronů – při jejich dopadu pípne),
- lapač (ocelová deska pohlcující elektrony, která dopadají mimo detektor).

Výsledky:

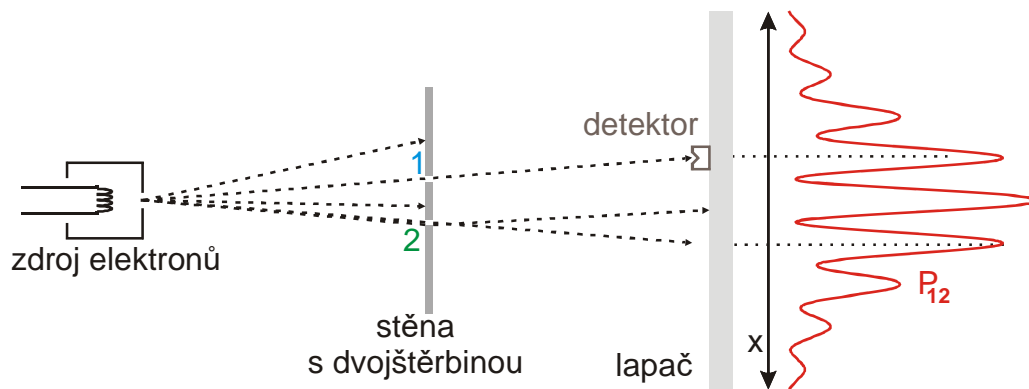
Vždy slyšíme stejná pípnutí  $\Rightarrow$  elektrony dopadají jako kulky v celcích.

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 (zatím se chovají jako spořádané 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 dvojtěrbinou na určité místo projevuje interferenci (jako vlny na vodě).**

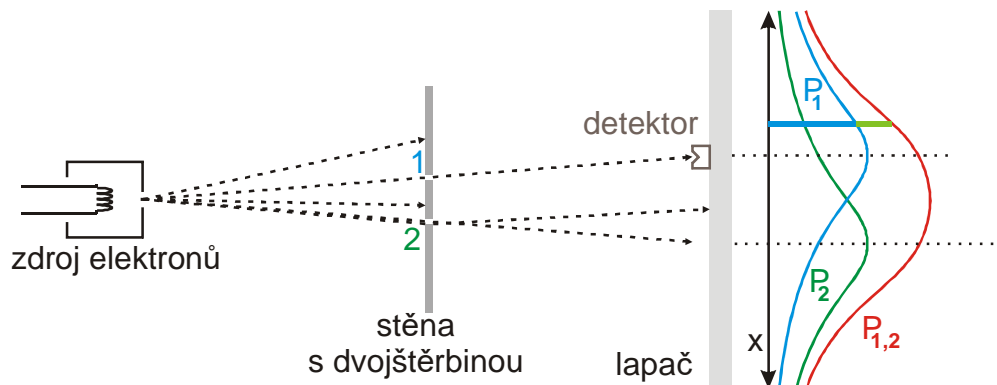
Jde o jednu z ilustrací skutečnosti, že se elektron chová jako vlna-částice a začíná to být divné.

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  $P_2$ .



$\Rightarrow$  **Problém:** Získáme křivku  $P_{1,2}$ , která se shoduje s křivkou  $P_{1,2}$  pro pravděpodobnost dopadu kulky při otevření obou otvorů (a liší se od křivky, kterou jsme elektronům naměřili, když byly otevřené obě díry).  $\Rightarrow$  Způsob, jakým elektrony procházejí přes otvor 1, závisí na tom, zda je otevřen otvor 2.

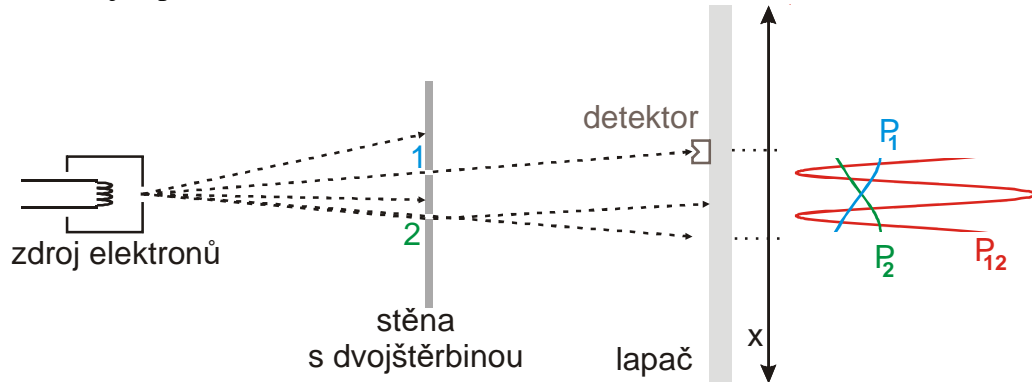
**Škoda, je to ještě divnější než před chvílí.**

Je možné najít jiné komplikovanější dráhy, kterými se elektrony dostávají přes dvojtěrbinu a vytvářejí interferenční obrazec, který nemůžeme odhalit zakrýváním otvorů?  $\Rightarrow$

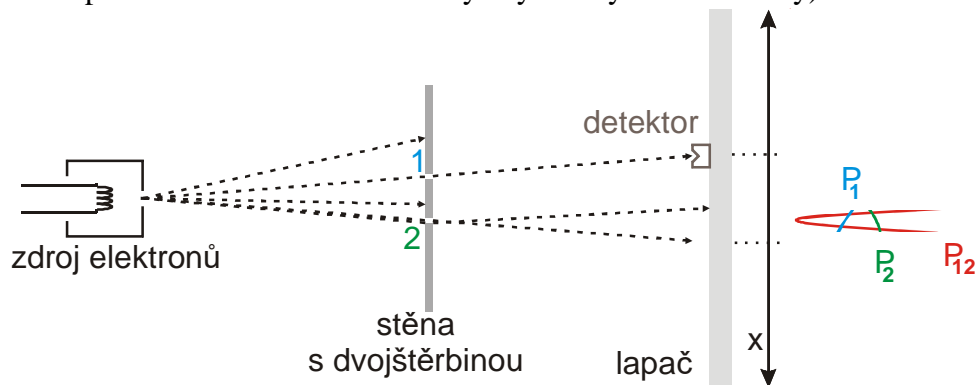
Problémy:

- Křivka  $P_{1,2}$  je ve středu vyšší než součet  $P_1 + P_2$  ( $\Rightarrow$  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 ( $\Rightarrow$  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).

### Sledování elektronů

Nápad: Světlo se rozptyluje na elektronech  $\Rightarrow$  můžeme zezadu svítit na dvojtěrbinu. Když přes ní elektron projde, světlo se na něm rozptýlí a budeme moci určit, kterým otvorem elektron prošel.

Potřebujeme:

- krátkou vlnovou délku světla (kvůli rozlišovací schopnosti),
- dostatečnou intenzitu světla (v každém okamžiku se u dvojtěrbiny musí nacházet foton).

Výsledky:

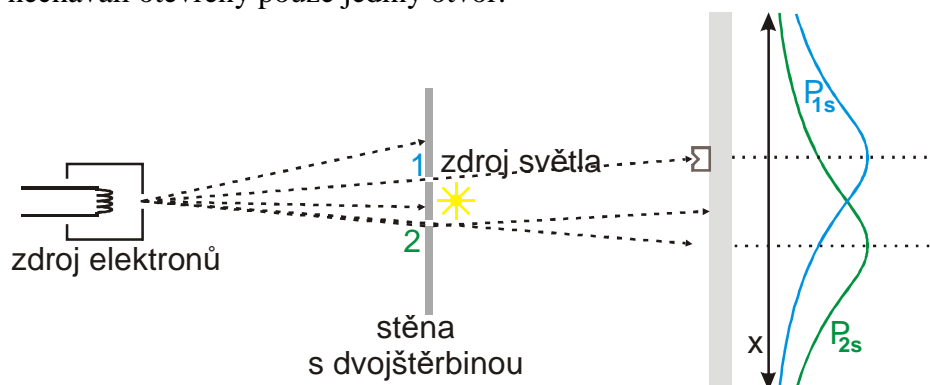
Vždy, když detektor zachytí elektron, uvidíme záblesk buď v blízkosti otvoru 1 nebo v blízkosti otvoru 2, nikdy se nezableskne u obou otvorů současně  $\Rightarrow$  zdá se, že platí předpoklad (kterého jsme se už vzdali), že elektron letí buď otvorem 1 nebo otvorem 2.

Jak tedy dochází k interferenci?

U každého zachyceného elektronu budeme zapisovat, zda se zablesklo (a on tedy prošel) otvorem 1 nebo otvorem 2  $\Rightarrow$  získáme křivky, které zachycují pravděpodobnost dopadu

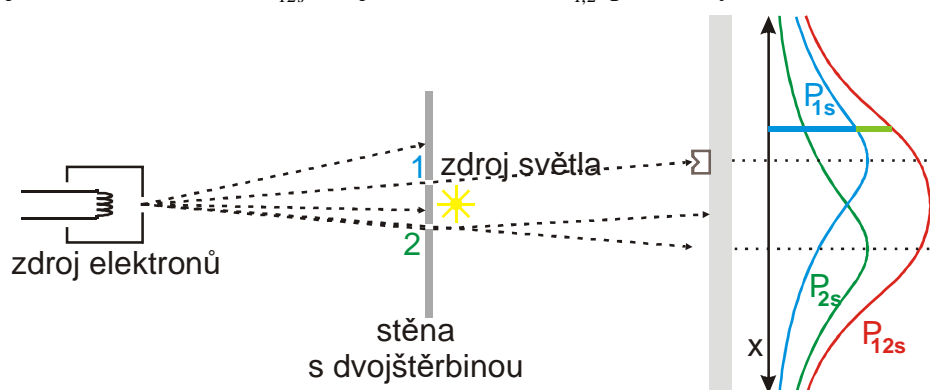
elektronu při otevření obou otvorů pro elektrony, které prošly otvorem 1 (křivka  $P_{1s}$ ) nebo otvorem 2 (křivka  $P_{2s}$ ).

Křivky jsou naprosto stejné jako křivky  $P_1$  a  $P_2$ , které jsme získali, když jsme bez světla nechávali otevřený pouze jediný otvor.



Jak vypadá křivka  $P_{12s}$  pro celkovou pravděpodobnost?

Stačí dát oba částečné výsledky dohromady (žádný elektron neprošel jinudy než jedním z obou otvorů a u všech tedy známe místo dopadu)  $\Rightarrow$  pro osvětlené (a odhalené) elektrony jsme získali křivku  $P_{12s}$ , stejnou s křivkou  $P_{1,2}$  pro kulky.



Čím více zkoumáme chování elektronu, tím je to horší. Nejenže pravděpodobnost dopadu vykazuje interferenci, ale:

- složením pravděpodobností při samostatně otevřených dírách nezískáme stejný obrazec jako při obou otevřených dírách,
- ale přesto, když svítíme zjistíme, že elektrony procházejí jen dírami, ale neutvoří interferenci.

Závěr: Elektrony tedy procházejí přes dvojtěrbinu jinak, když je sledujeme, když je nesledujeme.

Jak je možné, že se osvětlené elektrony chovají jinak než elektrony, které nesledujeme? Srážka elektronu s fotonem zřejmě ovlivní další směřování elektronu a tedy i místo, kam dopadne.

Jak vliv světla zmenšit?

### Zmenšení intenzity

Postupně zmenšujeme intenzitu osvětlení (počet fotonů)  $\Rightarrow$  záblesky na odhalených elektronech se nemění, stále mají stejnou intenzitu, ale postupně přibývá elektronů, které dopadnou na detektor, aniž by způsobily záblesk (snížením intenzity světla jsme snížili počet

fotonů, pokud jich je příliš málo, může se stát, že v okamžiku, kdy elektron prochází otvorem, se poblíž nenachází žádný foton, který by se mohl na elektronu rozptýlit. U těchto elektronů nezjistíme, kterým otvorem prošly).

Můžeme rozdělit elektrony do tří skupin:

- Elektrony, které prošly otvorem 1 (rozdělení pravděpodobnosti  $P_{1s}$ ),
- Elektrony, které prošly otvorem 2 (rozdělení pravděpodobnosti  $P_{2s}$ ),
- Elektrony, které jsme nezachytili a u kterých nevíme, jak prošly dvojštěrbinou (rozdělení pravděpodobností  $P_{12}$ , tedy stejné jako u elektronů, které procházejí dvojštěrbinou, na kterou nesvítíme).

S příčinami interference jsme se nedostali jsme se ani o krůček dál:

- u elektronů, které rozptýlily světlo (o víme o nich, kudy prošly dvojštěrbinou), interference nenastává,
- u elektronů, které světlo nerozptýlily (a nevíme o nich, jak dvojštěrbinou prošly), interferenci pozorujeme (ale nevíme, jak k ní dochází).

### Zvětšení vlnové délky

Energie fotonů souvisí s jejich vlnovou délkou  $\Rightarrow$  zkusíme prodlužovat vlnovou délku světla (větší vlnová délka  $\Rightarrow$  menší energie světla  $\Rightarrow$  menší ovlivnění elektronu).

Prodlužování vlnové délky  $\Rightarrow$  rozmazávání záblesku (velikost detailů, které můžeme rozlišit odpovídá vlnové délce), výsledky beze změny (interference se neprojevuje).

Ve chvíli, kdy se záblesk rozmaže natolik, že přestaneme být schopni rozlišit, kterým otvorem elektron proletěl, se začne měnit rozložení pravděpodobnosti (začne se objevovat interference).

Křivku  $P_{12}$  získáme až ve chvíli, kdy vlnová délka světla bude daleko větší než vzdálenost mezi otvory (a když už nebudeme mít žádnou šanci zjistit, kterým otvorem elektron proletěl).

$\Rightarrow$  Není možné nastavit světlo takovým způsobem, abychom určili, kterým otvorem elektron letěl a zároveň zůstala zachována interference v rozložení pravděpodobnosti.

**Heisenbergův princip neurčitosti** (chrání interferenci v kvantové mechanice) pro náš pokus: Nelze sestavit takové zařízení, abychom dokázali určit, kterým otvorem elektron proletěl a zároveň se neporušil interferenční obraz.

**Shrnutí:** Vlnové vlastnosti částí jsou pěkně divné – elektrony vykazují interferenci jen, když nesledujeme, kterou dírou projdou.