

Dvojštěrbina

Kvantové objekty jako jsou fotony, elektrony a další, vykazují vlastnosti, které jsou v některých případech podobné vlastnostem vlnění, v jiných případech ale odpovídají vlastnostem klasických kuliček (hmotných bodů, „korpusek“). Oboje tyto vlastnosti, „vlnové“ i „korpusekulární“, se projevují například při dvojštěrbinovém experimentu.

Pozn.: V mnoha situacích ale chování fotonů, elektronů apod. neodpovídá ani vlnám, ani kuličkám. Je jiné, pro nás nezvyklé. Podstatné je, že kvantová fyzika ho umí popsat pomocí vzorců extrémně přesně.

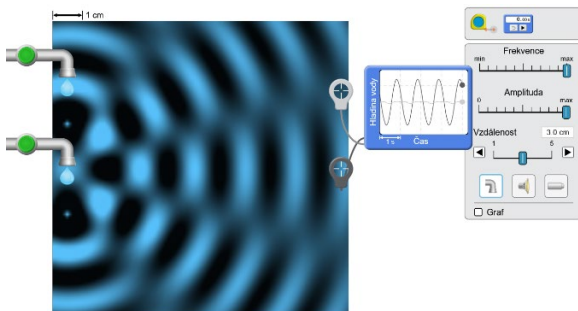
Dvojštěrbinový experiment s vlnami a kuličkami

Nejprve si ukážeme dvojštěrbinový experiment s klasickými objekty – **vlněním** (např. mechanickým vlněním na vodní hladině nebo zvukem) a **klasickými kuličkami** (hmotnými body). Výsledky experimentu s těmito dvěma klasickými modely použijeme pro porovnání s chováním **kvantových objektů** (elektronů).

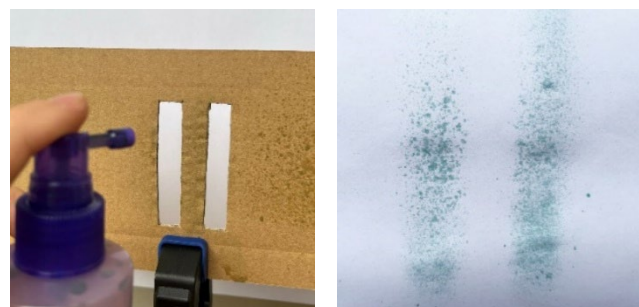
Studenti odhadnou, jaký obrazec vznikne na stínítku v případě, že na stínítko skrz dvojštěrbinu dopadá vlnění, resp. klasické kuličky. Jejich odhad ověříme dvěma jednoduchými ukázkami:

- **Vlnění** – PhET aplet [1] znázorňující interferenci vln na vodní hladině nebo analogické video reálné vodní hladiny [2], stopáž 4:45–5:20. Vlnění dopadá na celé stínítko. Obrazec je tvořen střídáním míst s velkou a malou intenzitou vlnění, hovoříme o tzv. interferenčních prouzcích.
- **Klasické kuličky** – skrz dvojštěrbinu vystříženou z kartonu stříkneme rozprašovačem s obarvenou vodou na stínítko (tabuli či list papíru). Vodní kapičky představují klasické kuličky. Jednotlivá kapička vody dopadá na jedno konkrétní místo. Obrazec na stínítku je tvořen dvěma pruhy, každý z nich se skládá z bodových stop po jednotlivých kuličkách. K interferenci tedy nedochází.

Simulace interference vln na vodní hladině (PhET) [1].



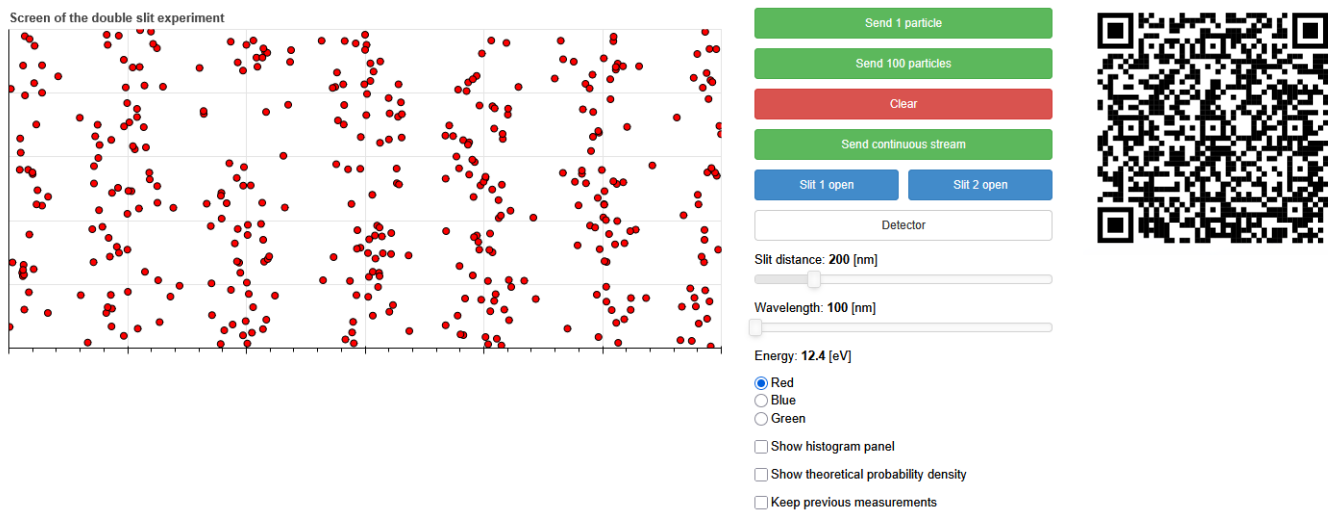
Kartonová dvojštěrbina



Dvojštěrbinový experiment s elektrony

Dvojštěrbinový experiment s elektrony znázorňuje simulace [3]. V levé části zobrazuje stínítko, kam skrz dvojštěrbinu dopadají elektrony. V pravé části je ovládací panel, pomocí nějž můžeme elektrony posílat na stínítko, nastavovat jejich energii (resp. vlnovou délku) a vzdálenost štěrbin. Pro pokročilejší zkoumání chování kvantových objektů aplet umožňuje nastavit, které z obou štěrbin jsou otevřené, a také zapnutí detektoru, který zjišťuje, kterou štěrbinou daný elektron prošel. Aplet také může zobrazit hustotu pravděpodobnosti dopadu elektronu na konkrétní místo na stínítku.

Aplet zobrazující dvojštěrbinový experiment s elektrony [3].



Jak pracovat s apletem:

Studenti pracují s apletem podle níže uvedených návodných otázek, které je vedou k uvědomění si podobností mezi chováním elektronů a chováním klasických kuliček a vlnění. Všimají si také náhodného chování elektronů, které je dáno rozdělením pravděpodobnosti.

Otázky:

- 1) Vystřelte na stínítko několik elektronů.
 - a) Jak vypadá stopa po jednom elektronu?
 - b) Umíte předpovědět, kam dopadne další elektron?
- 2) Vystřelte na stínítko velké množství elektronů (např. 700–1000).
Na kterých místech stínítko je velká pravděpodobnost, že tam dopadne další vystřelený elektron?

- 3) Načrtněte obrazec, který jste dostali na stínítku a slovně popište, jak vypadá.
- 4) V čem je obrazec vytvořený elektrony podobný obrazci vytvořenému a) kuličkami, b) vodními vlnami?

Fotony a dvojštěrbina

Dvojštěrbinový experiment s fotony lze ukázat pomocí laseru a dvojštěrbiny. Pozorujeme interferenční proužky. Pokud bychom dvojštěrbinou posílali jednotlivé fotony, viděli bychom, že podobně jako elektron také foton dopadá na jedno konkrétní místo. Kdybychom světelný interferenční obrazec dostatečně zvětšili, skládal by se z bodových stop po jednotlivých fotonech, ačkoli pouhým okem proužky vidíme souvislé.

Závěr

Dopad jednoho elektronu či fotonu na stínítko odpovídá chování kuličky – dopadají na jedno konkrétní místo, nikoli na celé stínítko. Pokud si ale uděláme záznam, kam dopadlo mnoho elektronů, dostaneme interferenční obrazec, který je ale typický pro vlny.

Pozor – často se objevuje názor, že vlnové chování elektronů souvisí s tím, že jich posíláme mnoho zároveň (svazek). Úplně stejné výsledky ale dostaneme i v případě, že budeme aparaturou posílat jednotlivé elektrony.

Odkazy

[1] University of Colorado Boulder. *PhET interactive simulations: Interference vln*. https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_all.html?locale=cs

[2] Veritasium. *The original double slit experiment*. <https://www.youtube.com/watch?v=luv6hY6zsd0&t=257s>

[3] Legerská, J. (2024). *Aplet zobrazující dvojštěrbinový experiment s elektrony*. Fyzweb. https://fyzweb.cz/materialy/kvantovka/Double_slit_experiment.html