

Testování bomby pomocí kvantové mechaniky

F. Švarc, gymnázium Arabská, filip.svarc777@gmail.com

J. Filip, SPŠE Havířov, jakub.k.filip@gmail.com

J. Hladíková, AGYS Pardubice, hladikovajana212@gmail.com

J. Olejárová, Evanjelické gymnázium Banská Bystrica,
olejarova96@gmail.com

Abstrakt

V tomto projektu jsme se zabývali hypotetickým problémem, ve kterém máme umístěnou extrémně citlivou bombu, která vybuchne při dopadu jen jednoho fotonu a máme zjistit, zda je bomba aktivní, nebo ne. Z pohledu klasické mechaniky je toto neřešitelný problém, ale my s pomocí kvantových vlastností částic to dokážeme určit.

1. Úvod

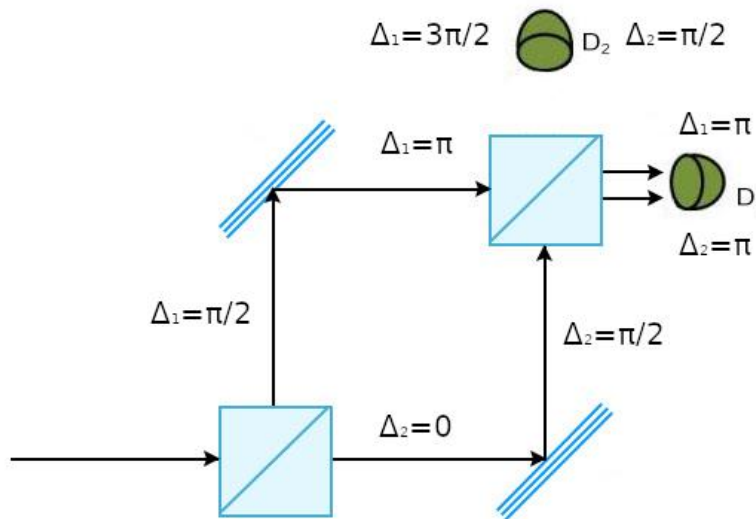
Světlo se chová jako vlnění, toto platí i v případě, že zkoumáme vlastnosti jen jednoho fotonu. Tato vlastnost světla (a všech dalších elementárních částic) se nazývá vlnově částicová dualita. Toto budeme využívat společně s kvantovými vlastnostmi částic.

Kvantová mechanika, jak je známá dnes, je postavena na náhodnostech výsledků měření, to znamená, že je nemožné přesně předpovědět výsledek jednoho měření a je jen možné určit pravděpodobnosti určitých výsledků měření. Tento výsledek se pak náhodně vybere při změření vlastnosti, nebo stavu částice. Předtím, než se proběhne měření se částice nachází ve stavu superpozice, toto je stav, při kterém se daný objekt chová, jako by byl ve všech možných stavech najednou. Z toho vyplývá, že v mikrosvětě akt měření, nebo-li interakce (měřením vždy interagujeme s částicí) mění stav, ve kterém se částice nachází. V našem experimentu budeme využívat právě superpozice fotonu k testu bomby.

2. Metody a výpočty

Interferometr

K vizualizaci celého projektu jsme využili interferometr, přístroj, který funguje na principu interference, kdy slučováním dvou nebo více vln vzniká interferenční obrazec, který lze použít k extrakci informací o původních vlnách. Konkrétně jsme použili Mach-Zehnderův interferometr, který měří relativní fázový posun mezi dvěma kolimovanými světelnými paprsky. Jedná se také o amplitudový interferometr s dělením paprsku a se dvěma zrcadly (dokonalé a polopropustné).



Koherentní paprsek je rozdělen napůl polopropustným zrcadlem. Oba výsledné paprsky ("vzorkový paprsek" a "referenční paprsek") jsou každý odraženy dokonalým zrcadlem. Dva paprsky pak projdou druhým napůl polopropustným zrcadlem a vstoupí do dvou detektorů. Interference je způsobena sčítáním amplitud dvou koherentních vln. Zařízení Mach-Zehnder produkuje dva „výstupy“: jeden paralelní se vstupujícím paprskem a druhý ortogonální na něj. Podíváme-li se pozorně na paralelní výstup, můžeme vidět, že dva paprsky dorazí ve fázi po dvou odrazech, přičemž oba mají fázový posun π vlnové délky, čímž pádem není mezi nimi fázový rozdíl a konstruktivně interferují. V případě ortogonálních existuje jeden paprsek po třech odrazech a druhý po jediném odrazu. V důsledku toho je mezi paprsky fázový posun π , což způsobuje destruktivní interferenci.

Kvantový popis

Oproti klasické mechanice, kde jsme do interferometru vysílali klasické koherentní světlo, vysíláme do interferometru jednotlivé fotony. Detektory tedy nezaznamenávají intenzitu záření, ale zaznamenávají dopady jednotlivých fotonů. Intenzitu neboli amplitudu klasické vlny, nám nahradila pravděpodobnostní vlna, která nám určuje pravděpodobnost dopadu fotonu na detektory.

V interferometru vznikají 2 stavy, které jsou: foton se šíří doprava: $|\rightarrow\rangle$, foton se šíří nahoru: $|\uparrow\rangle$ (zapsáno vektorem). Vzniká tak stav superpozice, který je spojením obou stavů do doby, dokud nedojde k měření. Například pravdivostní vlna superpozice dvou stavů: $|\psi\rangle = a|\uparrow\rangle + b|\rightarrow\rangle$, kde a, b představují amplitudu pravděpodobnosti nalezení fotonu v příslušném stavu. Pravděpodobnost daného výsledku je pak $W_{\uparrow} \sim |a|^2$ a $W_{\rightarrow} \sim |b|^2$

Při odrazu fotonu dochází k změně stavu a fázovému posunu o $\frac{\pi}{2}$ (zapsáno jako: $e^{i\frac{\pi}{2}}$ nebo $\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) + i \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)$)

Při vstupu na dělič dochází ke vzniku superpozice dvou stavů a změně amplitudy pravděpodobnosti: $|\uparrow\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle + i|\rightarrow\rangle)$ a $|\rightarrow\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (|\rightarrow\rangle + i|\uparrow\rangle)$

Výpočet pravděpodobnostní vlny v interferometru v případě nefunkční bomby:

1. Vstupní stav: $|\psi_0\rangle = |\uparrow\rangle$
2. Dělič: $|\psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle + i|\rightarrow\rangle)$
3. Zrcadla: $|\psi_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (i|\rightarrow\rangle - |\uparrow\rangle)$
4. Dělič:

$$|\psi_3\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(i \frac{1}{\sqrt{2}} (|\rightarrow\rangle + i|\uparrow\rangle) - \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle + i|\rightarrow\rangle) \right) = |\rightarrow\rangle \left(\frac{i}{2} - \frac{i}{2} \right) + |\uparrow\rangle \left(-\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right) = -|\uparrow\rangle$$

záporné znaménko je pak ve výpočtu pravděpodobnosti stavu $|\uparrow\rangle$ odstraněno:
 $W_{\uparrow} = |-1|^2$

Výpočet pravděpodobnostní vlny v interferometru v případě funkční bomby:

1. Vstupní stav: $|\psi_0\rangle = |\uparrow\rangle$
2. Dělič: $|\psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle + i|\rightarrow\rangle)$, ve stavu $|\uparrow\rangle$ dopadá foton na bombu, tedy pravděpodobnost tohoto stavu je $W_B = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right|^2 = \frac{1}{4}$, pro další výpočty stav $|\uparrow\rangle$ neexistuje.
3. Zrcadla: $|\psi_2\rangle = -\frac{1}{\sqrt{2}} |\uparrow\rangle$, dochází k odrazu pouze jediného stavu

4. Dělič: $|\psi_3\rangle = -\frac{1}{2} (|\uparrow\rangle + i|\rightarrow\rangle)$, následný výpočet pravděpodobnosti: $W_{\rightarrow} = \left| -i \frac{1}{2} \right|^2 = \frac{1}{4}$ a $W_{\uparrow} = \left| -\frac{1}{2} \right|^2 = \frac{1}{4}$

3. Výsledky a diskuze

Výsledky sme si rozoberali na teoretickom Mach-Zehnderovom modeli a za pomoci quantum flytrap. Za púšťania jedného fotónu sme sledovali, čo sa bude diať. Snažili sme sa dôjsť k záveru, ako zistíme, kedy je bomba aktívna, a kedy nie.

V prvom teoretickom pozorovaní sme používali klasicky Mach-Zehnderov model, kde sa bomba nachádzala pri dokonalom zrkadle. Na základe výpočtu pravdepodobnosti v kapitole 2. Metódy a výpočty v Kvantovom opise, sme zistili, že sa fotón zachytil na Detektore 1, a teda, že bomba nie je aktívna, čo znamená, že jej prítomnosť neovplyvnila zmenu pravdepodobnosti pozície fotónu.

V ďalšom pozorovaní sme z interferometru vynechali jednu časť, vďaka čomu sa zmenila pravdepodobnosť pozície fotónu. Zistili sme, že funkčná bomba funguje ako detektor fotónov, a to tak, že pri prvom dokonalom zrkadle má foton 1/2 pravdepodobnosť, že sa odrazí alebo, že dopadne na spúšťač a bomba vybuchne. Na druhom poloprepustnom zrkadle už k interferencii nedochádza, a tak s pravdepodobnosťou 1/4 dopadne foton na Detektor 1 (podobne ako pri nefungujúcej bombe) alebo dopadne na Detektor 2 (čo sa v prípade nefungujúcej/neaktívnej bomby nedeje).

Pokiaľ fotón dopadne na D2 vieme, že bomba je aktívna, bez toho aby musela vybuchnúť a pravdepodobnosť úspechu je 1/4, ako môžeme vidieť v druhom výpočte kvantového opisu v kapitole 2 Metódy a výpočty.

4. Závěr

V projekte jsme se dozvěděli řešení úvodního problému a potřebné teoretické znalosti o interferenci světla a kvantové mechanice k tomu. Také jsme si interferenci světla ověřili za pomoci teoretických výpočtů změny fáze vlnění. Další způsob ověření byl za pomoci počítačového programu quantumflytrap, ve které jsme si simulovali interferometr a i experiment s bombou.

Poděkování

Rádi bychom poděkovali všem organizátorům týdne vědy, za vytvoření této akce a především doc. Ing. Martinovi Štefaňákovi za výborné vedení projektu a srozumitelné vysvětlení teorie.

Reference

[1] quantumflytrap - oficiální webové stránky, URL: <https://lab.quantumflytrap.com> [cit. 2024-06-18]