

OBRÁZEK 1. Machův-Zehnderův interferometr.

#### PŘÍKLAD KVANTOVÉHO CHOVÁNÍ

Následující příklad ilustruje zvláštní chování světla, které nejen odporuje klasické představě o jeho vlnovém charakteru, ale vyvolává mnohem hlubší pochybnosti ohledně vztahu mezi teoretickým popisem, měřením a fyzikální realitou. Zařízení je vyobrazeno na Obrázku 1.

$A$  a  $B$  jsou polopropustná zrcadla, kterými polovina dopadajícího paprsku projde a polovina se odrazí. Takové zrcadlo je jednoduše skleněná destička, na kterou je z jedné strany nanesena vrstva nějaké látky, např. hliníku, v příslušné tloušťce.  $U$  a  $L$  jsou obyčejná zrcadla (v experimentu slouží jen k usměrnění paprsku, samotný efekt na nich nezáleží). Čísla 1 až 4 označují pozice detektorů (rozumí se, že pokud chceme, aby světlo dorazilo k zrcadlu  $B$ , musíme detektory 1 a 2 odstranit).

Světlo, které se odráží od nějaké plochy, mění svou fázi v závislosti na tom, jestli se odráží od prostředí s menší, nebo větší optickou hustotou (odpovídající rychlosti světla v daném prostředí). Pokud se světlo odráží od opticky hustšího prostředí, mění svou fázi o  $\pi$  (což odpovídá posunu o polovinu vlnové délky); pokud se odráží od opticky řidšího prostředí, fáze se nemění. (Průchod světla sklem navíc posune fázi o malou hodnotu  $\varphi$ , která je pro pokus nepodstatná a můžeme ji zanedbat.)

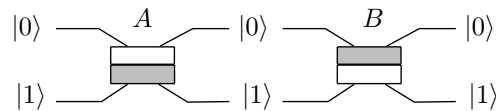
Pro průchod světla existují celkem čtyři možnosti:  $A-U-B-3$ ,  $A-U-B-4$ ,  $A-L-B-3$  a  $A-L-B-4$ . Měříme-li intenzitu světla na detektoru 1 nebo 2, naměříme v obou případech polovinu vstupní intenzity, v souladu s předpokládanými vlastnostmi zrcadla. Měření na detektorech 3 a 4 (po odstranění detektorů 1 a 2) ukazuje, že na detektoru 3 není žádný signál, pouze na detektoru 4. To je způsobeno interferencí světla. Světlo putující po dráze  $A-U-B-3$  se destruktivní interferencí zruší se světlem putujícím po dráze  $A-L-B-3$ , protože první paprsek je vůči druhému posunut o polovinu fáze kvůli odrazu na zrcadle  $A$ . Mezi paprsky  $A-U-B-4$  a  $A-L-B-4$  dochází naopak ke konstruktivní interferenci, protože se oba odrazily dvakrát.

To je klasický vlnový popis experimentu. Je-li ovšem energie světla snížena na určité množství (tedy určité *kvantum* označované proslulým slovem *foton*), světlo se začne chovat jako částice v tom smyslu, že signál je zachycen buď na detektoru

1, nebo na detektoru 2, rozdělení na dvě poloviční detekce je vyloučeno. Pravděpodobnost obou možností je shodně jedna polovina. To na první pohled rehabilituje starou představu o světle jako proudu částic. Klasický výsledek měření je tak možno interpretovat jako skutečnost, že polovina fotonů prochází a polovina se odrazí. Takováto interpretace by však vyžadovala, aby se foton, bez ohledu na svou dráhu, choval stejně i na zrcadle  $B$ . Každá ze čtyř drah by pak měla stejnou, čtvrtinovou pravděpodobnost, a detektory 3 a 4 by měly zachytit signál oba s pravděpodobností jedna polovina (podobně jako detektory 1 a 2). Experiment ovšem dopadá stejně jako v klasickém případě: žádný signál na detektoru 3, vždy na detektoru 4.

Tento záhadný jev je příkladem toho, proč se mluví o vlnově-korpuskulárním charakteru světla: chová se částečně jako vlna a částečně jako částice. Problém je ale hlubší. Jak může foton, který je vždy zachycen pouze na jedné dráze (pokud se rozhodneme měřit na 1 nebo 2), interferovat jaksi sám se sebou, pokud měření odložíme?

Ukážeme odpověď kvantové mechaniky. Pro větší názornost zapomeneme na obyčejná zrcadla a zobrazíme si zrcadla  $A$  a  $B$  schematicky takto:



Symbole  $|0\rangle$  a  $|1\rangle$  označují stav fotonu ve třech okamžicích pokusu. Uvedeme-li schéma do souvislosti s podrobnějším Obrázkem 1, je na začátku experimentu foton ve stavu  $|0\rangle$ . Po interakci se zrcadlem  $A$  řekneme, že je foton ve stavu  $|0\rangle$ , pokud putuje přes zrcadlo  $U$ , a po interakci se zrcadlem  $B$  je ve stavu  $|0\rangle$ , pokud směřuje k detektoru 3. Podobně pro stavy  $|1\rangle$ .

Základem kvantového popisu experimentu je předpoklad, že foton může být v *superpozici* stavů, která je matematicky vyjádřena jejich lineární kombinací. Foton se tedy sice nerozdělil, ale je ve stavu, který jakési rozdělení naznačuje. Po průchodu zrcadlem  $A$  je ve stavu

$$\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}.$$

(Součet dělíme  $\sqrt{2}$  proto, že chceme pracovat s vektory normy jedna.) Pokud by foton přicházel do zrcadla ve stavu  $|1\rangle$ , tedy zespodu, přešel by do stavu

$$\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}.$$

Opět by se tedy jaksi částečně odrazil (zpět do stavu  $|1\rangle$ ) a částečně zrcadlem prošel (do stavu  $|0\rangle$ ). V tomto případě by ovšem při odrazu došlo k fázovému posunu, což vyjadřuje koeficient  $-1 = e^{\pi i}$ . Celkově lze tedy matici působení zrcadla  $A$  vyjádřit maticí

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix},$$

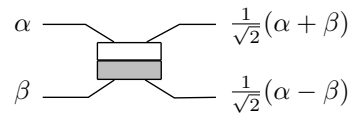
pokud pracujeme v bázi

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Tato matice popisuje působení zrcadla i na fotony v superpozici základních stavů. Pokud tedy do zrcadla vstoupí foton ve stavu  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  opustí ho ve stavu

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(\alpha + \beta)|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}(\alpha - \beta)|1\rangle.$$

Schematicky:



Stejnými úvahami dospějeme k tomu, že působení zrcadla  $B$  je vyjádřeno maticí

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Celkové působení systému pak dostaneme složením obou zobrazení jako

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Tím je vysvětlen výsledek experimentu: foton vstupující ve stavu  $|0\rangle$  vystupuje ve stavu  $|1\rangle$ . Chybějící záporné znaménko naznačuje posun fáze o  $\pi$  je způsobeno zanedbáním obyčejných zrcadel  $U$  a  $L$ . Matice působení těchto zrcadel je přitom zjevně

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix},$$

čímž je popis dokončen. Zbývá vysvětlit výsledky měření na detektorech 1 a 2. To se děje pomocí kvantového postulátu měření, který patří k nejpodivnějším a nejvíce kontroverzním aspektům většinou přijaté interpretace kvantové mechaniky.