

Materiály k výuce kvantové fyziky

Mgr. Jana Legerská
Katedra didaktiky fyziky MFF UK

(Proč) učit kvantovou fyziku na SŠ?

- Je v RVP
- Je to pěkná fyzika
- Má spoustu aplikací
- Bude mít ještě více aplikací

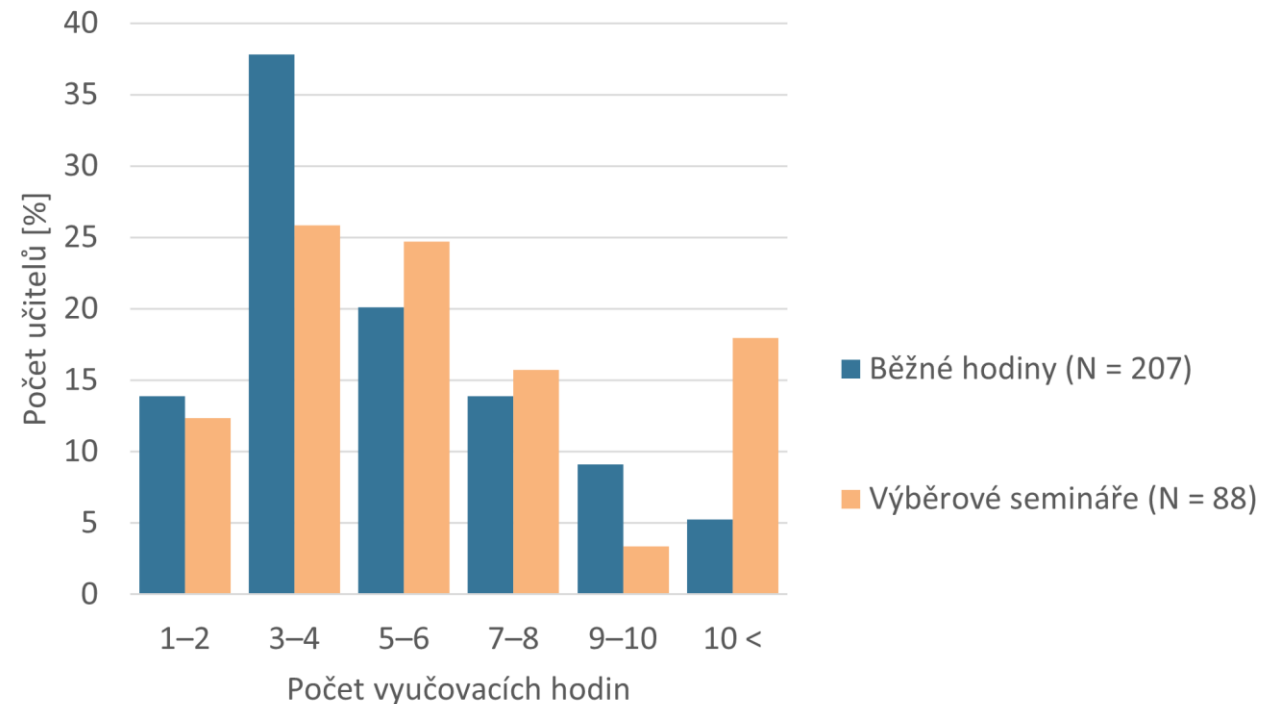


Ale jak?

... aby to respektovalo školní realitu:

- nedostatek času
- nedostatečný matematický aparát

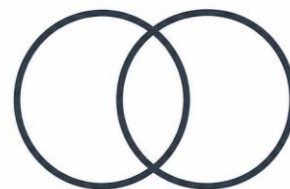
Kolik vyučovacích hodin učitelé na SŠ věnují kvantové fyzice



Jak to materiály zohledňují



Nezávislé moduly,
variabilita



Konceptuální přístup



Respektují témata RVP



Aktivní práce studentů

Přehled modulů

Kvantování energie (2 h)

- Fotoelektrický jev
- Čarová spektra atomů

Základní principy kvantové fyziky (2–3 h)

- Vlnově-částicový dualismus
- Princip superpozice, kvantové měření
- Kvantové počítání

Nekompatibilní veličiny (1 h)

- Princip superpozice, kvantové měření
- Polarizace fotonu
- Souvislost s relacemi neurčitosti

Kvantová kryptografie (1 h)

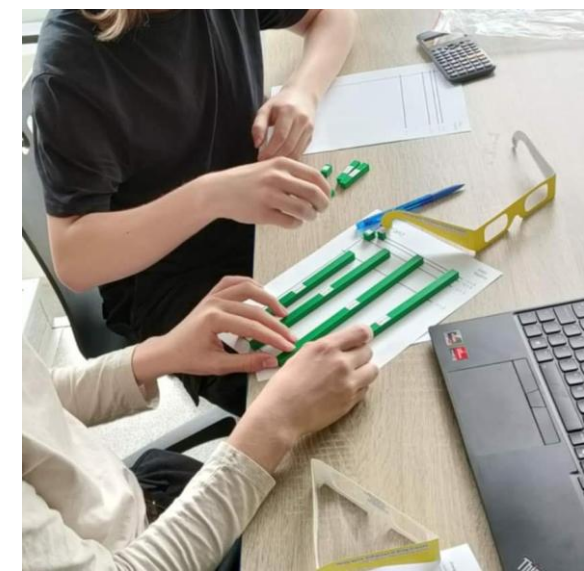
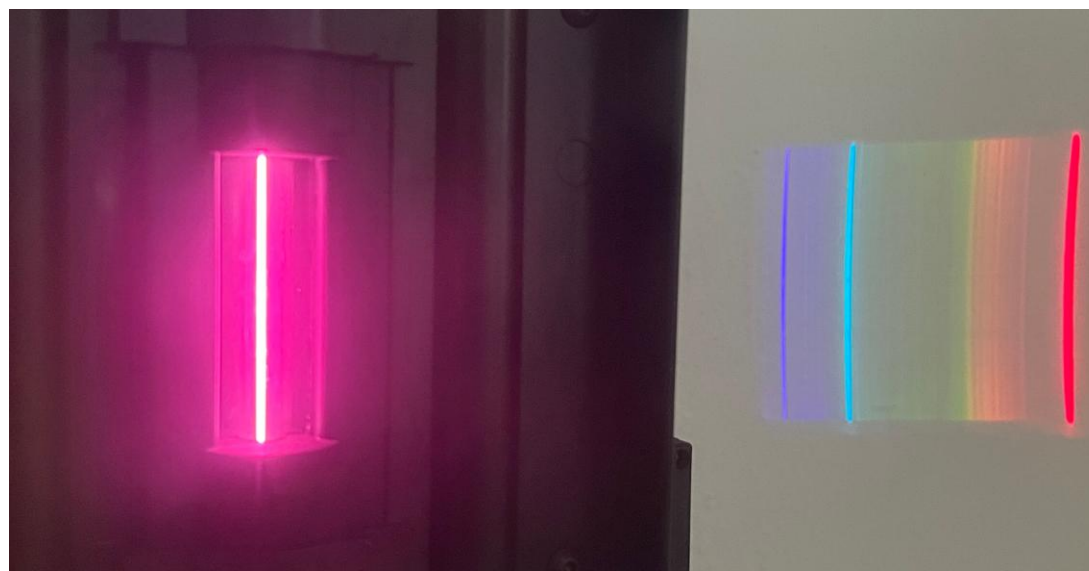
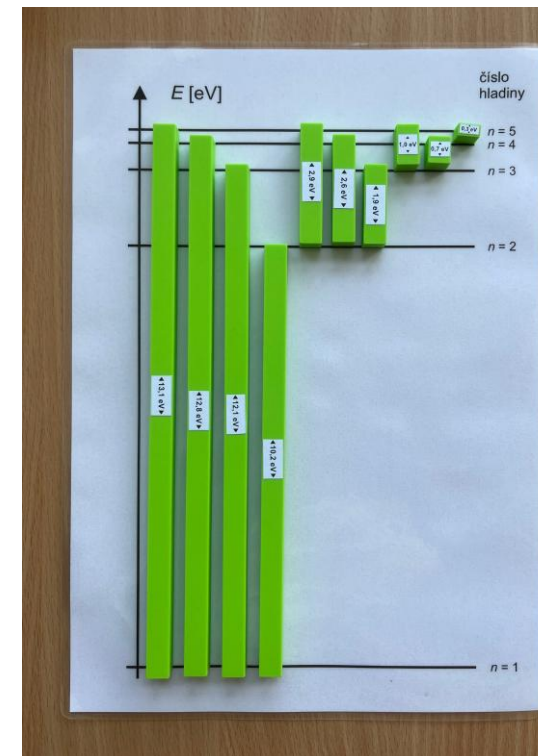
- Kvantová distribuce klíče (BB84)

Kvantově-mechanický model atomu (1–2 h)

- Hustota pravděpodobnosti
- Atomové orbitaly

Modul 1: Kvantování energie

- Fotoelektrický jev
- Čarová spektra atomů – energetické hladiny atomu

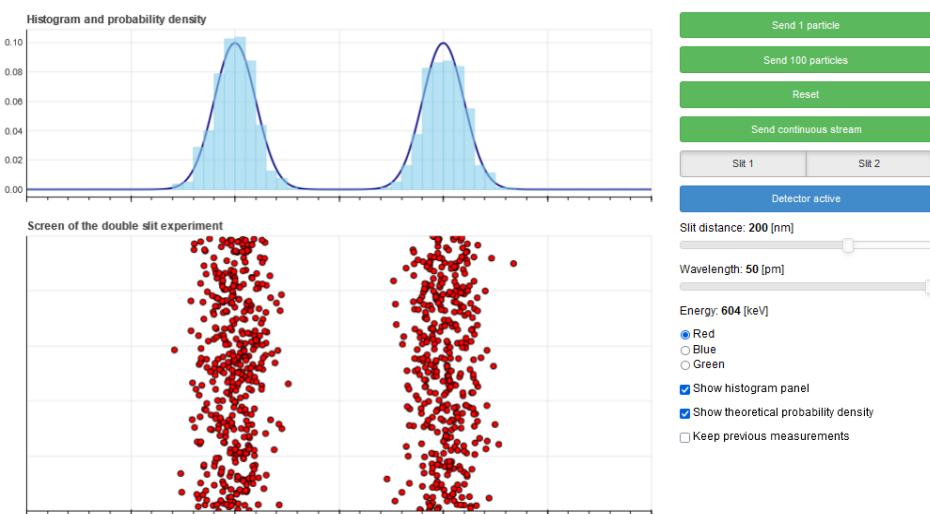


Modul 2: Základní principy kvantové fyziky

- Dvojtěrbinový experiment
- Kvantové piškvorky
- Kvantové lodě

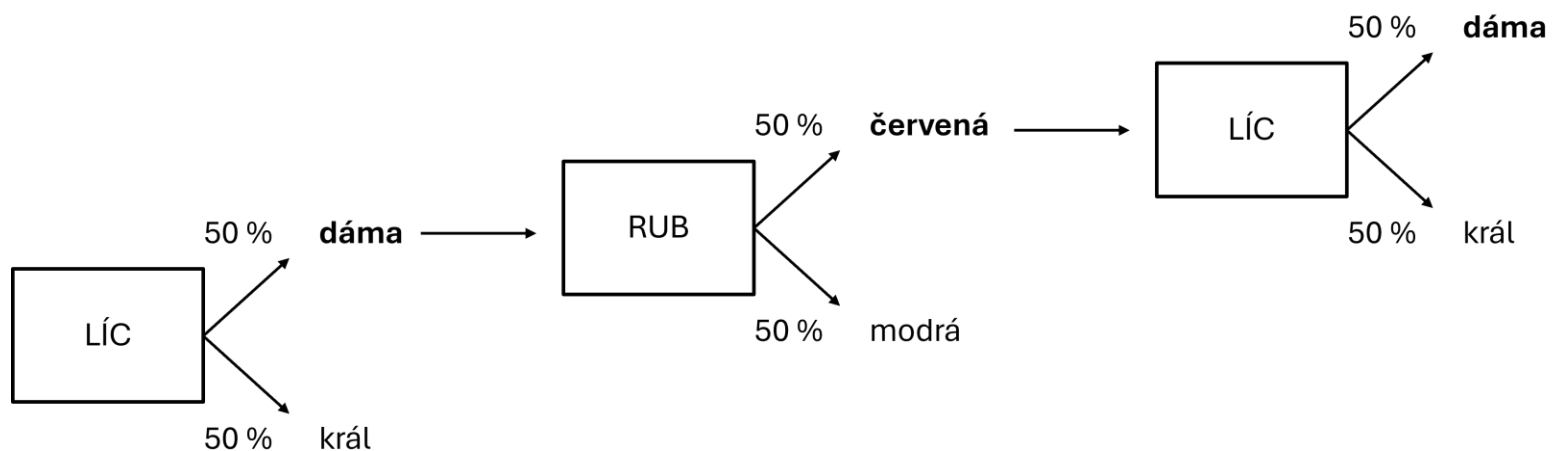


Dvojtěrbinový experiment s elektrony



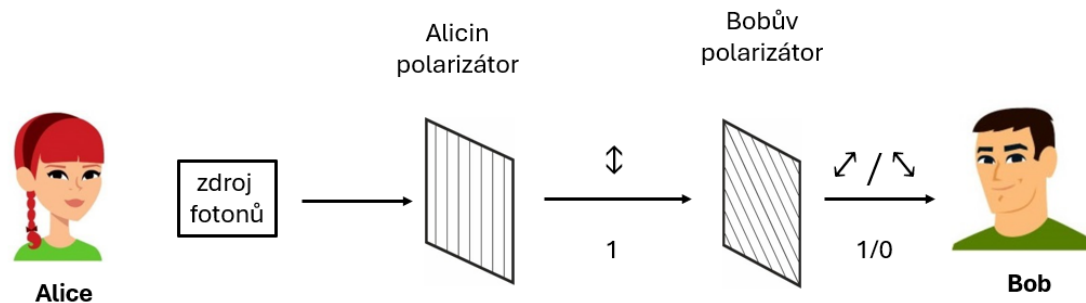
Modul 3: Nekompatibilní veličiny

- Kvantová karta
- Polarizace světla



Modul 4: Kvantová kryptografie

- Kvantová distribuce klíče – protokol BB84



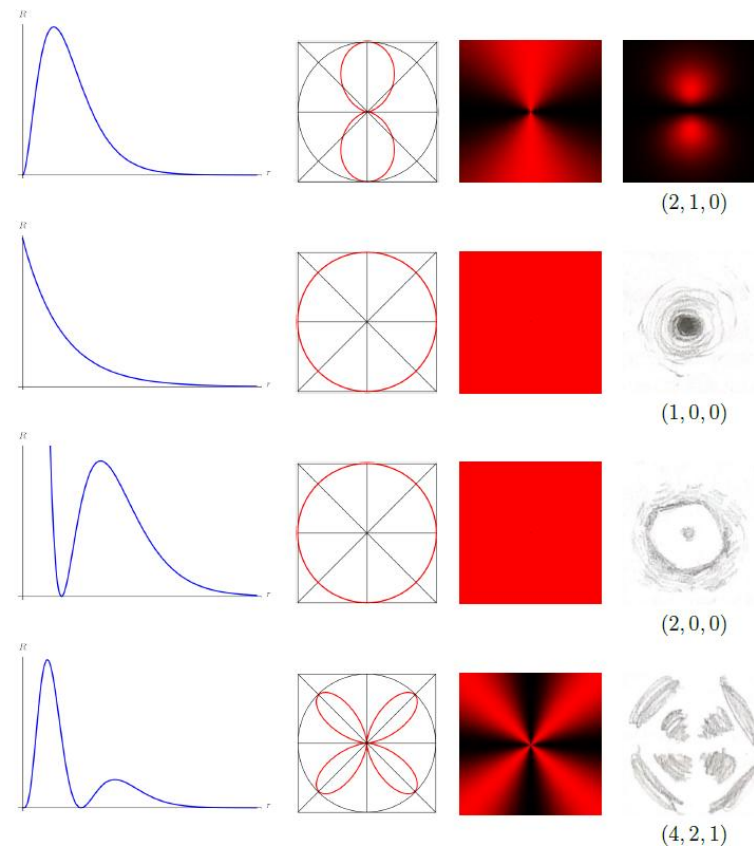
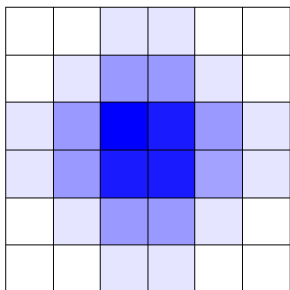
<https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/>

polarizace	směr	bit
přímá +	↕	1
přímá +	↔	0
šikmá ×	↗	1
šikmá ×	↖	0

Modul 5: Kvantově-mechanický model atomu

- Hustota pravděpodobnosti nalezení částice
- Orbitaly atomu vodíku

A	B	C
D	E	F
G	H	I

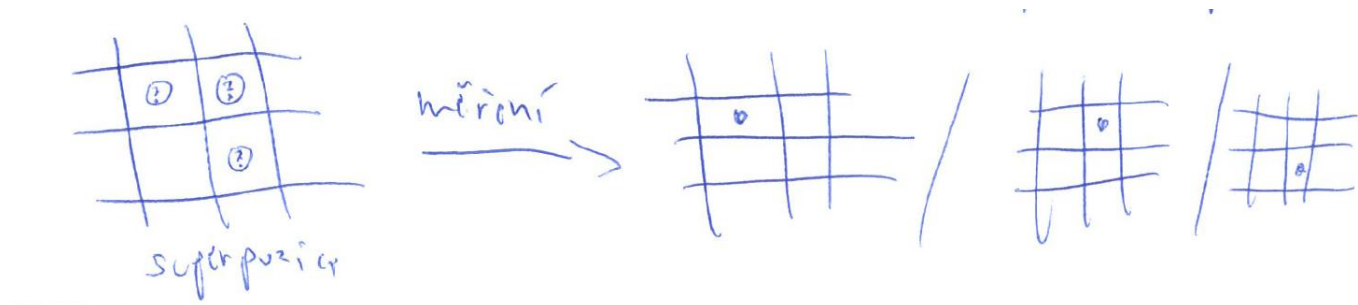


Zkušenosť z výuky

- testováno s 5 třídami z různých SŠ (cca 90 žáků)
- zpětná vazba od 15 učitelů
- 2 učitelé testovali ve vlastní třídě

Ukázka studentských vyjádření o principu superpozice:

Superpozice je stav, kdy „objekt“ není lokalizován na jednom místě, ale má jenom určitou pravděpodobnost být na určitých místech. Které to jsou zjistíme měřením.



Co materiály obsahují

- Metodický materiál
- Pracovní listy
- Editovatelné prezentace
- Návod na výrobu pomůcek

Modul 3: Nekompatibilní veličiny

3.1 Cíle:

- Student uvede příklad dvou nekompatibilních veličin a vysvětlí, jak měření jedné veličiny ovlivňuje hodnotu druhé veličiny, přičemž použije reálné veličiny nebo vhodný model.

3.2 Časový plán:

Modul 3 – hodina 1/1		Čas
Úvod		5 min
Nekompatibilní veličiny	• kvantová karta	15 min
Polarizace	• skupinová práce s polarizačními filtry a úkoly v pracovním listu: • pozorování intenzity světla při průchodu polarizačními filtry • polarizace jednoho fotonu, pravděpodobnost průchodu jednoho fotonu filtrem • shrnutí	25 min

3.3 Pomůcky:

- Demonstrační kvantová karta a hrací kostka
- Menší kvantové karty a hrací kostky pro studenty
- Demonstrační polarizační filtry
- Polarizační filtry pro studenty (3 pro každou skupinu)
- Pracovní list *Nekompatibilní veličiny – polarizace fotonů*

3.4 Průběh výuky:

Úvod

V této hodině představíme studentům vlastnost mikrosvěta, která nemá v klasickém světě obdoby: existenci veličin, jejichž hodnoty nemohou být přesně dány současně. Nelze je tedy ani současně přesně změřit. Nejde ale o nedostatek informací ani o chybu měření – hodnotu obou veličin není možné současně vůbec přiřadit. Takovým veličinám říkáme tzv. „současně neměřitelné veličiny“ nebo odborně *nekompatibilní veličiny*. Jinými slovy lze tuto vlastnost popsat také tak, že získáním informace o jedné veličině ztrácíme informaci o druhé veličině. Známým příkladem nekompatibilních veličin je poloha částice a její hybnost (resp. souřadnice x a x -ová

složka hybnosti.) Zde se budeme zabývat jednoduššími veličinami, které mohou nabývat pouze dvou hodnot.

Vlastnosti nekompatibilních veličin studentům nejprve ukážeme na modelu kvantové karty a potom přejdeme k reálné veličině – polarizaci fotonů, kterou lze prakticky demonstrovat pomocí polarizačních filtrů.

Kvantová karta

Kvantová karta¹ je fyzická pomůcka, která umožňuje studentům prozkoumat, jak se nekompatibilní veličiny chovají při kvantovém měření. Zároveň studenti přirozeně seznamuje s rolí náhody u kvantového měření a tím, že měření ovlivňuje stav měřeného systému. Lze ji tedy použít i v případě, že jde o první seznámení studentů s touto problematikou. Známořňuje vlastnosti elektronu a fotonu jako je spin a polarizace, které se chovají stejně jako vlastnosti kvantové karty².

Kvantová karta představuje částici, která má dvě nekompatibilní vlastnosti: líc a rub, z nichž každá může nabývat právě dvou hodnot. Líc může být „dáma“ nebo „král“, rub může být „červený“ nebo „modrý“, jak ukazuje tabulka níže:

Vlastnost	LÍC	RUB
Hodnoty	dáma (Q)	červená
	král (K)	modrá

Na rozdíl od klasických hracích karet, které mají barvu rubu i líce jasně danou zároveň, může být kvantová karta ve zvláštním stavu, kdy má 50% šanci být dáma a 50% šanci být král (viz obr. 3.1a vlevo). Takovému stavu říkáme tzv. *superponovaný stav* nebo *superpozice* těchto dvou možností. Kvantová karta je totiž slepena z rozstřižených hracích karet tak, aby díky různému přehnutí „chlopni“ karta mohla být z lícové strany buď dáma, nebo král, nebo napůl dáma a napůl král (v superpozici těchto dvou stavů) a z rubové strany analogicky červená, nebo modrá, nebo napůl červená a napůl modrá. Obě strany rozložené kvantové karty ukazuje obrázek 3.1b.



(a) Barva líce, resp. rubu v superpozici. (b) Dvě strany rozložené kvantové karty.

Obr. 3.1: Kvantová karta.

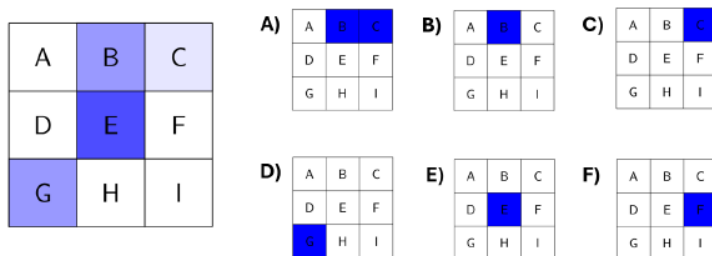
¹Pomůcka je popsána v příspěvku [5] italských autorek Maria Bondoni a Valentina De Renza na konferenci GIREP 2025.

²Jde opravdu o velmi přesnou analogii, formální popis stavů kvantové karty se od popisu spinových stavů elektronu nebo polarizace fotonu liší opravdu pouze názvem.

Ověřovací otázky k principu superpozice a kvantovému měření:

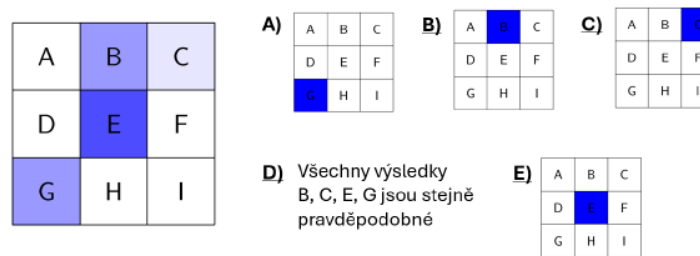
Pro ověření pochopení zařadíme úlohy 1–5 popsané níže. Studenti mohou vybírat správné odpovědi na otázky opět pomocí hlasovacích karet.

Obrázek ukazuje počáteční stav kvantové lodě. Vyberte všechny možnosti, které zobrazují **možný stav po změření polohy lodě**.



Obr. 2.14: Úloha 1

Který výsledek měření je **nejpravděpodobnější**?



Obr. 2.15: Úloha 2

- Úloha 3: Provedli jsme **jedno měření polohy lodě**. Jakou informaci jsme tím získali o zastoupení stavů v původní superpozici?
- Úloha 4: Kolik měření bychom museli provést, abychom přesně určili zastoupení jednotlivých stavů v „**původní superpozici**“ kvantové lodě?

Ke stažení na webu



<https://fyzweb.cz/materialy/kvantovka/metodika/>

Děkuji za pozornost

jana.legerska@matfyz.cuni.cz