



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Jaroslav Kafka

**Využití her pro pochopení základních
principů kvantového popisu světa**

Katedra didaktiky fyziky

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Zdeňka Koupilová, Ph.D.

Studijní program: Fyzika se zaměřením na vzdělávání

Studijní obor: Učitelství fyziky pro střední školy
se sdruženým studiem Učitelství
matematiky pro střední školy

Praha 2024

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

Tímto děkuji vedoucí této práce RNDr. Zdeňce Koupilové, Ph.D. za trpělivost, komentáře a cenné rady. Poděkování patří i všem žákům a jejich vyučujícím, kteří se zapojili do testování her a aktivit popsaných v této práci.

Název práce: Využití her pro pochopení základních principů kvantového popisu světa

Autor: Jaroslav Kafka

Katedra: Katedra didaktiky fyziky

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Zdeňka Koupilová, Ph.D., Katedra didaktiky fyziky

Abstrakt: Cílem této práce bylo na základě rešerše vytipovat a prozkoumat vhodné hry/aktivity, jejichž principy se opírají o základní myšlenky kvantové fyziky. Z celkového počtu 68 her, jež byly nalezeny v rámci rešerše, byly vybrány čtyři hry, kterými se tato práce podrobně zabývá. Použitelnost vybraných her při výuce byla prověřena jejich otestováním na vzorku žáků středních škol a následným vyhodnocením dotazníkového šetření. Výsledkem tohoto testování bylo potvrzení těchto her jako vhodných prostředků pro rozšiřování povědomí o základních principech kvantové fyziky.

Klíčová slova: kvantová fyzika, výuka fyziky, hry ve výuce

Title: Games for understanding of the basic principles of the quantum description of the world

Author: Jaroslav Kafka

Department: Department of Physics Education

Supervisor: RNDr. Zdeňka Koupilová, Ph.D., Department of Physics Education

Abstract: The aim of this thesis was to choose and to explore appropriate quantum games/activities based on a recherche. Out of 68 games, that were found in the framework of the recherche, four games were chosen and pursued in detail in this thesis. The applicability of chosen games in education was vetted by testing them on a sample of high school students and by consequential evaluating of the questionnaire survey. The result of this testing was confirming these games as appropriate resources for the raising of awareness about basic principles of quantum physics.

Keywords: Quantum Physics, Teaching and Learning Physics, Games in Classroom

Obsah

Úvod	3
1 Co je to hra?	5
1.1 Hry a aktivity ve výuce	5
1.2 Hry a aktivity ve výuce fyziky	5
1.3 Hry a aktivity ve výuce kvantové fyziky	6
1.3.1 Kvantové hry	6
2 Vybrané hry a aktivity	7
2.1 Rešerše a kontrola korektnosti	7
2.2 Entanglion	7
2.2.1 Cíl hry	8
2.2.2 Příprava hry a její průběh	8
2.2.3 Akční karty	9
2.2.4 Vstup a opuštění galaxie Entanglion	10
2.2.5 Kvantové události	11
2.2.6 Orbitální obrana	11
2.2.7 Riziko odhalení	12
2.2.8 Součásti kvantového počítače	12
2.2.9 Souvislosti hry Entanglion s kvantovou fyzikou a zhodnocení jejich zobrazení	14
2.3 Quantum Odyssey	15
2.3.1 Blochova sféra	16
2.3.2 Kapitola The fundamental laws	18
2.3.3 Souvislosti hry Quantum Odyssey s kvantovou fyzikou a zhodnocení jejich zobrazení	27
2.4 Psi and Delta	28
2.4.1 Cíl hry	28
2.4.2 První část	28
2.4.3 Druhá část	29
2.4.4 Souvislosti hry Psi and Delta s kvantovou fyzikou a zhodnocení jejich zobrazení	30
2.5 Quantum Game and Virtual Lab by Quantum Flytrap	31
2.5.1 Quantum Game	31
2.5.2 Virtual Lab	32
2.5.3 Souvislosti Quantum Game and Virtual Lab by Quantum Flytrap s kvantovou fyzikou a zhodnocení jejich zobrazení	33
3 Praktická část	35
3.1 Popis šetření	35
3.2 Analýza získaných dat	36
3.2.1 Entanglion	36
3.2.2 Quantum Odyssey	43
3.2.3 Psi and Delta	50

3.2.4 Quantum Game and Virtual Lab by Quantum Flytrap . . .	57
3.3 Vyhodnocení provedeného šetření	64
Závěr	65
Literatura	66
Seznam obrázků	71
Seznam tabulek	73
A Příloha č. 1	74
B Příloha č. 2	76

Úvod

Zaměření této práce velmi dobře vystihují slova doktora Philippa Bitzenbauera z Erlangensko–Norimberské univerzity Friedricha Alexandra: „Learning quantum physics is essential for understanding the physical world. However, learning about quantum phenomena and principles poses a challenge as many of the phenomena that are observed at the quantum level cannot be directly observed or intuitively understood in terms of classical physics or thinking. Models play an important role in learning quantum physics by providing conceptual frameworks and visual representations that allow reasoning about and predicting the behavior of quantum systems. Therefore, understanding models is an essential part of learning quantum physics.“ [1]

Výše uvedená citace poukazuje na důležitost využití modelů při výuce kvantové fyziky, jelikož právě porozumění modelům je klíčové pro pochopení kvantových jevů a principů, které jsou jinak z hlediska klasické fyziky neuchopitelné. Role těchto modelů je zde mnohem důležitější než třeba v klasické mechanice, jelikož mikrosvět je běžnými smysly nedostupný. Nemůžeme tedy využít našich zkušeností ani přímého pozorování.

S neustálým rozvojem technologií, které staví na zákonitostech kvantové fyziky, je nutné šířit povědomí o základních principech kvantového popisu světa mezi běžnou populací. [2] Vzhledem k tomu, že se vlivem (nejen) popkultury kvantová fyzika stala synonymem pro sci-fi, je nezbytné s její výukou začít zlehka, jednoduše a v mnohem mladším věku, než je v současnosti běžné. K tomu jsou vhodné hry a aktivity s herními prvky, kterými se tato práce zabývá.

Kromě výše zmíněného mě k výběru tohoto tématu vedly i osobní pohnutky. Již od prvních přednášek z kvantové fyziky, které jsem absolvoval v rámci svého bakalářského studia, mě toto téma fascinovalo. Teprve s odstupem času jsem si však uvědomil, že navzdory důležitosti kvantové fyziky je jí na střední škole věnováno poměrně málo prostoru. Častým odůvodněním této skutečnosti je matematická náročnost a vysoká míra abstrakce. Právě tato fakta lze částečně obejít využitím her, které mohou pomoci budovat povědomí o principech kvantové fyziky již u středoškoláků.

Cílem této práce bylo provést rešerši relevantní literatury, dostupných her a aktivit s herními prvky, jejichž principy se opírají o základní myšlenky kvantové fyziky. Na základě této rešerše byly následně vybrány dvě online aplikace, jeden samostatný program a jedna desková hra. Tyto aktivity byly prověřeny z hlediska jejich fyzikální korektnosti a následně byly otestovány mezi zájemci o tuto problematiku z řad žáků středních škol.

Práce je členěna na úvod, tři kapitoly, závěr a dvě přílohy, přičemž první dvě kapitoly tvoří teoretickou část práce a následující třetí kapitola tvoří její praktickou část. První kapitola se zabývá stručným představením her a aktivit ve výuce. Následně zužuje toto obecné téma na hry a aktivity ve výuce kvantové fyziky. Druhá kapitola je věnována výše zmíněné rešerši a představení jednotlivých her včetně jejich pravidel, popisu využitých fyzikálních principů a zhodnocení zobrazení souvislostí těchto her s kvantovou fyzikou. Třetí kapitola je pak zaměřena na výsledky testování vybraných her a aktivit mezi žáky, zpracování dotazníkového šetření a na reflexi zjištěných poznatků. Závěr shrnuje vypra-

cování této práce a diskutuje dosažení jejích cílů. První příloha je tvořena seznamem kvantových her nalezených v rámci rešerše. Druhou přílohu tvoří jeden z dotazníků, které byly sestaveny a využity v rámci této práce. Jelikož jsou všechny dotazníky velmi podobné, je zde přiložen pouze jeden jako příklad. Tento a zbylé tři dotazníky jsou blíže rozebrány ve třetí kapitole.

1. Co je to hra?

Hry jsou významnou součástí života každého člověka, ať už si to uvědomujeme, či nikoliv. Je proto nasnadě, že byly, jsou a budou předmětem zkoumání mnoha odborníků z různých oblastí vědy. Právě z tohoto důvodu je obtížné uvést jednotnou definici pojmu hra, jelikož záleží na tom, z jaké oblasti je na tuto problematiku nahlíženo.

1.1 Hry a aktivity ve výuce

Jelikož je tato práce zaměřena na hry a aktivity v pedagogickém kontextu, je vhodné uvažovat základní rozdělení her na spontánní a didaktické. Hru spontánní lze chápat jako činnost, jejíž motiv leží v ní samé a účast se řídí přáním dítěte. Oproti tomu jsou hry didaktické určeny ke vzdělávacím účelům. [3] Jedná se o uvědomělou činnost, která má specifický význam a účel. Motivuje, zvyšuje aktivitu myšlení a rozumové úsilí, zlepšuje koncentraci, uvolňuje a rozvíjí tvořivý způsob uvažování, často cvičí představivost, paměť, kombinační a logický úsudek, umožňuje hledat taktické a strategické postupy. Obsahuje prvky napětí a soutěživosti, nezřídka též moment překvapení, a tím podněcuje k větší iniciativě i jinak pasivnější jedince. Na rozdíl od spontánní hry je účast na didaktické hře povinná a řídí se určitými pravidly nastavovanými z vnějšku. [4]

Na dodržování těchto pravidel po celou dobu dbá vyučující, který zároveň sleduje, jak se žáci blíží cíli hry a jak mu rozumí. Po každé hře by měla následovat zpětná vazba, přičemž její formu volí také vyučující. K té dochází často formou diskuze či strukturovaného rozhovoru mezi žáky a učitelem, přičemž ze žákovské zpětné vazby může učitel získat informace o vhodnosti zařazení příslušné didaktické hry do výuky. Oproti tomu si mohou žáci prostřednictvím zpětné vazby poskytnuté učitelem ověřit, zda došli vytyčeného cíle a zda se jim podařilo pochopit danou problematiku.

1.2 Hry a aktivity ve výuce fyziky

Podrobný výzkum využití didaktických her ve výuce fyziky proběhl na této fakultě v roce 2021 v rámci diplomové práce Kláry Otáhalové [5]. Dle těchto výsledků přibližně dvě třetiny učitelů napříč všemi stupni vzdělávací soustavy zařazují do výuky didaktické hry. Pro vyšší gymnázium pak podíl těchto učitelů lehce přesahuje polovinu. V tomto výzkumu bylo nadále zjištěno, že převažují didaktické hry, které vytvářejí sami učitelé. Také z tohoto důvodu vznikají sborníky fyzikálních her jak klasických [5], tak s využitím interaktivní tabule [6], tak čistě počítačových [7].

1.3 Hry a aktivity ve výuce kvantové fyziky

Vzhledem ke skutečnosti, že se s kvantovými jevy nesetkáváme v běžném životě přímo, přináší studium této oblasti fyziky větší rizika v podobě miskoncepcí. [8] Jedním ze způsobů, jak by se těmito miskoncepcím dalo vyhnout, by mohlo být představení základních konceptů kvantové fyziky s využitím didaktické hry zaměřené právě na tyto koncepty. To bylo až do roku 2014 obtížné, jelikož většina her, které byly spjaté s kvantovou fyzikou, vznikala téměř výlučně pro vědecké účely v rámci výzkumných skupin tvořených experty. Právě toho roku však byla poprvé zorganizována akce s názvem *Quantum Game Jam*, jejímž cílem bylo zařídit spolupráci mezi experty na poli kvantové fyziky a profesionálními vývojáři her. Od té doby se z *Quantum Game Jam* stala výroční událost, která v online formě probíhá dodnes. Díky této aktivitě vzniklo již přes sto kvantových her. [9].

Jednou z prvních kvantových her, která byla vytvořena za účelem vzdělávání v oblasti kvantové fyziky, je *Quantum Minesweeper*. [10] Při představení této hry podali její autoři rovněž definici kvantové hry: „počítačová hra, jejíž pravidla jsou založena na principech kvantové fyziky, např.: superpozici, provázání nebo principu kvantového měření“. *Kvantovou hru (quantum game)* definovali za účelem odlišení této hry a dalších podobných od oblasti matematiky zvané *kvantová teorie her (quantum game theory)*, která je kombinací kvantové mechaniky a klasické teorie her. Tato definice kvantové hry byla obecně přijata a používána.

1.3.1 Kvantové hry

Výše uvedená definice se však vzhledem k nedávnému nárůstu počtu her zaměřených na kvantovou fyziku ukázala být nedostatečnou. Nejenže nezahrnuje karetní a deskové hry, ale ani možnosti propojení her a kvantových počítačů. Z tohoto důvodu byla, po prozkoumání více než 250 her zaměřených na kvantovou fyziku, navržena nová definice, která by měla tyto nedostatky odstranit. [11] Nově jsou kvantové hry definovány jako hry související s kvantovou fyzikou, kvantovými technologiemi či kvantovým počítáním skrze alespoň jednu z následujících dimenzí:

- **Vnímatelnost** – Souvislosti hry a kvantové fyziky lze vnímat přímo při hraní nebo v doplňujících materiálech (např.: pravidla, popis, ...).
- **Kvantové technologie** – Hra využívá kvantový software či hardware přímo při hraní nebo jich bylo využito při vývoji hry.
- **Vědecké účely** – Hra je určena pro vzdělávání, výzkum s využitím široké veřejnosti nebo pro jiné vědecké účely.

Právě s přihlédnutím k těmto dimenzím byly vybrány kvantové hry dále popsané v této práci.

2. Vybrané hry a aktivity

2.1 Rešerše a kontrola korektnosti

Pro vyhledání relevantních zdrojů byly použity nástroje Google Scholar a Semantic Scholar, s jejichž pomocí byla provedena rešerše čítající dvanáct různých zdrojů [10–22] popisujících jak deskové, tak počítačové hry, z nichž byly pro další testování vybrány čtyři níže popsání. Další hry, kterými se uvedené zdroje zabývají jsou uvedeny v příloze č. 1.

Všechny čtyři vybrané hry jsou dle nalezených zdrojů (viz [12; 17; 18; 22; 23]) hojně využívány a jejich fyzikální korektnost byla již vícekrát ověřena. I přes tato ověření byla v rámci této práce provedena kontrola korektnosti metodou porovnání fyzikálních poznatků s vysvětleními poskytnutými ve hrách. Tam, kde to bylo možné, byly pro kontrolu provedeny i příslušné výpočty (např. ve hrách Quantum Odyssey a Entanglion byly početně ověřeny výsledné stavy po působení jednotlivých kvantových hradel na qubity v daných počátečních stavech). Při tomto ověření nebyly nalezeny fyzikální nedostatky.

2.2 Entanglion

Hra Entanglion [23] byla vytvořena v IBM Research, aby seznámila hráče se základními koncepty kvantových počítačů, včetně qubitů, superpozice, kvantového provázání, měření a chyb. Entanglion také ukazuje hráčům různé hardwarové a softwarové komponenty používané ve skutečných kvantových počítačích.

Tato hra byla v průběhu vytváření testována jak mezi odborníky na poli kvantové fyziky, tak mezi středoškolskými studenty. Na základě jejich zpětných vazeb byly mechanismy hry postupně upravovány. Pro úpravu obtížnosti hry byl implementován simulátor hry s AI hráči, přičemž jejich výsledky pomohly určit optimální obtížnost hry. [23]

Jedná se o kooperativní deskovou hru pro dva hráče, která představuje qubity, superponovaný stav a kvantové provázání. V průběhu hry hráči rovněž narazí na princip měření a chyby, které jej mohou narušit. Dále jsou hráčům představeny různé hardwarové a softwarové součásti, které se podílí na fungování reálného kvantového počítače. Výhodami této hry oproti níže popsané hře Quantum Odyssey jsou jednak možnost stáhnout si herní materiály [24] a celou hru si vyrobit, jednak existence českého překladu pravidel. Právě na základě této verze jsou zpracovány následující stránky popisující pravidla hry. [25] Nevýhodou této hry oproti všem dále zmíněným je časová náročnost vysvětlování pravidel. Ve hře samotné je uvedeno, že herní doba je cca 45 minut. Pokud by se do herního času měla započítat i doba potřebná k vysvětlení pravidel, vzrostla by minimálně na dvojnásobek. Navíc je nutné všechna pravidla představit najednou před začátkem hry. To je nevýhoda oproti počítačovým hrám, které většinou představují pravidla postupně.

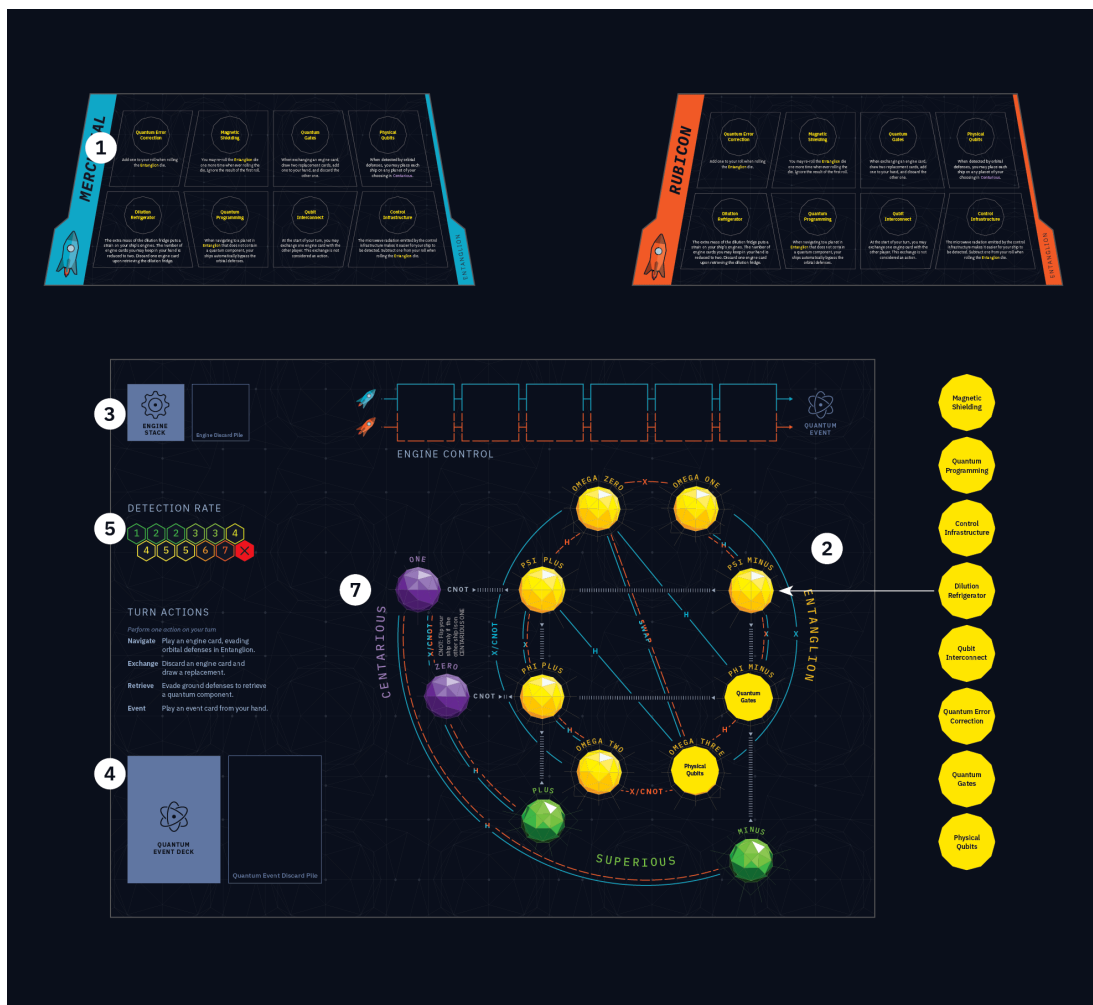
2.2.1 Cíl hry

Hráči se ujímají role dvou raket (červené a modré), které reprezentují dva qubity. Začínají v galaxii Centarions, která reprezentuje stavy $|0\rangle$ a $|1\rangle$. Další galaxií, do které se alespoň jeden z hráčů musí dostat je galaxie Superius, která reprezentuje stav $|+\rangle$ a $|-\rangle$. Z těchto galaxií se následně oba hráči přesunou do galaxie Entanglion, která reprezentuje stavy kvantového provázání. Konkrétně se jedná o čtyři Bellovy stavy $|\Psi+\rangle$, $|\Psi-\rangle$, $|\Phi+\rangle$, $|\Phi-\rangle$ a čtyři dodatečné stavy $|\omega_0\rangle$, $|\omega_1\rangle$, $|\omega_2\rangle$, $|\omega_3\rangle$. V této galaxii se obě lodě právě v důsledku provázání pohybují současně a snaží se sesbírat součásti kvantového počítače, přičemž na každé planetě je právě jedna součástka. Cílem hry je sesbírat všechny tyto součástky, čímž hráči sestaví kvantový počítač a vyhrají tak celou hru.

2.2.2 Příprava hry a její průběh

Celá hra se odehrává na základní desce (viz Obrázek 2.1), ke které jsou ze stran přiloženy desky obou kosmických lodí. Na každou planetu v galaxii Entanglion je umístěna náhodně vybraná součástka kvantového počítače, přičemž hráči po celou dobu vidí, která součástka je na které planetě. Každému hráči jsou rozdány tři akční karty, které jsou viditelné pro oba hráče. Na herní desku rovněž patří karty kvantových událostí, které jsou na začátku promíchány a umístěny tak, aby na ně hráči neviděli. Jediná z těchto karet, o které hráči předem ví, je karta „Kvantová kombinatorika“, která je umístěna jako čtvrtá odspodu. Pokud jde o obtížnost, hráči si ji mohou sami navolit počátečním nastavením rizika odhalení. Důležitou informací pro hráče je fakt, že pokud během hry dosáhne riziko odhalení stupně (X), prohrávají hru. Nyní už zbývá jen zvolit začínajícího hráče a určit startovní pozice obou hráčů, které jsou určeny hodem šestistěnnou kostkou, přičemž na stěnách této kostky jsou tři nuly a tři jedničky. Padne-li nula, startuje hráč v galaxii Centarions na poli NULA, padne-li jednička, startuje hráč na pozici JEDNA.

Hráč, který je zrovna na tahu má několik možností, jak provést svůj tah. Jednou z nich je zahrání akční karty. Pokud to momentální situace umožňuje, přesune hráč svoji raketu na novou pozici. Pokud se nacházejí oba hráči v galaxii Entanglion, přesunují se obě lodě. Po této akci si hráč okamžitě dobírá novou akční kartu z balíčku. Další možností je odložení libovolné akční karty z ruky na hromádku zahráných akčních karet a jako náhradu za tuto kartu si dobírá novou z balíčku. Pokud je hráč na planetě v galaxii Entanglion, na které se nachází součást kvantového počítače, může se ji hráč pokusit získat. K tomu musí hodit osmistěnnou kostkou hodnotu větší než je aktuální hodnota rizika odhalení. Pokud se mu to nepodaří, zůstává na místě a zvyšuje hodnotu rizika odhalení o jeden stupeň. Poslední možností hráčova tahu je zahrání karty kvantové události, má-li ji hráč aktuálně v ruce. Hráči se nemohou svého tahu vzdát. Vždy musí provést právě jednu z těchto akcí.



Obrázek 2.1: Herní deska a desky obou lodí [26]

2.2.3 Akční karty

Rakety se po jednotlivých planetách pohybují pomocí akčních karet (viz Obrázek 2.2), přičemž každá akční karta představuje kvantové hradlo. Každá trasa mezi dvěma body na herním plánu je označena písmeny požadovaného kvantového hradla (např.: „SWAP“ znamená, že loď musí k přesunu mezi dvěma planetami použít akční kartu SWAP). Cestu po některých trasách může iniciovat jen jedna z lodí. Hráči mohou zahrát akční kartu i v případě, že nebude mít žádný efekt (tj. i v případě, že z bodu, kde se jejich loď nachází, nevede pro danou operaci žádná trasa).



Obrázek 2.2: Akční karty [27]

- **X** – Akční karta X slouží k přesunu mezi pozicemi NULA a JEDNA a dále po trasách v rámci galaxie Entaglion. Tato karta představuje Pauliho X hradlo, které otáčí hodnotu qubitu.
- **H** – Tato akční karta slouží k přesunu mezi galaxiemi Centarius a Superius a dále po trasách v rámci galaxie Entaglion. Tato karta představuje Hadamardovo hradlo, které se používá k vytvoření nebo kolapsu superpozice. Jedná se o jednu z nejdůležitějších operací v kvantových výpočtech.
- **SWAP** – Mimo galaxii Entaglion slouží akční karta SWAP k okamžitému prohození pozic obou kosmických lodí. Uvnitř galaxie Entaglion se touto kartou lodě přesouvají mezi pozicemi OMEGA NULA a OMEGA TŘI. Tato karta představuje kvantové hradlo SWAP, které prohodí hodnoty u dvou qubitů
- **CNOT** – Akční karta CNOT slouží ke vstupu do galaxie Entaglion a k následné navigaci uvnitř. V galaxii Centarius dále prohazuje pozice obou lodí, ale pouze v případě, že se loď spoluhráče nachází na pozici JEDNA. Tato karta představuje kvantové hradlo CNOT, což je zkratkou pro „Controlled Not“ (kontrolované Not). Potřebuje dva qubity. Jeden qubit je určen jako „cílový“ a je převrácen vždy, když druhý qubit, který je určen jako „kontrolní“, má hodnotu 1.
- **Sonda** – Jakmile si jeden z hráčů lízne kartu SONDA, znamená to, že vesmírné lodě byly odhaleny obranným mechanismem. Hráč, který je na tahu, hodí osmistěnnou kostkou, a je-li výsledek menší než 4 (po zohlednění všech efektů jím držených kvantových součástí), zvýší riziko odhalení o jednu pozici. V opačném případě nemá karta SONDA žádný efekt. Tehdy hráč odloží kartu SONDA na hromádku použitých akčních karet a lízne si další akční kartu.

Zahrané akční karty hráči umísťují na herní plán do sekce „Ovládání kvantových motorů“ vždy tak, aby čáry na nich odpovídaly raketě, která danou akční kartu zahrála.

Jakmile je balíček akčních karet vyčerpán, jeden z hráčů zamíchá všechny již zahrané karty a vytvoří z nich balíček nový (tentokrát je přimíchána i karta SONDA – nepřijde již znovu dopod).

2.2.4 Vstup a opuštění galaxie Entanglion

Pro vstup do galaxie Entaglion (viz Tabulka 2.1) se jedna z lodí musí nacházet v galaxii Centarius a druhá v galaxii Superius. Hráč, jehož loď se nachází v Centariu, pak může ve svém tahu zahrát akční kartu CNOT, čímž obě lodě vstoupí do galaxie Entaglion. Trasy pro vstup do Entaglionu jsou na herním plánu vyznačeny šedými čarami (viz Obrázek 2.1).

Dobrovolné opuštění galaxie Entaglion probíhá obdobně, nacházejí-li se lodě na pozicích PHI PLUS, PHI MINUS, PSI PLUS nebo PSI MINUS. Hráč, který je na tahu, zahraje akční kartu CNOT a jeho loď se vrací do galaxie Centarius. Loď spoluhráče se vrací do galaxie Superius. Obě lodě se přitom pohybují po trase vytyčené šedými čarami.

Vedoucí loď (hrající akci CNOT)	Druhá loď	Výsledná destinace
NULA	PLUS	PHI PLUS
NULA	MINUS	PHI MINUS
JEDNA	PLUS	PSI PLUS
JEDNA	MINUS	PSI MINUS

Tabulka 2.1: Počáteční a koncové polohy lodí při přesunu do galxie Enanglion a zpět [25]

2.2.5 Kvantové události

Kvantové motory mohou být občas nepředvídatelné! Pokud odehrané akční karty zaplní všechny pozice v části „Ovládání kvantových motorů“, dojde ke kvantové události. Na konci kola si hráč lízne kartu kvantové události (viz Obrázek 2.3) a provede akci na dané kartě. Dále hráč odstraní všechny akční karty z části „Ovládání kvantových motorů“ a přesune je do odložených karet. Takto se hráč zachová i v případě, že si již lízнул kartu kvantové události během tahu (tj. lodě byly odhaleny orbitální obranou). Pokud k tomu během tahu dojde, hráč neodstraňuje akční karty z části „Ovládání kvantových motorů“.

Pokud je zahrána karta „Kvantová kombinatorika“, hráč promíchá karty kvantových událostí tak, jak je popsáno v části „Příprava hry“.



Obrázek 2.3: Kvantové události [28]

2.2.6 Orbitální obrana

Planety Entanglionu jsou chráněny orbitální obranou, která brání kosmickým lodím získat zde ukrytou součást kvantového počítače. Pomocí kvantových motorů je možné se této orbitální obraně vyhnout. Pokaždé, když se hráči přesunou na jakoukoliv z planet v Entanglionu, hodí osmistěnnou kostkou. Pokud přehodí hodnotu rizika odhalení, podařilo se jim vyhnout se orbitální obraně. Pokud hodí stejně nebo méně, musí hráči provést následující úkony. Hodí šestistěnnou kostkou

a přesunou se na příslušnou planetu v galaxii Centarius (NULA nebo JEDNA). Dále zvýší riziko odhalení o jednu pozici a líznou si kartu kvantové události, přičemž provedou akci na této kartě.

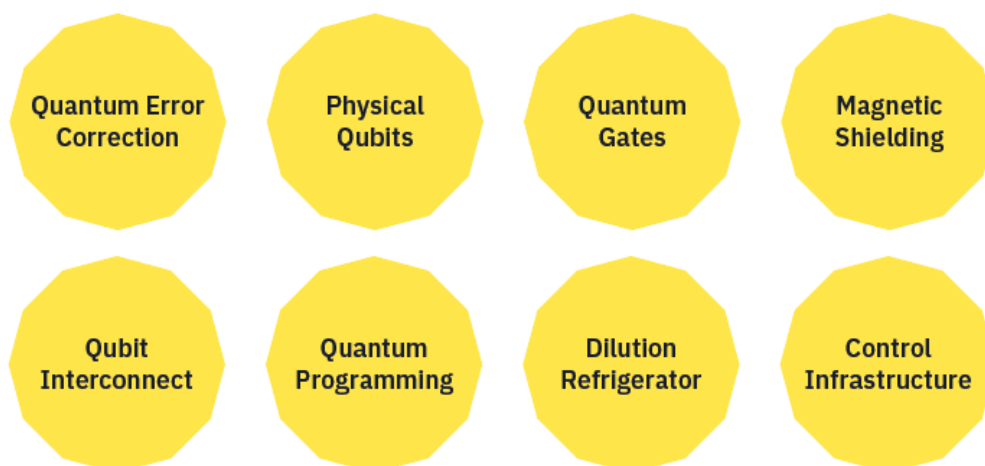
Fyzické qubity (součásti kvantového počítače) umožňují hráčům vybrat si konkrétní planetu v Centariu, kam přesunou své rakety. Pomocí kvantového programování (součást kvantového počítače) se lze vyhnout orbitální obraně na planetách, na kterých již získali součást kvantového počítače. Kvantová událost „Tunelový jev“ (karta kvantové události) umožňuje obejít orbitální obranu. Pokud hráči kartu využijí po přesunu na některou z planet v Entanglionu, nemusí již proti orbitální obraně házet kostkou. Při vstupu hráčů do galaxie Entanglion pomocí karty Heisenberg (karta kvantové události) automaticky obchází orbitální obranu. Pokud hráči zahrají akční kartu, která loď nepřemístí na novou planetu v galaxii Entanglion, nemusí znovu házet proti orbitální obraně.

2.2.7 Riziko odhalení

Riziko odhalení určuje obtížnost překonání planetární obrany (orbitální a pozemní). Pozice žetonu značí aktuální nastavení tohoto rizika. Pokud se hráčova loď nevyhne orbitální nebo pozemní obraně, zvyšuje se riziko odhalení (žeton se posune o jednu pozici vpřed). Tím je v následujících tazích snazší pro planetární obranu odhalit hráčovu loď. Hra končí, pokud riziko odhalení dosáhne poslední pozice (označené písmenem X).

2.2.8 Součásti kvantového počítače

Hráči mají za úkol posbírat všechny součásti kvantového počítače (viz Obrázek 2.4) a tím zvítězit. Jednotlivé součásti jsou popsány na každé z hracích desek kosmické lodi. Není nutné, aby všechny součásti posbírala pouze jedna loď. Každá součást kvantového počítače přináší kosmické lodi buď permanentní vylepšení nebo znevýhodnění, čímž mění podmínky po zbytek hry, proto by se měli hráči domluvit na strategii pro sbírání součástí.



Obrázek 2.4: Součásti kvantového počítače [29]

Pokud se hráčům podaří vyhnout se orbitální obraně a dostanou se na orbitu planety, na které se vyskytuje součást kvantového počítače, můžou v dalším tahu vyslat misi na povrch planety a pokusit se součást získat. Součásti kvantového počítače jsou střeženy pozemní obranou, kterou musí hráči obejít stejně jako orbitální obranu. Pokud hráči hodí na osmistěnné kostce hodnotu vyšší než je aktuální riziko odhalení, získávají součást kvantového počítače a můžou ji umístit na svoji loď. V opačném případě byli hráči odhaleni pozemní obranou. To má za následek zvýšení rizika odhalení o jednu pozici. Pokud hráči nezískají součást kvantového počítače, zůstávají obě lodě na orbitě planety. Pokud v dalším tahu zůstanou lodě na téže planetě, nemusí házet kostkou proti orbitální obraně. Karta „Tunelový jev“ umožní hráčům obejít pozemní obranu stejně jako tu orbitální. Pokud v rámci tahu zahrají tuto kartu, získají tak součást kvantového počítače a přesunou ji na hrací desku své rakety.

Součásti kvantového počítače ukryté v galaxii Entanglion reprezentují různé fyzické nebo logické komponenty [25], ze kterých je sestaven reálný kvantový počítač.

- **Fyzické qubity** – Tak jako v klasických počítačích fungují procesory na bázi hardwarových transistorů, tak kvantové procesory jsou postaveny na bázi hardwarových qubitů. Existuje několik různých způsobů pomocí kterých vědci vytvářejí fyzické qubity, jako např. Josephsonův jev¹, iontová past nebo kvantové tečky (quantum dots).
- **Propojení qubitů** – Qubity musí být navzájem fyzicky propojené, aby mohlo vzniknout jejich kvantové provázání.
- **Chladící jednotka** – Fyzické qubity se musí udržovat ve velmi nízkých teplotách – nižších než jsou teploty v kosmu – aby si udržely svoji spojitost. Speciální chlazení na bázi tekutého helia nebo vodíku (tzv. dilution refrigerator) dokáže chladit fyzické qubity až na 2 milikelviny (cca -273 °C).
- **Kvantové operace** – V klasických počítačích se používají kombinace logických operací jako AND, OR, NOT, a NAND k výpočtům vyššího řádu. V kvantových počítačích se používají pro výpočty operace X, CNOT, SWAP a H. Fyzicky se operace provádí pomocí kvantových hradel.
- **Kvantové programování** – Pro efektivnější programování kvantového počítače jsou potřeba kvantové programovací jazyky vyšší úrovně. Např. IBM OpenQASM umožňuje programovat kvantový počítač pomocí jazyka podobného assembleru a IBM Qiskit umožňuje programovat kvantový počítač v jazyku Python.
- **Korekce kvantové chyby** – U fyzických qubitů dochází k šumu, který může zapříčinit chyby během měření. Korekce kvantové chyby tyto chyby napravuje. Trik pro napravení kvantové chyby spočívá ve využití více fyzických qubitů pro simulaci jednoho logického qubitů.

¹Jako Josephsonův jev se označuje vznik elektrického proudu mezi dvěma supravodiči oddělenými tenkou vrstvou izolantu.

- **Kontrolní systémy** – Kvantové počítače potřebují mít způsob, jak měřit interní stav qubitu. Kontrolní systémy využívají mikrovlnné záření k vyčtení stavu qubitu a jeho digitalizaci do binární podoby (0 nebo 1).
- **Magnetické štíty** – Qubity jsou extrémně citlivé na náhodná magnetická pole. Magnetické štíty zajišťují, aby qubity byly chráněny před externími magnetickými vlivy.

2.2.9 Souvislosti hry Entanglion s kvantovou fyzikou a zhodnocení jejich zobrazení

Entanglion modeluje několik aspektů dvouqubitového kvantového počítače. Dvě rakety reprezentují dva qubity a každá z planet v Entanglionu představuje jiný stav, ve kterém se tyto qubity nachází. Akční karty představují tzv. kvantová hradla, která se používají k fyzické manipulaci qubitů do různých stavů. Znázornění těchto aspektů je podobné tomu ve hře Quantum Odyssey, jak lze nahlédnout níže. Zde je nicméně uspořádání jednotlivých stavů spíše do kruhu a zároveň jsou na hrací desce přímo označena hradla, kterými lze mezi jednotlivými stavy přecházet. V tom se tato hra od Quantum Odyssey liší. Ačkoliv je to tímto způsobem pro hráče přívětivější, hra tím omezuje badatelský přístup, při kterém by si hráči sami museli přijít na způsob, kterým lze přejít do daného stavu.

Současným pohybem obou raket v rámci galaxie Entanglion je zde znázorněno provázání stavů, pro které je celkový stav systému komplexnější než jen kombinace stavů individuálních qubitů. Pokud si hráči uvědomí, že každá raketa symbolizuje jeden qubit, dá jim hra jasnou představu o kvantovém provázání. V opačném případě nemusí být znázornění provázaných stavů dostatečně pochopitelné.

Interakce s orbitální obranou v galaxii Entanglion je připodobněním klasického měření (někdy nazývané měření Z) kvantového stavu. Interakce s pozemní obranou při získávání součásti kvantového počítače představuje měření provázanosti, známé také jako Bellův test. Šum v kvantovém systému někdy znemožní spolehlivá měření – nastane chyba vyčtení hodnot. Efekty zašumění a chyb jsou ve hře představovány mírou rizika odhalení. [25] Tyto aspekty jsou zde zobrazeny velmi přehledně a pochopitelně, nicméně k pochopení jejich významu je vhodné tyto části hry patřičně okomentovat.

2.3 Quantum Odyssey

Quantum Odyssey² [30] je softwarový projekt od firmy Quarks Interactive, který je stále ve vývoji. Hru lze najít na platformě Steam [31], ale ještě zde není dostupná široké veřejnosti. Jedinou možností, jak ji lze v době dokončování této práce získat, je po domluvě přímo s autory. V současnosti hra nabízí přes dvacet hodin herního obsahu, ve kterých hráče seznamuje s množstvím klíčových konceptů kvantové mechaniky a kvantových počítačů.

Použití této hry při výuce kvantové fyziky a kvantového počítání bylo testováno na skupinách různého věku a pohlaví. Výsledky tohoto testování potvrzují, že se jedná o vhodný edukační nástroj pro všechny starší dvanácti let. Rovněž byla prokázána efektivita grafického rozhraní této hry při modelování kontraintuitivních problémů. Dříve netrénovaní účastníci výzkumu byli schopni pomocí této hry vyřešit problémy, které jsou běžně zadávány v matematické formě na příslušných přednáškách magisterského studia. Dále bylo pozorováno vybudování vizuální intuice při sestavování řešení daných problémů a celkové zvýšení zájmu o kvantovou fyziku. [18]

Po krátkém představení herních mechanismů v sekci *Introduction* si uživatel může vybrat ze tří kapitol hry. První kapitola *The fundamental laws* je popsána níže, jelikož právě tato byla testována v rámci praktické části. Ve druhé kapitole *Applied algorithms* se uživatelé postupně učí tvořit konkrétní algoritmy dle pokynů v zadání. V sedmácti klasických úrovních a ve čtyřech výzvách si zde mohou hráči osvojit Groverův algoritmus (*Grover's search*) používaný pro vyhledávání specifické položky v netříděném seznamu. Dále lze v této kapitole nalézt běžně používané algoritmy v sekci *On real world problems*, které se soustřeďují na zakódování reálného problému do kvantových obvodů. Tyto reálné problémy si uživatelé mohou vyzkoušet v jedenácti klasických úrovních a následně je mohou optimalizovat ve čtyřech výzvách. Třetí kapitola hry *Thought experiments* je pak věnována myšlenkovým experimentům a postupnému začleňování popisu kvantových hradel pomocí prostředků lineární algebry. V sekci *A pocket size universe* se hráči mohou zabývat myšlenkou otočení šipky času ve vesmíru tvořeném čtyřmi qubity. V sekci *Linear algebra jutsu* je pak prostřednictvím dvanácti klasických úrovní a čtyř výzev budováno propojení vizuálních představ získaných dříve ve hře s maticovým zápisem hradel a jejich působením na qubity.

Nespornou výhodou je rovněž fakt, že součástí hry je i zabudovaný slovník pojmů, přičemž po rozkliknutí daného pojmu se uživateli zobrazí jeho popis, vysvětlení v rámci herních mechanik i provázání s fyzikální teorií. Další výhodou je i možnost zobrazení maticové reprezentace jednotlivých hradel, což může vést k jejímu propojení s vizuální reprezentací daných hradel. V neposlední řadě hra nabízí možnost editoru, ve kterém si uživatelé mohou sestavit vlastní úlohy či algoritmy.

²V této práci byla použita verze hry 0.9.

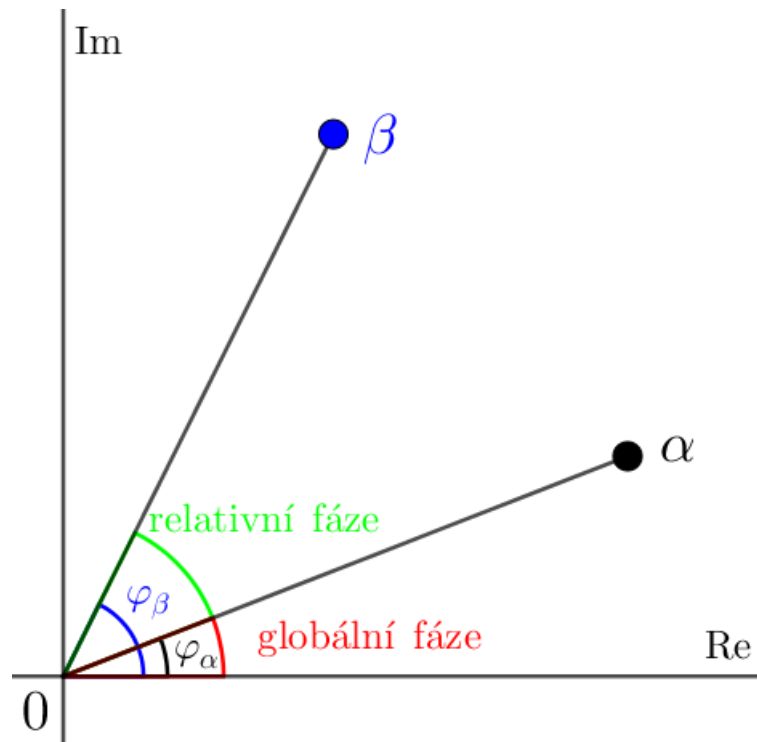
2.3.1 Blochova sféra

Významným konceptem, pomocí kterého je v zabudovaném slovníku pojmů ve hře popsáno působení jednotlivých hradel, je Blochova sféra, která je níže popsána. [32]

Pro reprezentaci stavu jednoho qubitu je využito ortonormálních bázevých stavů $|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ a $|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$. Obecný stav, ve kterém se může qubit nacházet, lze zapsat lineární kombinací těchto stavů $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, kde $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ jsou pravděpodobnostní amplitudy, pro které platí normovací podmínka

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1.$$

Jelikož jsou α a β komplexní čísla, je k popsání daného stavu qubitu zapotřebí čtyř reálných čísel. Pro usnadnění popisu lze zavést fázi komplexního čísla s využitím jeho goniometrického tvaru. Goniometrickým tvarem komplexního čísla $z = a + bi$ se označuje zápis $z = |z|(\cos \varphi + i \sin \varphi)$, přičemž úhel φ se nazývá fáze komplexního čísla z . Dále lze zavést relativní fázi dvou komplexních čísel, která je rovna rozdílu jejich fází. S využitím značení φ_α a φ_β pro fáze komplexních čísel α a β lze určit jejich relativní fázi $\varphi_r = \varphi_\beta - \varphi_\alpha$. Právě relativní fázi mění působení některých z níže uvedených hradel na qubity. Obě pravděpodobnostní amplitudy mají navíc ještě globální fázi, která je společnou částí jejich fází (viz Obrázek 2.5). S využitím téhož značení lze určit globální fázi φ_α . Bez újmy na obecnosti (tj. bez ztráty stavů qubitu) lze volit α jako reálné nezáporné číslo, jelikož popis stavu není jednoznačný. Tato nejednoznačnost je dána skutečností, že vektor po vynásobení nenulovou konstantou stále popisuje tentýž fyzikální stav. Globální fáze je proto nedůležitá.

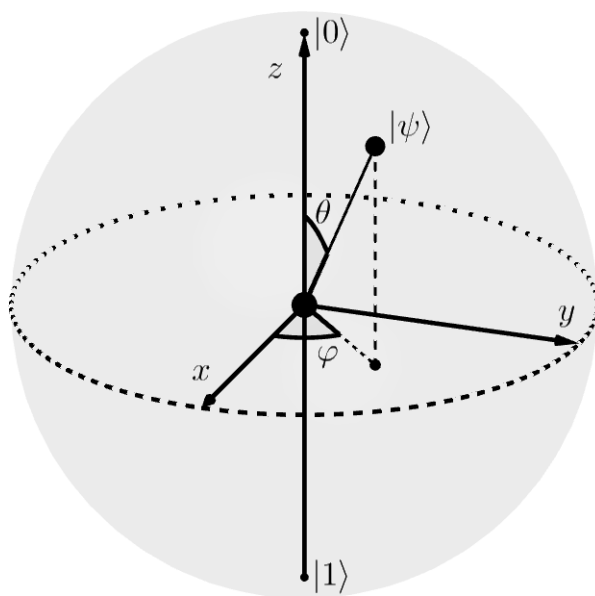


Obrázek 2.5: Relativní a globální fáze komplexních čísel α a β

S těmito fakty lze reprezentovat způsob, jakým je stav qubitu znázorněn na Blochově sféře. Stačí totiž s přihlédnutím k normovací podmínce přejít ke sférickým souřadnicím [33], pomocí kterých lze vyjádřit obecný stav qubitu

$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|0\rangle + e^{i\varphi}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|1\rangle,$$

kde $\theta \in \langle 0, \pi \rangle$ a relativní fáze $\varphi \in \langle 0, 2\pi \rangle$. Každému stavu, ve kterém se může qubit nacházet, lze jednoznačně přiřadit bod na Blochově sféře (viz Obrázek 2.6). Analogicky lze říct, že každý bod na Blochově sféře, odpovídá jistému stavu, v němž se může qubit nacházet.



Obrázek 2.6: Blochova sféra

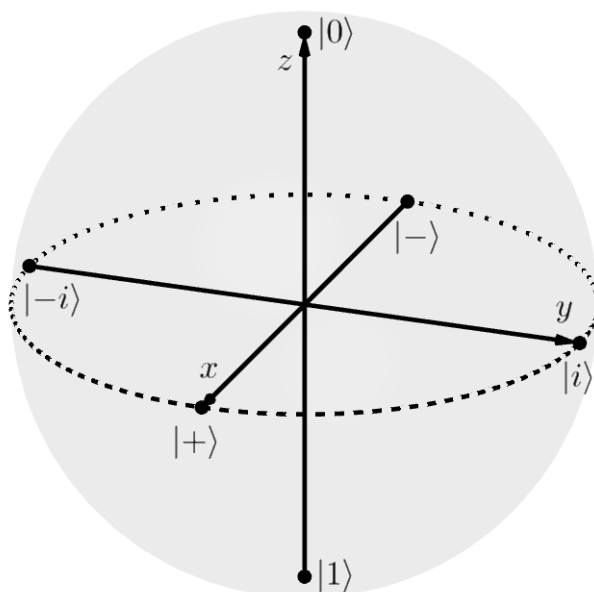
Předposlední část této podkapitoly je věnována dalším významným bázím. Ačkoliv lze volit bázi zcela libovolně (stačí uvažovat libovolnou dvojici protilehlých bodů na Blochově sféře), z hlediska výpočtů je výhodnější volit bázi opatrněji. Stavů $|0\rangle$ a $|1\rangle$ odpovídají průsečíkům osy z s Blochovou sférou (viz Obrázek 2.6). Nabízí se tedy uvažovat průsečíky zbylých dvou os s Blochovou sférou (viz Obrázek 2.7). Pro osu x je zvykem označovat příslušné stavy $|+\rangle$ a $|-\rangle$, pro stavy dané osou y se vžilo označení $|i\rangle$ a $|-i\rangle$. Vzhledem k tomu, že se poslední část první kapitoly hry Quantum Odyssey zabývá transformacemi mezi jednotlivými bázemi na Blochově sféře, je vhodné zde uvést vyjádření stavů těchto bází pomocí stavů $|0\rangle$ a $|1\rangle$:

$$|+\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}(|0\rangle + |1\rangle), \quad |-\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}(|0\rangle - |1\rangle)$$

a

$$|i\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}(|0\rangle + i|1\rangle), \quad |-i\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}(|0\rangle - i|1\rangle).$$

Je zřejmé, že značení těchto stavů odpovídá koeficientu před členem $|1\rangle$ v příslušné lineární kombinaci.



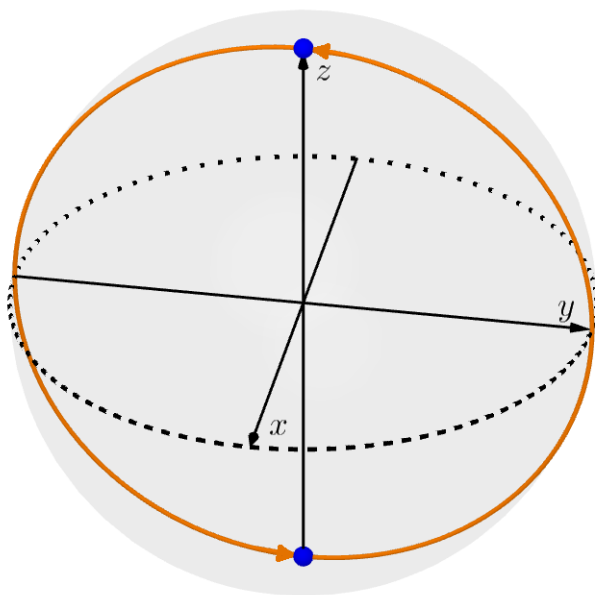
Obrázek 2.7: Poloha stavů z významných bází na Blochově sféře

Samotná hra Quantum Odyssey však nepracuje s čísly, natož s komplexními čísly. Velikosti pravděpodobnostních amplitud jsou ve hře znázorněny pomocí velikosti kuličky reprezentující stav qubitu a fáze pravděpodobnostních amplitud je znázorněna pomocí barvy této kuličky. Qubity v bázových stavech $|0\rangle$ a $|1\rangle$ jsou reprezentovány jednou kuličkou o největší velikosti, přičemž tato kulička může být modrá, zelená, červená či žlutá. Tyto barvy odpovídají po řadě globální fázi 0 , $\frac{\pi}{2}$, π a $\frac{3\pi}{2}$. Stav qubitu $|+\rangle$ je znázorněn dvěma menšími modrými kuličkami, jelikož je zde nulová relativní fáze. Stav $|-\rangle$ je znázorněn dvěma menšími kuličkami, přičemž jedna je modrá a druhá je červená. Toto značení odpovídá relativní fázi π . Stav $|i\rangle$ je znázorněn dvěma menšími kuličkami, přičemž jedna je modrá a druhá je zelená. Toto značení odpovídá relativní fázi $\frac{\pi}{2}$. Stav $|-i\rangle$ je znázorněn dvěma menšími kuličkami, přičemž jedna je modrá a druhá je žlutá. Toto značení odpovídá relativní fázi $\frac{3\pi}{2}$.

Závěrem je nutné poznamenat, že přes veškeré výše zmíněné výhody má model Blochovy sféry i nevýhody. Jednou z nich je omezení pouze na jeden qubit. V případě více qubitů by bylo nutné zvýšit dimenzi bázových vektorů, což je nadále neslučitelné se zobrazením na Blochově sféře. Druhou z nich je pak nemožnost zobrazení globální fáze, kterou však lze zobrazit ve hře Quantum Odyssey.

2.3.2 Kapitola The fundamental laws

V první části této kapitoly provádí hra uživatele aplikací Pauliho X hradla (též X hradlo nebo NOT) na qubity (viz Obrázky 2.8 a 2.9), tj. převedením stavu $|0\rangle$ na stav $|1\rangle$ a naopak. S využitím Blochovy sféry se lze na Pauliho X hradlo dívat jako na rotaci kolem osy x o 180° . Obtížnost úloh postupně roste s nutností přidávat více hradel a s rostoucím počtem qubitů.



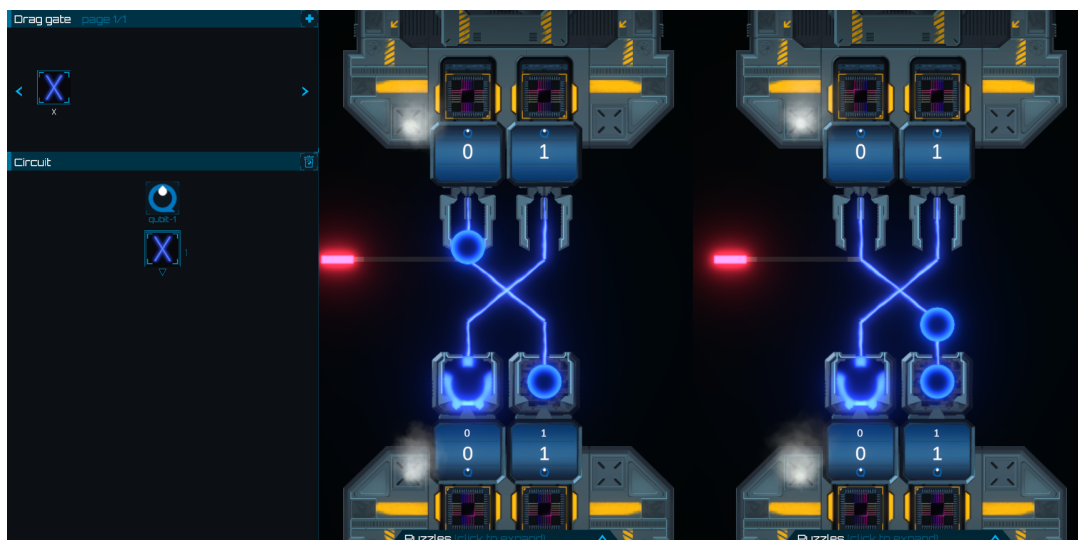
Obrázek 2.8: Působení Pauliho X hradla na stavy qubitu $|0\rangle$ a $|1\rangle$

Oranžové půlkružnice na Obrázku 2.8 znázorňují změnu stavu qubitu při působení Pauliho X hradla.

Matematicky lze vyjádřit působení tohoto hradla na stavy $|0\rangle$ a $|1\rangle$

$$X|0\rangle = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = |1\rangle,$$

$$X|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |0\rangle.$$



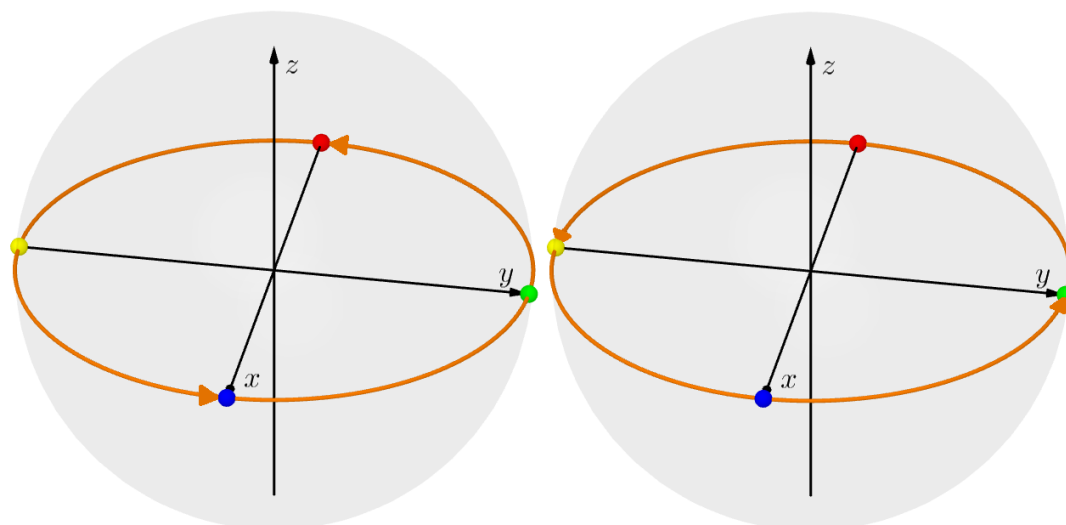
Obrázek 2.9: Působení Pauliho X hradla na qubit ve stavu $|0\rangle$ ve hře Quantum Odyssey [34]

Qubity jsou zde znázorněny pomocí kuliček pohybujících se po světelných paprscích, přičemž každému qubitu přísluší dva paprsky reprezentující stavy $|0\rangle$

a $|1\rangle$. Aplikace Pauliho X hradla je zde znázorněna přesměrováním těchto paprsků tak, aby se z výchozího stavu $|0\rangle$ dostal qubit do koncového stavu $|1\rangle$ a naopak.

Ve druhé části se hráči mohou naučit, jak lze změnit dříve zmíněnou fázi pravděpodobnostních amplitud, která je ve hře reprezentována různými barvami (modrá, zelená, žlutá a červená). Změny fáze lze docílit použitím následujících hradel (a jejich kombinací):

- **Z hradlo** – Je-li stav qubitu $|1\rangle$, změni jeho počáteční fázi z modré na červenou, ze zelené na žlutou, ze žluté na zelenou a z červené na modrou. Stav $|0\rangle$ ponechá toto hradlo beze změny. S využitím Blochovy sféry se lze na Z hradlo dívat jako na rotaci kolem osy z o 180° (viz obrázky 2.10 a 2.11).



Obrázek 2.10: Působení Z hradla na stavy qubitu $|+\rangle$, $|-\rangle$, $|i\rangle$ a $|-i\rangle$

Oranžové půlkružnice na Obrázku 2.10 znázorňují změnu stavu qubitu při působení Z hradla, přičemž působení Z hradla na stavy $|0\rangle$ a $|1\rangle$ způsobí jen změnu globální fáze těchto stavů, která se však na poloze těchto stavů na Blochově sféře neprojeví. Pro ostatní stavy z významných bází způsobí působení Z hradla změnu relativní fáze.

Matematicky lze vyjádřit působení tohoto hradla na stavy $|0\rangle$ a $|1\rangle$

$$Z|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |0\rangle,$$

$$Z|1\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} = -|1\rangle.$$

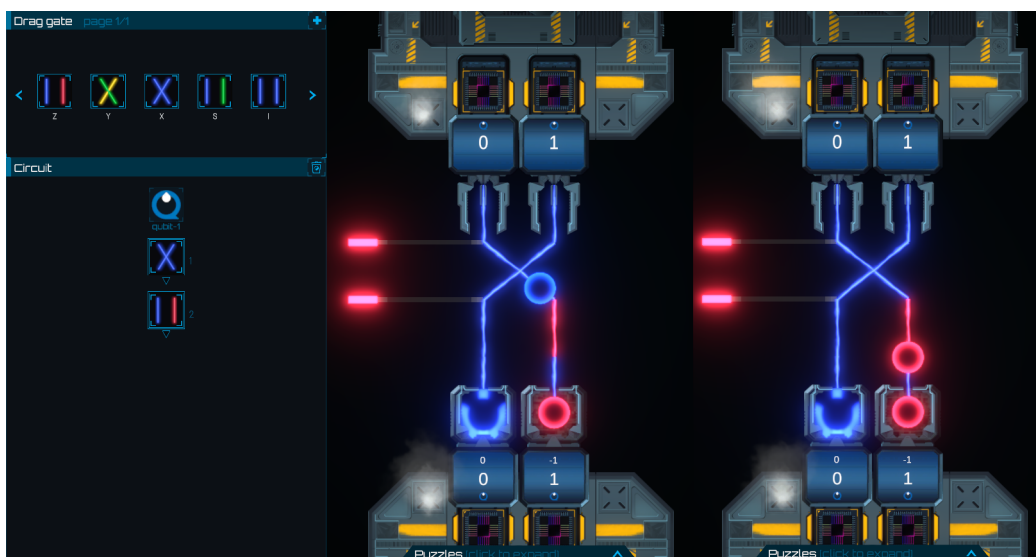
Pro ostatní stavy z významných bází lze vyjádřit působení Z hradla

$$Z|+\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}(Z|0\rangle + Z|1\rangle) = \frac{\sqrt{2}}{2}(|0\rangle - |1\rangle) = |-\rangle,$$

$$Z|-\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}(Z|0\rangle - Z|1\rangle) = \frac{\sqrt{2}}{2}(|0\rangle + |1\rangle) = |+\rangle,$$

$$Z|i\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}(Z|0\rangle + iZ|1\rangle) = \frac{\sqrt{2}}{2}(|0\rangle - i|1\rangle) = |-i\rangle,$$

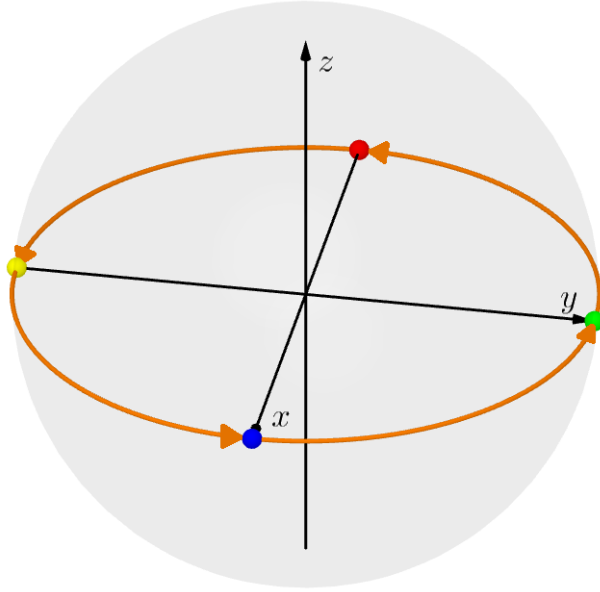
$$Z|-i\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}(Z|0\rangle - iZ|1\rangle) = \frac{\sqrt{2}}{2}(|0\rangle + i|1\rangle) = |i\rangle.$$



Obrázek 2.11: Působení Z hradla na qubit ve stavu $|1\rangle$ ve hře Quantum Odyssey [34]

Pro zobrazení účinku Z hradla na qubit byl nejdříve s využitím Pauliho X hradla převeden do stavu $|1\rangle$. Důležité je uvědomit si, že Z hradlo neznamená obarvení paprsku nebo qubitu na červenou barvu. Jedná se o posun o dvě barvy, nebo-li o posun po půlkružnici (viz Obrázek 2.10).

- **S hradlo** – Je-li stav qubitu $|1\rangle$, změní jeho počáteční fázi z modré na zelenou, ze zelené na červenou, z červené na žlutou a ze žluté na modrou. Stav $|0\rangle$ ponechá toto hradlo beze změny. S využitím Blochovy sféry se lze na S hradlo dívat jako na rotaci kolem osy z o 90° (viz Obrázky 2.12 a 2.13).



Obrázek 2.12: Působení S hradla na stavy qubitu $|+\rangle$, $|-\rangle$, $|i\rangle$ a $|-i\rangle$

Oranžové čtvrtkružnice na Obrázku 2.12 znázorňují změnu stavu qubitu při působení S hradla, přičemž stejně jako u Z hradla dochází ke změně globální fáze při působení tímto hradlem na stavy $|0\rangle$ a $|1\rangle$, což však na Blochově sféře nelze pozorovat. Pro ostatní stavy z významných bází způsobí působení S hradla změnu relativní fáze.

Matematicky lze vyjádřit působení tohoto hradla na stavy $|0\rangle$ a $|1\rangle$

$$S|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |0\rangle,$$

$$S|1\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ i \end{pmatrix} = i|1\rangle.$$

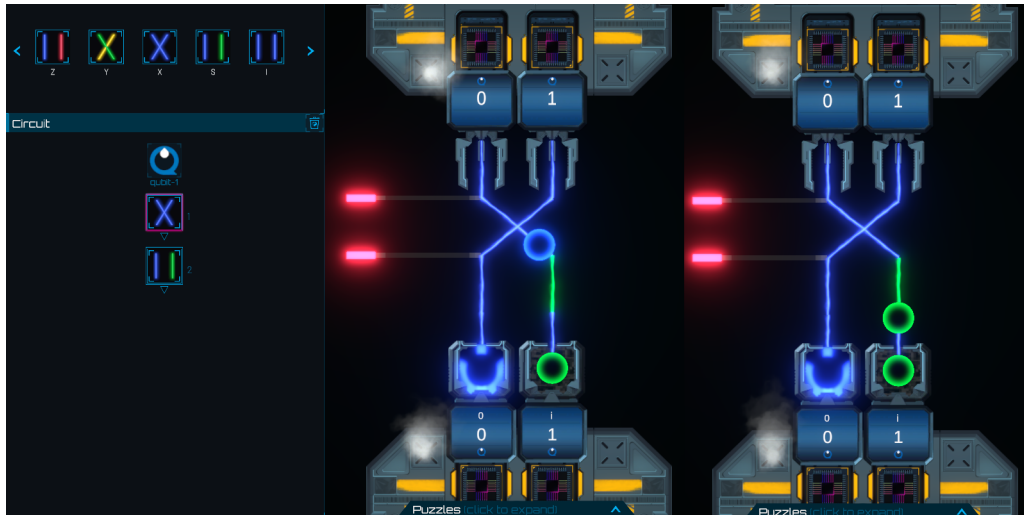
Pro ostatní stavy z významných bází lze vyjádřit působení S hradla

$$S|+\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}(S|0\rangle + S|1\rangle) = \frac{\sqrt{2}}{2}(|0\rangle + i|1\rangle) = |i\rangle,$$

$$S|-\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}(S|0\rangle - S|1\rangle) = \frac{\sqrt{2}}{2}(|0\rangle - i|1\rangle) = |-i\rangle,$$

$$S|i\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}(S|0\rangle + iS|1\rangle) = \frac{\sqrt{2}}{2}(|0\rangle - |1\rangle) = |-\rangle,$$

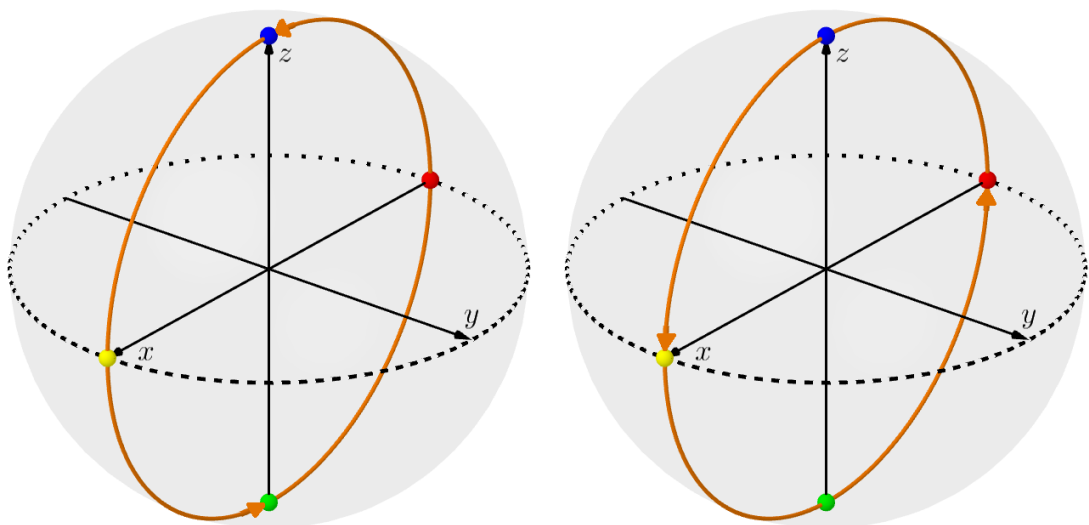
$$S|-i\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}(S|0\rangle - iS|1\rangle) = \frac{\sqrt{2}}{2}(|0\rangle + |1\rangle) = |+\rangle.$$



Obrázek 2.13: Působení S hradla na qubit ve stavu $|1\rangle$ ve hře Quantum Odyssey [34]

Pro zobrazení účinku S hradla na qubit byl nejdříve s využitím Pauliho X hradla převeden do stavu $|1\rangle$. Důležité je uvědomit si, že S hradlo neznamena obarvení paprsku nebo qubitu na zelenou barvu. Jedná se o posun o jednu barvu, nebo-li o posun po čtvrtkružnici (viz Obrázek 2.12). Stejně jako u Z hradla lze ve hře Quantum Odyssey pozorovat změnu globální fáze.

- **Y hradlo** – Je-li stav qubitu $|0\rangle$, převede jej na stav $|1\rangle$ a zároveň změní jeho počáteční fázi z modré na zelenou, ze zelené na červenou, z červené na žlutou a ze žluté na modrou; je-li stav qubitu $|1\rangle$, změní jej na stav $|0\rangle$ a zároveň změní jeho počáteční fázi z modré na žlutou, ze žluté na červenou, z červené na zelenou a ze zelené na modrou. S využitím Blochovy sféry se lze na Y hradlo dívat jako na rotaci kolem osy y o 180° (viz Obrázky 2.14 a 2.15).



Obrázek 2.14: Působení Y hradla na stavy qubitu $|0\rangle$, $|1\rangle$, $|+\rangle$ a $|-\rangle$

Oranžové půlkružnice na Obrázku 2.14 znázorňují změnu stavu qubitu při působení Y hradla, přičemž podobně jako u výše zmíněných hradel dochází ke změně globální či relativní fáze při působení tímto hradlem. Rozdílem je, že ke změně relativní fáze dochází pouze při působení na stavy $|+\rangle$ a $|-\rangle$. Pro ostatní stavy z významných bází způsobí působení Y hradla změnu globální fáze.

Matematicky lze vyjádřit působení tohoto hradla na stavy $|0\rangle$ a $|1\rangle$

$$Y|0\rangle = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ i \end{pmatrix} = i|1\rangle,$$

$$Y|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -i \\ 0 \end{pmatrix} = -i|0\rangle.$$

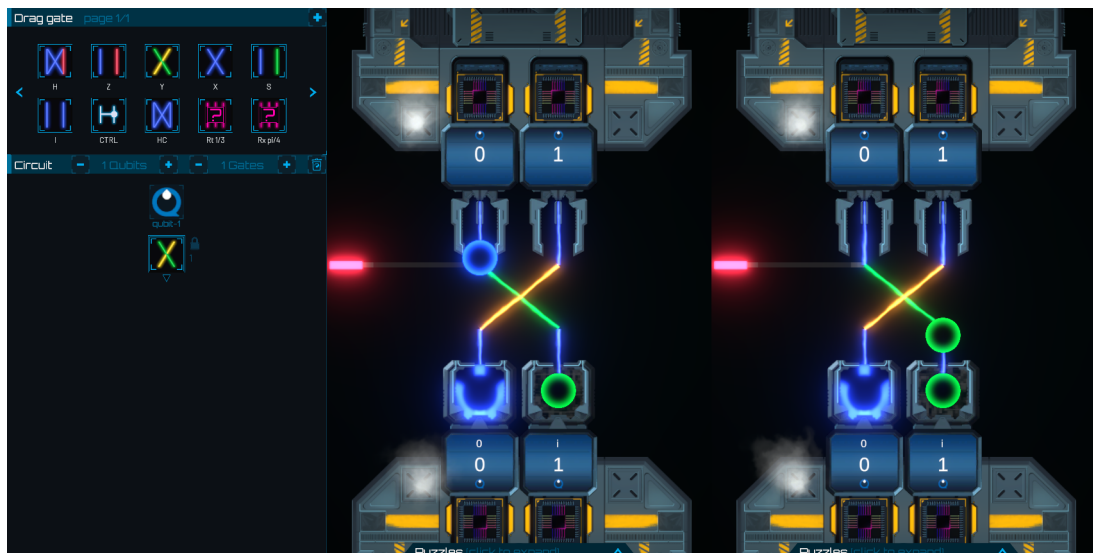
Pro ostatní stavy z významných bází lze vyjádřit působení Y hradla

$$Y|+\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}(Y|0\rangle + Y|1\rangle) = \frac{\sqrt{2}}{2}(i|1\rangle - i|0\rangle) = -i|-\rangle,$$

$$Y|-\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}(Y|0\rangle - Y|1\rangle) = \frac{\sqrt{2}}{2}(i|1\rangle + i|0\rangle) = i|+\rangle,$$

$$Y|i\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}(Y|0\rangle + iY|1\rangle) = \frac{\sqrt{2}}{2}(i|1\rangle + |0\rangle) = |i\rangle,$$

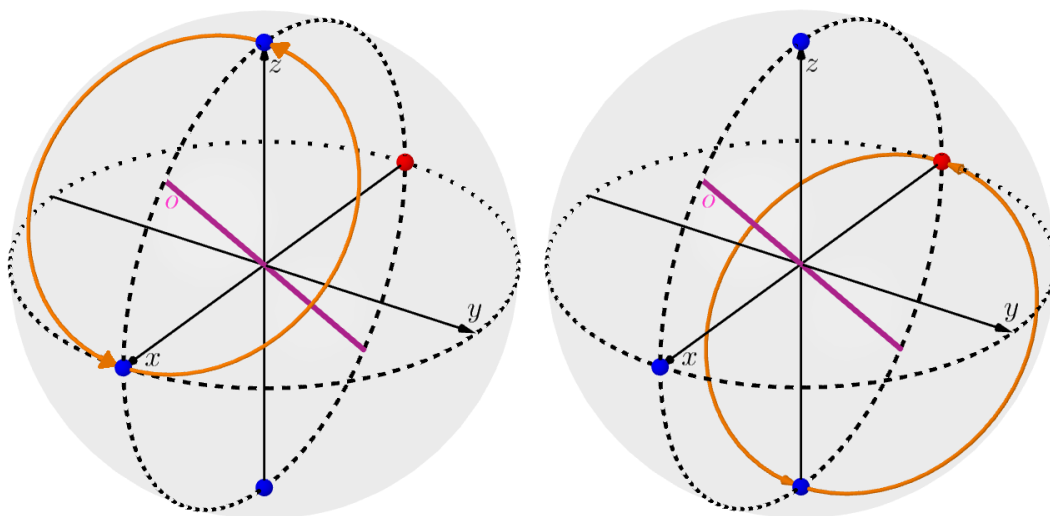
$$Y|-i\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}(Y|0\rangle - iY|1\rangle) = \frac{\sqrt{2}}{2}(i|1\rangle - |0\rangle) = -|-i\rangle.$$



Obrázek 2.15: Působení Y hradla na qubit ve stavu $|0\rangle$ ve hře Quantum Odyssey [34]

Y hradlo je složením převodu mezi stavy $|0\rangle$ a $|1\rangle$ a fázového posunu. Při přechodu ze stavu $|0\rangle$ na stav $|1\rangle$ dojde k posunu o jednu barvu. Naopak při přechodu ze stavu $|1\rangle$ na stav $|0\rangle$ dojde k posunu o tři barvy.

Ve třetí části jsou hráči seznámeni s rozdíly mezi klasickou pravděpodobností a principem superpozice. Ta je zde představena s využitím Hadamardova hradla, které se často označuje jako H hradlo (viz Obrázky 2.16 a 2.17). Při aplikaci tohoto hradla na qubit ve stavu $|0\rangle$ dochází ke změně stavu na superponovaný, přičemž fáze i pravděpodobnosti stavů $|0\rangle$ a $|1\rangle$ jsou totožné. Aplikujeme-li jej však na qubit ve stavu $|1\rangle$, dojde ke změně stavu na superponovaný, přičemž pravděpodobnosti jsou opět totožné, avšak fáze stavů $|0\rangle$ a $|1\rangle$ jsou opačné. Fáze stavu $|1\rangle$ se změní z modré na červenou, z červené na modrou, ze zelené na žlutou a ze žluté na zelenou. S využitím Blochovy sféry se lze na Hadamardovo hradlo dívat jako na rotaci o 180° kolem osy prvního a třetího kvadrantu v rovině xz . Pro přehlednost je tato osa o zvýrazněna fialově.



Obrázek 2.16: Působení Hadamardova hradla na stavy qubitů $|0\rangle$, $|1\rangle$, $|+\rangle$ a $|-\rangle$

Oranžové půlkružnice na Obrázku 2.16 znázorňují změnu stavu qubitů při působení Hadamardova hradla.

Matematicky lze vyjádřit působení tohoto hradla na stavy $|0\rangle$ a $|1\rangle$

$$H|0\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} (|0\rangle + |1\rangle) = |+\rangle,$$

$$H|1\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} (|0\rangle - |1\rangle) = |-\rangle.$$

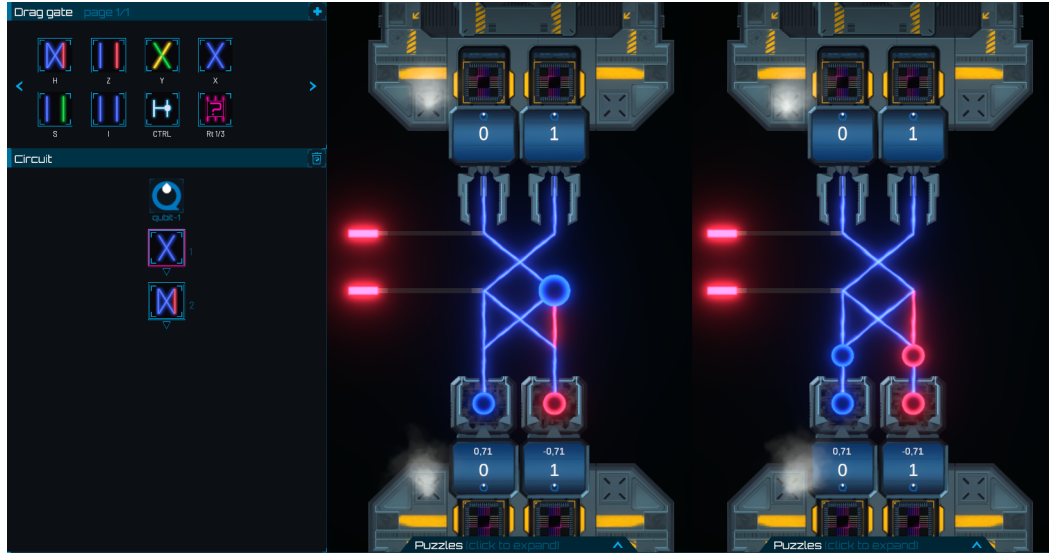
Pro ostatní stavy z významných bází lze vyjádřit působení Hadamardova hradla

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

$$H|-\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2} (H|0\rangle - H|1\rangle) = \frac{1}{2} (|0\rangle + |1\rangle - |0\rangle + |1\rangle) = |1\rangle,$$

$$H|i\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}(H|0\rangle + iH|1\rangle) = \frac{1}{2}(|0\rangle + |1\rangle + i|0\rangle - i|1\rangle) = |-i\rangle,$$

$$H|-i\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}(H|0\rangle - iH|1\rangle) = \frac{1}{2}(|0\rangle + |1\rangle - i|0\rangle + i|1\rangle) = |i\rangle,$$



Obrázek 2.17: Působení Hadamardova hradla na qubit ve stavu $|1\rangle$ ve hře Quantum Odyssey [34]

Pro zobrazení účinku Hadamardova hradla na qubit ve stavu $|1\rangle$ bylo nejdříve využito Pauliho X hradlo. Důležité je uvědomit si, že působení Hadamardova hradla na qubit ve stavu $|1\rangle$ neznamena rozdění kuličky a obarvení jedné z nich na červenou barvu. Jedná se o vytvoření superponovaného stavu, přičemž dojde k posunu fáze stavu $|1\rangle$ o dvě barvy, nebo-li k posunu po půlkružnici (viz Obrázek 2.16). Při aplikaci tohoto hradla na qubity v superponovaném stavu mohou být výstupem qubity v básových stavech $|0\rangle$ či $|1\rangle$, ale také qubity v superponovaném stavu s odlišnými pravděpodobnostními amplitudami.

Dále v této části hra představuje fenomén kvantového provázání, který je zde zaveden jako kvantová verze klasické korelace. Hráči jej mohou vytvořit použitím kontrolovaného X hradla (též CNOT, kontrolované NOT nebo XOR). K vytvoření tohoto dvouqubitového hradla ve hře je zapotřebí aplikovat „hradlo“ CTRL na tzv. kontrolní qubit a X hradlo na tzv. cílový qubit. Je-li stav kontrolního qubitu $|1\rangle$, dojde ke změně hodnoty cílového qubitu. Je-li však stav kontrolního qubitu $|0\rangle$, nemá hradlo CNOT na cílový qubit žádný efekt. Analogicky je pak hráči představeno kontrolované Z hradlo.

Ostatní části první kapitoly jsou již pokročilejší a nebyly při praktické části využity, proto jsou zde pouze stručně popsány. Čtvrtá část se v devatenácti základních úrovních a v devíti výzvách zabývá Bellovými stavy, GHZ stavem a W stavem. Hráči si zde mohou osvojit popis těchto stavů a následně si je mohou sami vytvořit. Pátá část je tvořena sedmnácti základními úrovněmi a devíti

výzvami, které jsou věnovány zavedení a práci s hradlem SWAP. V závěrečné části jsou pak v patnácti základních úrovních a deseti výzvách představeny transformace jednotlivých bází na Blochově sféře.

2.3.3 Souvislosti hry Quantum Odyssey s kvantovou fyzikou a zhodnocení jejich zobrazení

Průchod hráče hrou je průběžně doplňován komentáři. Nad každým paprskem je uvedeno číslo 0, 1 či jejich kombinace v případě více qubitů. Ve hře je sice na začátku řečeno, že tato čísla označují příslušné stavy, hodilo by se však místo čísel využít notaci, která je nezaměnitelně spojená s označením stavu (např. Diracova notace). Hrozí totiž záměna označení stavu a hodnoty. V tom případě by mohli uživatelé nabýt dojmu, že třeba v superponovaném stavu je příslušná hodnota např. 0,4, což je nesmysl.

Jednotlivá hradla jsou zde znázorněna s využitím ikon, které výstižně ukazují, co s daným qubitěm jejich aplikace udělá. Navíc jsou tyto ikony doplněny názvy daných hradel. K jejich aplikaci na qubity je třeba umístit daná hradla do schématu obvodu, kde jsou na ně připravena volná místa. Oddělení ovládací části od znázornění celého obvodu je velmi vhodné a celkový obraz tak dává jasnou představu o tom, kterou část obvodu uživatel zrovna ovládá.

Ke znázornění fází pravděpodobnostních amplitud a jejich změn prostřednictvím hradel využívá hra čtyři různé barvy. V zabudovaném slovníku pojmů nabízí hra teoretické vysvětlení s využitím Blochovy sféry, ale i jednodušší barevné schéma reprezentující příslušné změny. Toto zjednodušení je přehledné a snáze pochopitelné obzvláště v případě, že uživatel nemá zkušenosti s Blochovou sférou.

V případě znázornění superponovaného stavu jednoho qubitě je původní kulička rozdělena na dvě menší, přičemž každá se pohybuje po jiném paprsku. Tímto zmenšením velikosti kuličky je znázorněna menší pravděpodobnost naměření qubitě v každém z daných stavů. Podobně je tomu i v případě vícequbitového systému. Toto zmenšování při přechodu do superponovaného stavu je velmi snadno pochopitelná myšlenka, se kterou lze i nadále bez potíží pracovat. Jedinou chybou grafické stránky hry je skutečnost, že v některých úrovních, využívajících čtyř a více qubitů, se mohou kuličky reprezentující qubity zmenšit natolik, že je lze těžko rozeznat od paprsků reprezentujících jednotlivé stavy. Toto je obzvláště obtížné, pokud navíc tyto qubity nemají změněnou fázi. V tom případě se totiž jedná o miniaturní modrou kuličku, která má na pozadí modrý paprsek.

2.4 Psi and Delta

Psi and Delta je online hra [35], jejíž vývoj stále probíhá za účasti Georgijského technického institutu za účelem podpory středoškolské a vysokoškolské výuky základů kvantové fyziky. Hlavními výhodami této hry oproti Quantum Odyssey jsou cena a dostupnost. Tato hra je totiž zdarma a není nutné ji instalovat. Nevýhodou je pak skutečnost, že je stále ve vývoji. Prozatím totiž svým uživatelům nabízí pouze patnáct jednoduchých úrovní, přičemž zbylé úrovně zatím nelze odemknout.

O kvalitách této hry vypovídá nejen účast odborníků na jejím vývoji, ale i kvalitativní výzkum [12] provedený s vysokoškolskými studenty fyziky a astronomie. Zde se ukázalo, že všichni zapojení studenti uvítali zkušenost s touto hrou, protože jim přinesla představu o tom, co by se mohlo učit v kurzu kvantové mechaniky. Zároveň uváděli, že hra byla efektivním nástrojem pro představení základů kvantové mechaniky. Nicméně dále uvedli, že potřebují další vysvětlení pro prohloubení svých znalostí. [36]

V první části hra seznamuje hráče s významem pravděpodobnosti určení polohy elektronu v daném intervalu coby obsahu plochy pod grafem hustoty pravděpodobnosti, principem superpozice a měřením. Ten je ve hře představen na stavu s neostrou hodnotou polohy. Měřením se zredukuje vlnová funkce takovým způsobem, že systém přejde do stavu s ostrou hodnotou polohy. Druhá část je zaměřena na seznámení hráčů s energetickými hladinami elektronu a vlivem dopadajících fotonů s danou hodnotou energie na tyto hladiny.

2.4.1 Cíl hry

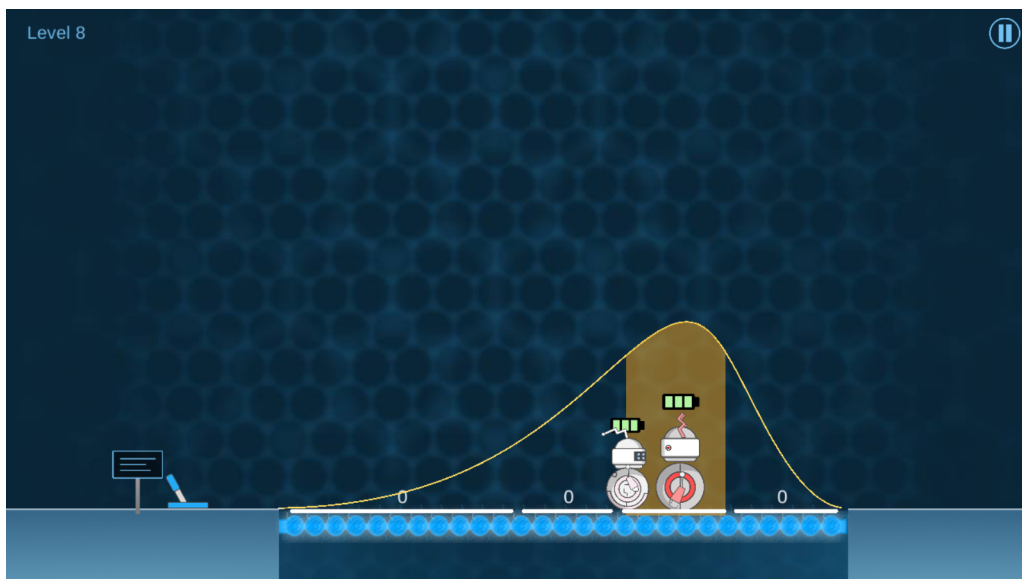
Hru Psi and Delta je možné hrát samostatně či ve verzi pro dva hráče. Jelikož jsou obě verze konceptuálně totožné, bude zde dále rozvedena samostatná varianta.

Hráč se zde ujímá role robota, jehož úkolem je porazit nepřítele. Toho lze docílit zasažením nepřátelského robota. Pokud se oba roboti dotknou nebo je hráčův robot zasažen, ztratí část svého zdraví. Pokud přijde o celé, kolo se restartuje.

2.4.2 První část

V prvních devíti úrovních hry jsou hráčům představeny koncepty superpozice, měření, pravděpodobnosti a hustoty pravděpodobnosti (viz Obrázek 2.18). Princip superpozice je zde představen na modelu kvantového drátu, v němž je elektron v superponovaném stavu. Zatažením za páku hráč provede měření, což má za následek kolaps superponovaného stavu elektronu do náhodné pozice v kvantovém drátu. Každý robot stojící na platformě nad tímto elektronem je pak zasažen.

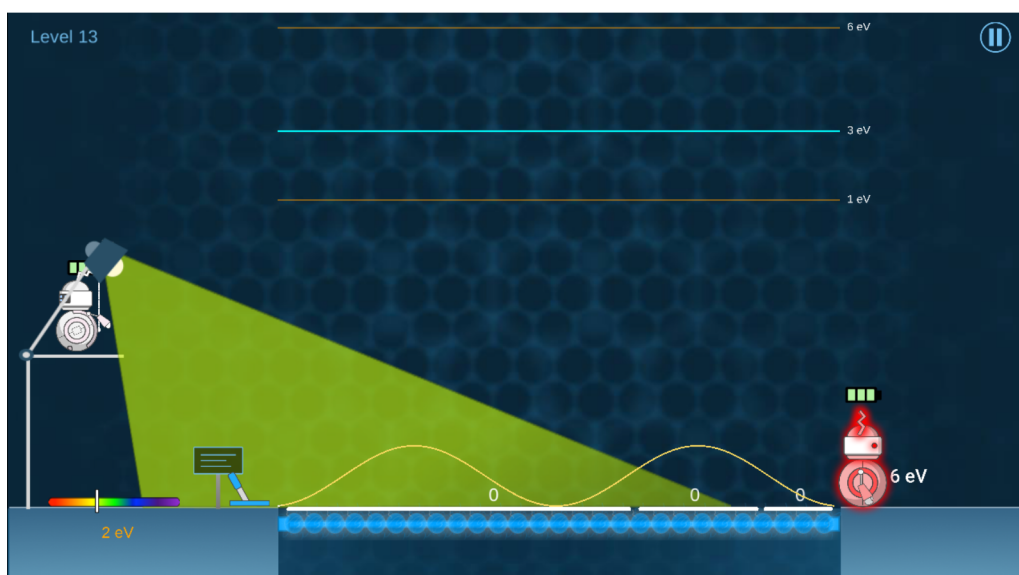
Pozice, do níž elektron zkolabuje je náhodná a řídí se hustotou pravděpodobnosti. Její průběh je ve hře zakreslen oranžovou barvou. Rovněž je zobrazena plocha pod touto křivkou, což odpovídá pravděpodobnosti nalezení elektronu pod danou platformou. Čím delší je platforma a čím vyšší je hustota pravděpodobnosti, tím větší je samotná pravděpodobnost. Po dokončení měření se elektron vrací do superponovaného stavu a hra pokračuje.



Obrázek 2.18: Průběh hustoty pravděpodobnosti a pravděpodobnost nalezení elektronu ve hře Psi and Delta [35]

2.4.3 Druhá část

Ve druhé části jsou hráčům představeny energetické hladiny elektronu (viz Obrázek 2.19). K „vyšokování“ nepřátelského robota nyní nestačí dříve zažitý postup, jelikož robot má nyní ochranný štít, k jehož překonání je třeba zvýšit energii elektronu. Ta může nabývat pouze diskrétních hodnot. Dodání energie je zde znázorněno posvícením lampou na kvantový drát, přičemž je třeba zvolit vhodnou barvu světla tak, aby jeho fotony měly přesně energii potřebnou pro přechod elektronu z jedné hladiny na druhou.



Obrázek 2.19: Znázornění energetických hladin a změny barvy světla ve hře Psi and Delta [35]

2.4.4 Souvislosti hry Psi and Delta s kvantovou fyzikou a zhodnocení jejich zobrazení

Prvním konceptem představeným v této hře je superponovaný stav. Ten je zde znázorněn pomocí kvantového drátu, ve kterém je poloha elektronu právě v superponovaném stavu. Grafické znázornění dává poměrně jasnou představu o tomto fenoménu. Nicméně komentář ve druhém levelu je celkem nepřesný. Říká, že se elektron jakoby nachází na více pozicích najednou, tedy v superpozici. Zde by se hodilo zdůraznit, že se jedná nikoliv o pozici, ale o pravděpodobnost toho, že elektron naměříme na dané pozici.

Tím se dostáváme k samotnému měření. To je zde zobrazeno velmi vhodně pomocí pravděpodobnosti naměření elektronu pod jednotlivými platformami a nikoli v konkrétním místě. Je zde tedy nepřímo naznačen i fakt, že ptát se na pravděpodobnost naměření elektronu má smysl pouze pro interval. Výraznou nepřesností v této hře je návrat elektronu do superponovaného stavu po dokončení měření. Zároveň je zde po celou dobu zobrazen průběh hustoty pravděpodobnosti. Vhodné by bylo odlišit elektrony v jednotlivých měřeních např. barevně, protože jinak to může vést k myšlence, že měření neovlivní stav systému. O této skutečnosti je nutné žáky informovat.

Dále hra představuje koncept hustoty pravděpodobnosti a význam obsahu pod jejím grafem. Zde není co vytknout, provedeme-li dostatečný počet měření. Nicméně při deseti měřeních (tento počet je zadán v šestém levelu) jsou výtky na místě. S tak malým počtem měření na velmi širokých intervalech je téměř nemožné, aby žáci něco odhadli. V tomto případě je nutné žáky nasměrovat k provedení většího počtu měření, aby se mohli přesvědčit, že se četnosti měření na jednotlivých platformách opravdu řídí danou funkcí. Samotná pravděpodobnost je pak dále korektně zobrazena jako obsah pod grafem dané funkce. Hodilo by se poznamenat, že celkový obsah musí být jednotkový, mají-li být pokryty všechny možnosti.

Ve druhé části hry jsou představeny diskrétní energetické hladiny elektronu. K vybuzení na vyšší hladinu musí hráč posvítit na kvantový drát, čímž excituje elektrony na vyšší energetickou hladinu. Zároveň se při vybuzení změní tvar hustoty pravděpodobnosti. Zde by bylo vhodné zmínit pohled na světlo jako proud fotonů. Právě skrze jejich energii při dané vlnové délce je zde uvažováno dodání energie pomocí různých barev světla. Opět by se pak hodilo zmínit, že obsah pod grafem hustoty pravděpodobnosti by měl zůstat jednotkový.

Závěrem bych poznamenal, že tuto hru považuji za velmi názornou a že s několika komentáři v průběhu hraní by mohla být skvělým prostředkem pro představení konceptů kvantové fyziky. Rovněž oceňuji strukturu připravených levelů, jelikož postupují od nejjednodušších po nejsložitější a zároveň na sebe vhodně navazují.

2.5 Quantum Game and Virtual Lab by Quantum Flytrap

Quantum game [37] a Virtual Lab [38] jsou volně dostupné webové aplikace vytvořené společností Quantum Flytrap. Jedná se o virtuální model optické lavičky, přičemž Quantum Game slouží k představení herních prvků a mechanik pomocí předem předpřipravených úkolů k řešení. Získané znalosti potom uživatelé následně využijí při samostatném prozkoumávání a vytváření vlastních modelů ve Virtual Lab.

Virtual Lab by Quantum Flytrap je nástupcem hry Quantum Game with Photons, která byla vybrána jako nejlepší hra v oblasti herního přístupu ke kvantové teorii v časopisu The Quantum Times. O kvalitách hry Virtual Lab svědčí i skutečnost, že byla používána při výuce na Oxfordské a Stanfordské univerzitě. [17] Další významné zmínky o této hře pocházejí z několika významných publikací zabývajících se kvantovou mechanikou a gramotností v oblasti kvantové fyziky. [39–41]

2.5.1 Quantum Game

V šesti částech jsou zde představeny základní ovládací prvky, které jsou dále využity i ve Virtual Lab. Cílem hry je uspořádat herní elementy tak, aby detektory zachytily požadované procentuální množství fotonů vyslaných ze zdroje. Přitom je nutné, aby nedošlo ke kontaktu vyslaných fotonů s minami. Pokud k tomu dojde, úroveň začíná od začátku.

V první části si hráči vyzkouší práci s detektory, zrcadly a polopropustnými zrcadly. Nově je jim zde představen nelineární krystal beta boritanu barnatého (viz Obrázek 2.20), který generuje provázané částice v Bellově singletním stavu. Ten lze pro částice A a B zapsat ve tvaru

$$|\Psi-\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2} (|0\rangle_A \otimes |1\rangle_B - |1\rangle_A \otimes |0\rangle_B),$$

kde indexy značí příslušnou částici a symbol \otimes označuje tenzorový součin. Tento singletní stav je asymetrický vůči záměně částic.

Druhá část je zaměřena na práci s polopropustnými zrcadly, přičemž nově je zde představen generátor tří vzájemně provázaných částic v GHZ stavu. Ten lze pro tři provázané částice A, B a C zapsat ve tvaru

$$|GHZ\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2} (|0\rangle_A \otimes |0\rangle_B \otimes |0\rangle_C + |1\rangle_A \otimes |1\rangle_B \otimes |1\rangle_C).$$

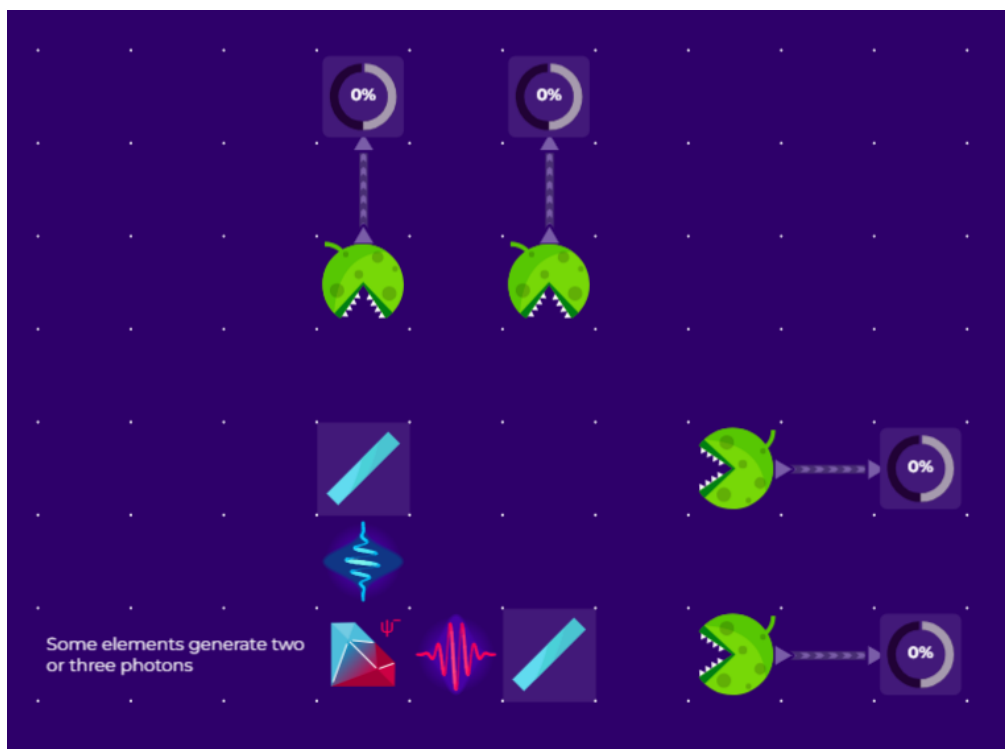
Zvláštností tohoto stavu je, že při odstranění jedné z částic přestanou být zbylé dvě provázané.

Úrovně ve třetí části předkládají situace, k jejichž vyřešení je nutné využít interferenci. Hojně je zde využíváno polopropustných zrcadel a skleněných destiček. Nově je zde představen nedestruktivní detektor fotonů, který je sice nepohltí, nicméně stále dochází k redukci jejich vlnové funkce.

Ve čtvrté části pracují hráči s lineárními polarizátory, s opticky aktivním cukerným roztokem s polarizačními děliči svazku a s Faradayovým rotátorem, který využívá magneto-optického efektu.

Pátá část je zaměřena na kvantové provázání, přičemž kromě dříve zmíněných herních prvků jsou zde nově využita logická hradla XOR, AND a kvantové hradlo CNOT.

V závěrečné šesté části jsou pak modelovány vybrané skutečné experimenty a jevy, které si mohou uživatelé v tomto prostředí vyzkoušet namodelovat a prozkoumat tak jejich princip (např.: Sagnacův interferometr).

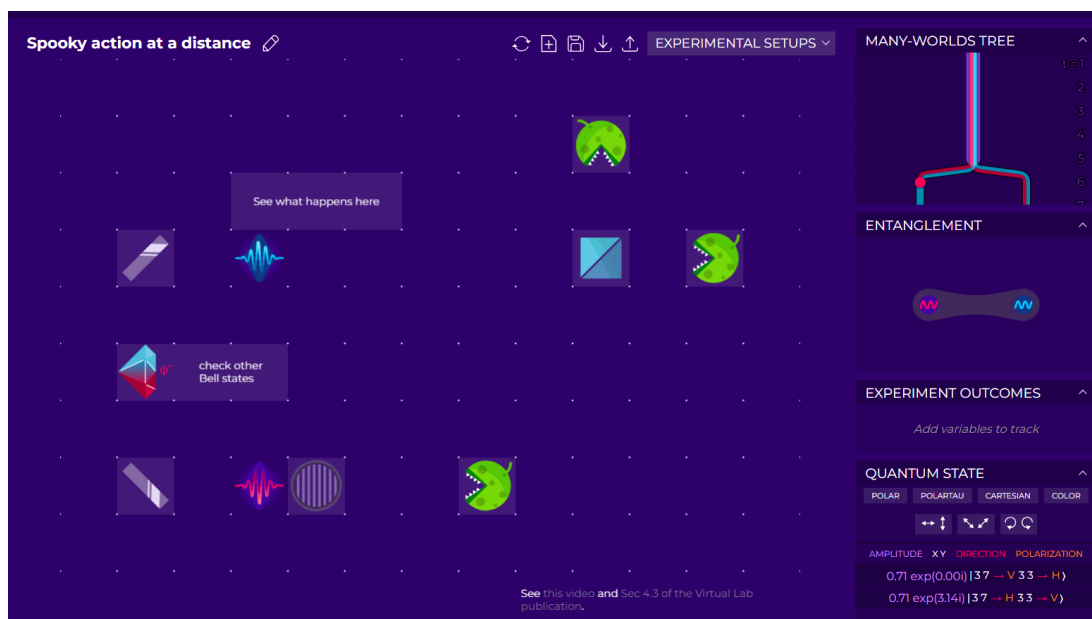


Obrázek 2.20: Generátor provázaných částic v Bellově singletním stavu [42]

2.5.2 Virtual Lab

Ve Virtual Lab mají hráči svobodu tvořit a zkoumat, co sami chtějí. Mají zpřístupněny veškeré herní elementy (zrcadla, detektory, vlnové destičky, zdroje provázaných částic, klasická i kvantová hradla,...), u kterých mají nově možnost libovolně měnit jejich parametry po kliknutí pravým tlačítkem na příslušný herní prvek. Dále si zde mohou hráči nově zvolit, zda se jim budou fotony zobrazovat ve formě paprsku, vln nebo zda se bude pouze zaznamenávat detekce fotonů na příslušných elementech. V pravé části jsou různá zobrazení průběhu, výsledku a stavu experimentu. Prvním popisem je diagram znázorňující průběh pokusu v mnohasvětové interpretaci. Dále je zde zobrazeno případné provázání částic. Posledním popisem je vyjádření stavu pomocí Diracovy notace (viz Obrázek 2.21).

Rovněž zde mohou hráči prozkoumat předem připravené pokusy v záložce *Experimental Setups*. Na výběr mají z více než tisíce veřejně sdílených a dvaceti autory připravených experimentů zaměřených mimo jiné na měření, např.: Spooky action at distance (viz Obrázek 2.21), a kvantovou kryptografii, např.: BB84 protocol.



Obrázek 2.21: Experiment Spooky action at distance ve Virtual Lab [43]

2.5.3 Souvislosti Quantum Game and Virtual Lab by Quantum Flytrap s kvantovou fyzikou a zhodnocení jejich zobrazení

Quantum Game provádí hráče herními mechanismy klasicky od nejjednodušších po nejsložitější. Levely jsou rozvrženy do šesti částí, přičemž obsahem odpovídají jednomu většímu tématickému celku. Jedinou nevýhodou tohoto uspořádání je skutečnost, že mezi levely nelze libovolně přecházet, protože nejsou všechny od začátku přístupné. K odemčení nového levelu musí uživatel úspěšně vyřešit buď level předcházející nebo ten s pořadovým číslem o dvě menším. Tímto způsobem tedy lze přeskočit problematickou úroveň, ale v situaci dvou problematických úloh za sebou hráč nemůže pokračovat dál a zbytek hry mu zůstane skryt.

Za velmi vhodné lze považovat zabudované vysvětlivky jednotlivých herních prvků a jejich propojení s fyzikální teorií. Tento popis si lze přečíst po kliknutí pravým tlačítkem na příslušný herní prvek. Dále jsou zde doplněny odkazy na anglickou Wikipedii, publikované články na dané téma a velmi často zde lze nalézt odkazy na YouTube, kde si hráč může pustit video o dané problematice. Rovněž je zde k nahlédnutí maticová reprezentace daných prvků.

Celé prostředí těchto her je vysoce intuitivní, čemuž napomáhá i fungování na principu *drag and drop* (tj. „táhni a pusť“). Znázornění fotonů třemi různými způsoby je rovněž velmi vhodné, jelikož lze porovnat různé reprezentace a pro danou úlohu vybrat tu, která je nejvhodnější. Další výhodou je možnost pracovat se třemi různými fotony zároveň.

Vhodně zobrazené je zde vytváření superponovaného stavu. Toho zde lze dosáhnout s využitím např. nepolarizačního děliče svazku. Po průchodu tímto děličem vzniknou dva svazky, jejichž intenzita se sníží na polovinu. Takto je zobrazena padesátiprocentní pravděpodobnost odrazu a padesátiprocentní pravděpodobnost průchodu. Dalším zobrazeným fenoménem je kvantové provázání. Toho lze docílit s využitím generátoru provázaných částic, např. nelineárního krystalu

beta boritanu barnatého. Tyto fotony jsou zde znázorněny blikajícími vlnovými balíky. (viz Obrázek 2.20). Nevýhodou tohoto znázornění je, že při současném použití více krystalů není jasné, které dvojice částic jsou provázané. To lze poznat pouze podle krystalu, který je vytvořil. V neposlední řadě lze vyzdvihnout znázornění polarizace jednotlivých fotonů. Ta je zde zobrazena pomocí otáčení vlnového balíku podél osy, která je totožná se směrem pohybu fotonu.

Za připomínku stojí popis jednoho z herních prvků. Konkrétně se jedná o ne-destruktivní detektor fotonů, u kterého je uvedeno, že sice nepohlí procházející foton, ale i tak jsou zde následky. O jakých následcích tento popis mluví není nikde popsáno a hráči si tak sami musí přijít na to, že tento detektor s jistotou určí, zda jím foton prošel či nikoliv a ovlivní tak pravděpodobnostní chování fotonu. Lze říct, že tímto způsobem je zde zobrazeno měření v superponovaném stavu.

3. Praktická část

Praktická část této práce je zaměřena na ověření použitelnosti výše popsaných her a aktivit s herními prvky při rozšiřování povědomí o principech kvantové fyziky. Testování těchto her se žáky probíhalo od 12. 3. 2024 do 14. 6. 2024.

3.1 Popis šetření

Hlavním cílem šetření bylo ověřit, zda jsou vybrané kvantové hry vhodným prostředkem, pomocí kterého lze předávat informace a zvyšovat povědomí o základních principech kvantového popisu světa. Dílčími cíli bylo zjistit názor žáků na samotné hry a určit, zda tyto hry ovlivnily zájem žáků o kvantovou fyziku.

Hlavní metodou použitou ke sběru dat byl elektronický dotazník, který žáci vyplňovali anonymně. Všechny dotazníky [44–47] byly vytvořeny s využitím Google Forms. Každý dotazník tvořilo pět povinných otázek a jedna nepovinná otázka, ve které mohli žáci uvést libovolné komentáře či připomínky. Jedna z povinných otázek byla otevřená, zbylé čtyři otázky byly uzavřené. Všechny dotazníky jsou obdobné. První odlišnost tvoří uzavřená třetí otázka. Ta se liší u hry Entanglion, kde je vynecháno hodnocení ovládacích prvků, jelikož tato otázka u deskové hry nedává smysl. Druhou odlišnost tvoří uzavřená čtvrtá otázka, která se liší z důvodu dostupnosti daných her. Pro zdarma přístupné hry se otázka týká opakovaného hraní mimo vyučovací hodiny. U zbylých her byli žáci dotazováni, zda zvážovali pořízení těchto her. Z důvodu minimálních rozdílů v dotaznících, které jsou zde popsány, je v příloze č. 2 této práce uveden pouze jeden dotazník, který slouží jako příklad.

Každá hra byla testována ve dvou skupinách žáků. Jedné skupině byl dotazník týkající se zkoušené hry zaslán po dvanácti týdnech, druhé skupině v den testování. Mohlo by se tedy zdát, že by bylo možné tento vliv zkoumat. Je však nutné poznamenat, že různé výsledky mezi skupinami jsou nejspíše způsobeny rozdílností skupin a nikoliv prodlevou mezi testováním a vyplňováním dotazníku. Přes veškerou autorovu snahu o zajištění stejných podmínek při testování mohly být výsledky ovlivněny řadou faktorů. Za hlavní faktor lze s největší pravděpodobností považovat rozdílnost skupin. Dalším důležitým faktorem je vliv samotného autora. Jelikož byly všechny hry v průběhu testování průběžně komentovány, je pravděpodobné, že v pořadí druhé skupině mohly být poskytnuty podrobnější či lépe srozumitelné komentáře z důvodu dřívější zkušenosti autora s testováním této hry. Vzhledem k těmto a dalším možným faktorům, které jsou jistě významnější než vliv časové prodlevy, má porovnávání výsledků obou skupin spíše informační charakter a zjištěným rozdílům není přikládán význam.

Vedlejší použitou metodou byly polostrukturované rozhovory s učiteli daných tříd. V nich byli učitelé požádáni, aby zhodnotili výkon jejich třídy z dlouhodobého hlediska. Dále byli požádáni, aby stručně zhodnotili průběh vyučovací hodiny, na které byla testována jedna z her. Na závěr se měli vyjádřit ke hře samotné a zhodnotit její klady a zápory. Odpovědi učitelů jsou zapracovány níže ve výsledcích šetření. Tyto rozhovory vždy probíhaly v soukromí, bez přítomnosti žáků a těsně po vyučovací hodině, na které byla příslušná hra testována.

Cílovou skupinou testování a následného dotazníkového šetření byli žáci třetích a čtvrtých ročníků gymnázií a odpovídajících ročníků osmiletých gymnázií, přičemž všichni tito žáci pocházeli ze sedmi pražských gymnázií. Jelikož se středoškolské základy kvantové fyziky typicky učí v těchto ročnících, je vhodné zařadit vybrané kvantové hry právě do těchto ročníků.

3.2 Analýza získaných dat

Testování her se celkem zúčastnilo 189 žáků, přičemž dotazník vyplnilo 172 žáků. Celkově se tak podařilo získat data od více než 90 % žáků. Níže jsou zpracována získaná data, přičemž výsledky pro každou hru jsou analyzovány zvlášť.

3.2.1 Entanglion

Vzhledem k dostupnosti pouze jednoho kusu originální hry bylo pro účely testování vytvořeno potřebné množství kopií na základě volně dostupných materiálů. [24] Tato hra byla testována na vzorku 23 žáků fyzikálního semináře z maturitních ročníků čtyřletého gymnázia, přičemž před samotným hraním jim byla podrobně vysvětlena pravidla. Skupinu A, které byl zaslán dotazník dvanáct týdnů po testování, tvořilo 11 žáků. Skupinu B, které byl dotazník zaslán těsně po testování, tvořilo 12 žáků. návratnost dotazníků týkajících se této hry byla 100 %.

V obou skupinách bylo testování této hry věnováno 90 minut. V úvodní části byla žákům podrobně vysvětlena pravidla, přičemž každá dvojice dostala jednu vytištěnou kopii pravidel. Ve skupině A došlo v rámci dvou dvojic k nedorozumění při umístění karty „Kvantová kombinatorika“ do balíčku na předem dané místo. Tento problém byl téměř okamžitě vyřešen bez dalších dotazů. V rámci obou skupin bylo nutné důkladně vysvětlit situace při nedobrovolném opuštění galaxie Entanglion. Hráčům nečinilo potíže pochopit, že se uvnitř této galaxie pohybují společně, nicméně při jejím opuštění z důvodu odhalení orbitální obranou hráčům nebylo jasné, že ji opustí také společně. Po vysvětlení této skutečnosti nebyly položeny žádné další dotazy v rámci vysvětlování pravidel. Během samotného hraní byla nejčastějším předmětem dotazů karta „Sonda“. Její funkce a způsob, kterým ovlivňuje hru, byly vysvětleny a hráči bez potíží pokračovali ve hře. V rámci skupiny A byly pozorovány dva různé přístupy k herní strategii. Převažovaly strategické tahy, při kterých hráči dopředu uvažovali o efektech součástí kvantového počítače. Méně zastoupenou strategií bylo nejrychlejší možné sbírání těchto součástí, přičemž hráči neuvažovali jejich pozitivní či negativní efekty. Obě tyto strategie dovedly hráče k vítězství v podobném čase. V rámci skupiny B byla pozorována pouze první zmíněná strategie.

Během vysvětlování pravidel byl pozorován úpadek pozornosti a počátečního nadšení většiny žáků v obou skupinách. To bylo nepřekvapivé vzhledem k tomu, že pravidla byla vysvětlována téměř padesát minut. Aktivita žáků se zvýšila ve chvíli, kdy byli vyzváni aby začali hrát. V tu chvíli bylo patrné nadšení některých jedinců. Zároveň však dvě dvojice ze skupiny A a tři dvojice ze skupiny B začaly listovat pravidly. Po celou dobu hraní se všechny dvojice soustředily na hru. Příležitostně se někdo ze žáků zeptal na nejasnosti, nicméně nešlo o nic zásadního (např. jestli se dané karty po vyčerpání balíčku mají zamíchat či nikoliv). Nejrychleji byla v rámci obou skupin dohrána hra za přibližně dvacet minut. Sami hráči

však přiznali, že to nejspíše bylo z důvodu nastavení minimální hodnoty rizika odhalení na počátku hry. Tři dvojice v rámci skupiny A a jedna dvojice v rámci skupiny B téměř nestihly dohrát svoji hru. V závěrečných minutách byli žáci vyzváni k úklidu her, a pokud chtěli, mohli uvést libovolné připomínky, dotazy či komentáře. Žáky z jedné dvojice ze skupiny B zajímalo, kde se dá hra pořídit, byl jim proto přes jejich vyučujícího zaslán příslušný odkaz [24], na kterém si mohou stáhnout potřebné materiály. V rámci skupiny A padl dotaz ohledně autorství této hry. Danému žákovi bylo sděleno, že hra vznikla v IBM Research. Na závěr jeden ze žáků poskytl svůj názor ohledně hry samotné, kde kritizoval délku pravidel oproti krátkému času, který strávil hraním samotným.

Slabší stránkou testování byla část věnovaná pravidlům, při které byla aktivita žáků velmi nízká. Žáci byli v průběhu samotného hraní aktivní a dělali, co od nich bylo očekáváno. V rámci celého testování reagovali na dotazy ohledně postupu hrou a dotazovali se na případné nejasnosti. Po zkušenostech s testováním této hry a po zvážení všech jejích kladů a záporů je dle autora subjektivního názoru Entanglion vhodným prostředkem pro rozšiřování povědomí o základních principech kvantového popisu světa. Je však nutné vzít v úvahu časovou náročnost této hry. Z toho důvodu by bylo vhodné její zařazení spíše na seminář z fyziky.

Vyučující skupiny A popsal žáky, kteří se účastnili testování jako chytré, snaživé a nadšené pro fyziku. Sdělil mi své obavy ohledně načasování, jelikož předpokládal, že se již věnují přípravě na maturitní zkoušku. Nicméně během testování hry nebyla ze strany žáků zaznamenána jediná zmínka o maturitní zkoušce. Průběh testování zhodnotil vyučující jako zdařilý. Žáci byli dle jeho slov aktivní, dobře spolupracovali a projevovali zájem, což však bylo běžné. Hře samotné vytkl vyučující pouze dlouhou dobu potřebnou na vysvětlování pravidel, jinak ji shledal zajímavou. Dále ocenil její grafický design a skutečnost, že hráči nehrají proti sobě, ale spolu.

Vyučující skupiny B poskytl podobný popis svých žáků. Dle jeho slov se jednalo o nadprůměrné jedince s vysokými ambicemi, kteří se ve škole snaží, dávají pozor a ve fyzice prospívají bez problémů. Průběh testování zhodnotil vyučující jako poněkud zdoluhavý z důvodu delší doby potřebné k vysvětlení pravidel. Žáci byli nicméně dle jeho slov aktivní a hře věnovali stejnou pozornost jako běžné výuce. Až na již zmíněná pravidla neměl vyučující ke hře žádné výtky. Ocenil však možnost stáhnutí materiálů [24] potřebných pro sestavení vlastní kopie hry.

Následuje přehled jednotlivých otázek a příslušných žákovských odpovědí. Všechny níže uvedené odpovědi byly zkopírovány přímo z prostředí Google Forms a nebyly nijak upravovány. Z tohoto důvodu obsahují některé odpovědi pravopisné chyby či nespisovné fráze.

1) Jmenujte alespoň jeden fyzikální poznatek z kvantové fyziky, o kterém jste získali povědomí díky této hře:

Ve skupině A odpovědělo 6 žáků, že si nepamatují nic. Zbýlých pět žáků uvedlo následující odpovědi:

- „Částice se mohou provázat za určitých podmínek.“
- „Bylo to v březnu, takže nic moc, ale něco se tam jmenovalo kv. tunelování to myslím tuším o čem circa je“

- „existují kvantové bity, které jde ovládat kvantovými hradly“
- „Kvantové počítače pracují s kvantovými bity.“
- „byly tam kvantová hradla a některá z nich jsou stejná jako logická hradla v normálních počítačích“

Dva z těchto pěti žáků zmínili qubity a dva žáci kvantová hradla.

Ve skupině B nikdo ze žáků explicitně neuvedl, že by si nic nepamatoval. Nicméně tři žáci uvedli nerelevantní odpověď na položenou otázku. Z těchto odpovědí lze usuzovat, že tito žáci nezískali prostřednictvím hry povědomí o žádném fyzikálním poznatku nebo se jim nechtělo vyplňovat dotazník. Zbylých 9 žáků uvedlo následující odpovědi:

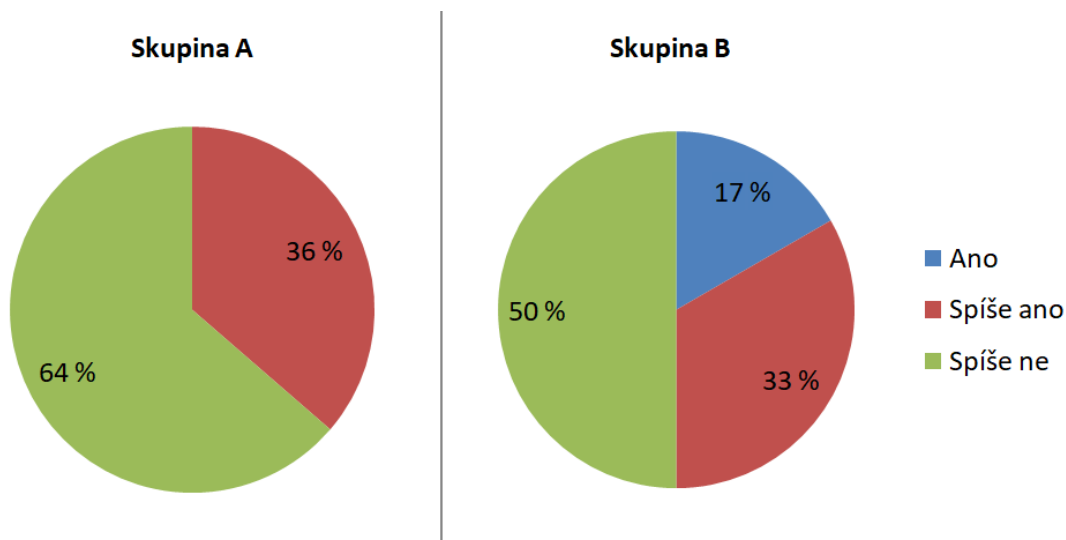
- „když použiju správné hradlo, můžou se kvantově provázat“
- „Stejně jako u programování tam jsou hradla, pomocí kterých to můžeme ovládat.“
- „když jsou ty kvantové bity provázané, tak hradlo na jeden ovlivní i ten druhý“
- „kvantové bity“
- „že kvantové počítače mají i fyzické části a že qubity jsou taky fyzický“
- „ty bity jde provázat a zase rozdělit zpátky“
- „Jako v programování jsou taky hradla, tak tady byly taky a ještě nějaký nový.“
- „Byly tam kvantové bity, kterým se říká kjúbity (nevím jak se to píše)“
- „Asi jsem pochopil provázání, že když působím na jeden, tak reaguje i ten druhý. Jen nevím, jak to provázat ve skutečnosti.“

Nejzmiňovanějšími termíny jsou qubity, kvantová hradla a provázání. O každém z těchto termínů psali 4 žáci s tím, že někteří žáci jich zmínili více.

Z výsledků obou skupin lze usuzovat, že hra přinesla žákům povědomí o existenci qubitů a kvantových hradel. Dalším častěji zmiňovaným termínem ve skupině B bylo provázání, které však bylo ve skupině A zmíněno pouze jednou. To indikuje, že i na představení provázání je tato hra vhodná, nicméně je nutné tento koncept častěji připomínat, jelikož se do paměti žáků nezapsal tak výrazně jako ovládací prvky reprezentující qubity a kvantová hradla.

2) Vyhovovala vám tato hra jako prostředek k získání povědomí o základních principech kvantové fyziky?

Tato otázka byla uzavřená a využívala Likertovy škály [48], přičemž žáci měli na výběr z možností *Ano*, *Spíše ano*, *Nevím*, *Spíše ne*, *Ne*.

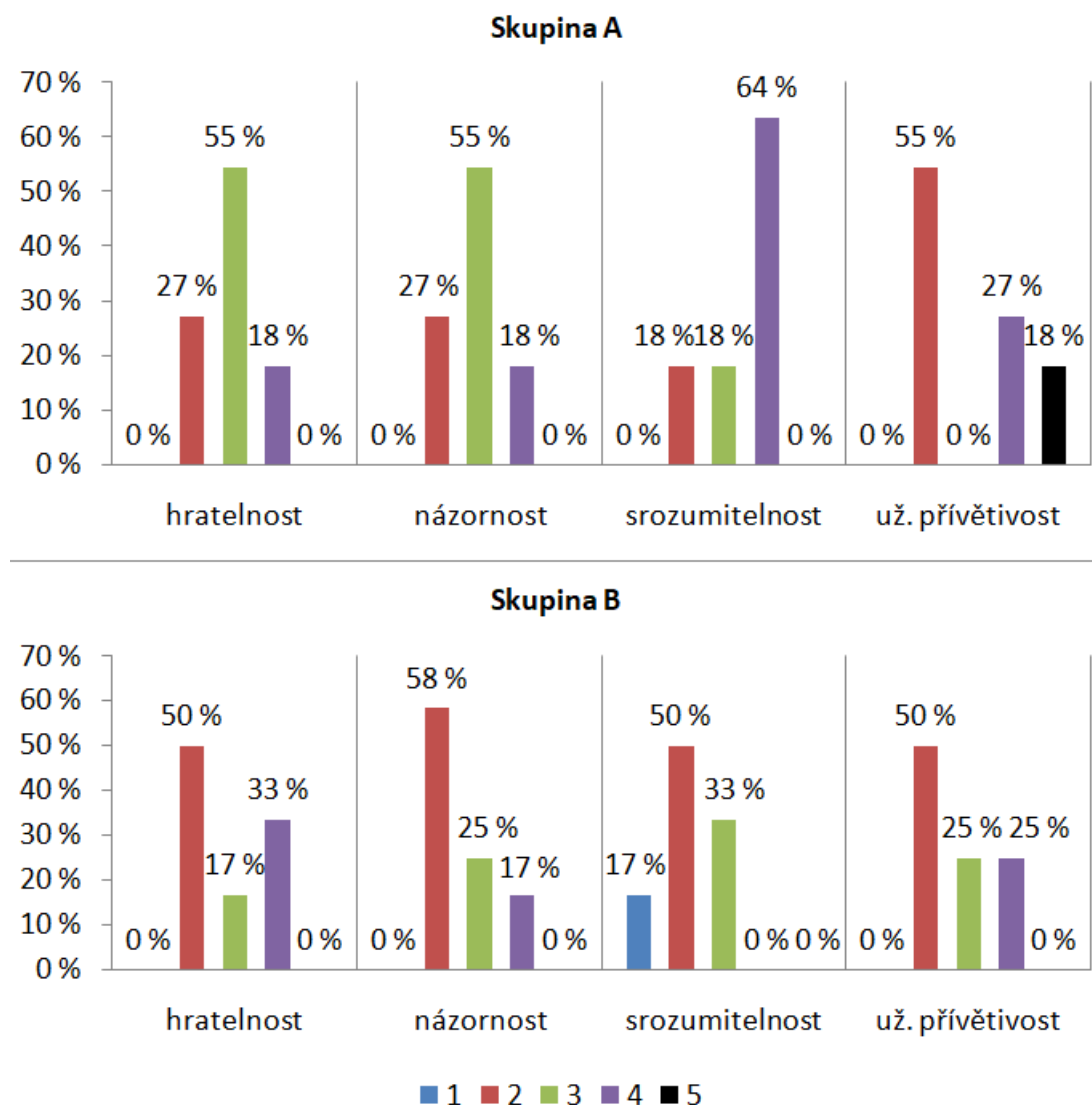


Obrázek 3.1: Grafické znázornění odpovědí žáků na druhou otázku v rámci testování hry Entanglion

Z výsledků obou skupin je patrné, že většině žáků tato hra spíše nevyhovovala jako prostředek k získání povědomí o základních principech kvantové fyziky. Z celkového počtu 23 žáků tato hra vyhovovala pouze dvěma žákům ze skupiny B, přičemž tito žáci projevili zaujetí hrou napříč celým dotazníkem (viz níže). Zároveň tito žáci využívali ve všech otázkách pouze stupně hodnocení 1 nebo 2.

Po převedení na číselnou stupnici ($Ano = 1, \dots, Ne = 5$) vychází u skupiny A průměrné hodnocení 3,3, což odpovídá rozmezí *Nevím* až *Spíše ne*. Pro skupinu B vychází průměrné hodnocení 2,8, což odpovídá rozmezí *Spíše ano* až *Nevím*. Průměrné hodnocení obou skupin dohromady je 3,1, což odpovídá hodnocení *Nevím*. Tento výsledek lze reprezentovat jako nestranný.

3) Na základě vyzkoušení této hry ohodnoťte kategorie *hratelnost*, *názornost*, *srozumitelnost*, *uživatelská přívětivost* na stupnici 1 až 5 (1 – nejlepší, 5 – nejhorší).



Obrázek 3.2: Grafické znázornění odpovědí žáků na třetí otázku v rámci testování hry Entanglion

Z výsledků obou skupin je zřejmé, že většinu kategorií hodnotili žáci spíše pozitivně až neutrálně. Výjimkou je hodnocení kategorie *srozumitelnost* ve skupině A, jelikož hra přišla žákům spíše nesrozumitelná. Za zmínku dále stojí případy hodnocení krajními možnostmi stupnice. Ve skupině A hodnotili dva žáci kategorii *uživatelská přívětivost* stupněm 5, hru tedy nepovažovali za uživatelsky přívětivou. Ve skupině B ohodnotili již dříve zmínění dva žáci kategorii *srozumitelnost* stupněm 1, považovali tedy hru za srozumitelnou.

Pro přehled jsou zde uvedena průměrná hodnocení (viz Tabulka 3.1) jednotlivých kategorií v rámci obou skupin.

Skupina	Hratelnost	Názornost	Srozumitelnost	Už. přívětivost
A	2,9	2,9	3,5	3,1
B	2,7	2,5	2,2	2,6

Tabulka 3.1: Průměrná hodnocení kategorií v rámci testování hry Entanglion

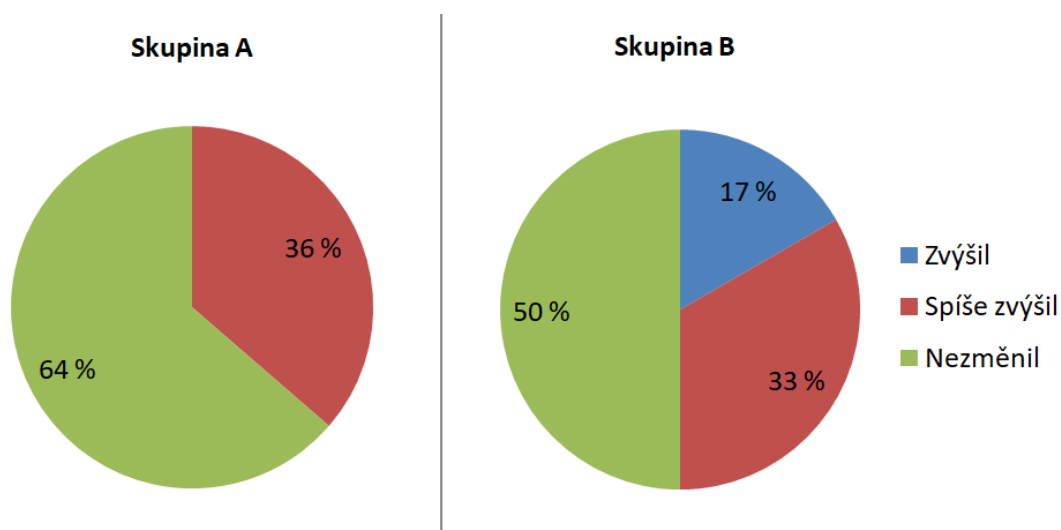
Z těchto hodnot je vidět, že skupina A průměrně hodnotila tuto hru téměř ve všech kategoriích stupněm 3. V případě kategorie *srozumitelnost* je průměrná hodnota na rozmezí stupně 3 a stupně 4, tj. spíše nesrozumitelná. Dále lze usuzovat, že z hlediska ostatních kategorií je pro skupinu A tato hra spíše nevýrazná, jelikož se nepřiklonili ani k jedné straně stupnice. Případně lze říct, že ji žáci lehce posouvají směrem k negativnímu konci hodnotící škály, ale nikterak výrazně. Žáci ze skupiny B ohodnotili *srozumitelnost* spíše pozitivně a ostatní kategorie spíše neutrálně. Lze proto říct, že ji žáci lehce posouvají směrem k pozitivnímu konci hodnotící škály. Průměrné hodnocení obou skupin dohromady odpovídá ve všech kategoriích stupni 3, což lze reprezentovat jako nestranné hodnocení.

4) Zvažoval/a jste pořízení této hry?

Všichni žáci ze skupiny A jednohlasně zvolili odpověď *Ne*. Ze skupiny B pouze dva, již zmínění, žáci odpověděli *Ano*. Lze tedy předpokládat, že mimo školu by této hře většina žáků nevěnovala pozornost.

5) Váš zájem o kvantovou fyziku se díky zkušenostem s touto hrou:

Podobně jako ve druhé otázce i zde se jedná o uzavřenou otázku s využitím Likertovy škály [48], přičemž žáci měli na výběr z možností *Zvýšil*, *Spíše zvýšil*, *Nezměnil*, *Spíše snížil*, *Snižil*.



Obrázek 3.3: Grafické znázornění odpovědí žáků na pátou otázku v rámci testování hry Entanglion

Při nahlédnutí do grafů výše je patrné, že zkušenost žáků s touto hrou neměla negativní dopad na jejich zájem o kvantovou fyziku. V rámci skupiny A sice hra nijak nezměnila zájem sedmi žáků, nicméně čtyři žáci uvedli, že se jejich zájem spíše zvýšil. Ve skupině B uvedli dva žáci, že tato hra jejich zájem o kvantovou fyziku dokonce zvýšila. U čtyř žáků se pak zájem spíše zvýšil a pro šest žáků neměla tato hra dopad na jejich zájem o kvantovou fyziku. Celkově lze říct, že u žáků měla hra pouze neutrální či pozitivní účinek na jejich zájem o kvantovou fyziku.

Po převedení na číselnou stupnici ($Zvýšil = 1, \dots, Snížil = 5$) vychází u skupiny A průměrné hodnocení 2,6, což odpovídá stupni *Nezměnil*. Pro skupinu F vychází průměrné hodnocení 2,3, což odpovídá stupni *Spíše zvýšil*. Odtud je patrné, že žáci celkově hodnotili tuto hru z hlediska účinku na jejich zájem o kvantovou fyziku spíše pozitivně. Celkově tak lze říct, že v průměru hra spíše zvýšila zájem žáků o kvantovou fyziku.

6) Prostor pro libovolné komentáře či připomínky k proběhlé hodině či hře samotné:

Tato otázka byla nepovinná, což se projevilo na počtu odpovědí. Ze skupiny A uvedli odpověď dva žáci a ze skupiny B nikdo. Zmíněné odpovědi jsou:

- „Hra má pravidla na dlouhé vysvětlování, nevím, jestli to bude použitelné pro standardní 45min školní hodiny.

Samo o sobě není špatné jí hrát, ale nemám dojem, že bych díky ní nějak porozuměl lépe kvantovým operacím, a motivující také zrovna není. Možná by to chtělo nějaké vysvětlivky na hrací karty objasňující, co karta v reálném světě znamená.“

- „jako fajn, ale člověk z toho vůbec nepozná co ty věci jsou mimo hru“

Z těchto odpovědí je patrné, že by bylo vhodné více zdůraznit propojení hry s reálným světem. Jeden ze žáků se zde rovněž vyjadřuje k nevýhodě v podobě dlouhého vysvětlování pravidel. Na tuto nevýhodu bylo poukázáno i v rámci popisu této hry ve druhé kapitole (viz Entanglion).

3.2.2 Quantum Odyssey

Vzhledem k omezené přístupnosti této hry bylo testování provedeno formou střídání jednotlivých žáků na řešení jednotlivých úloh. Po celou dobu testování bylo herní prostředí promítáno s využitím projektoru, takže všichni žáci mohli pozorovat řešení svých spolužáků a celkový postup hrou. Zároveň byla každá úroveň průběžně komentována autorem této práce. Testování proběhlo na vzorku 56 žáků třetích ročníků čtyřletého gymnázia. Skupinu C, které byl zaslán dotazník dvanáct týdnů po testování, tvořilo 29 žáků. Skupinu D, které byl dotazník zaslán těsně po testování, tvořilo 27 žáků. Dotazníky týkající se této hry vyplnilo 25 žáků ve skupině C a 26 žáků ve skupině D.

V obou skupinách bylo testování této hry věnováno 90 minut. V úvodní části bylo žákům během deseti minut předvedeno ovládání hry prostřednictvím vyřešení prvních úrovní v kapitole *Introduction*. Vlastní testování probíhalo na prvních úrovních z kapitoly *The fundamental laws*. V rámci obou skupin žáci vyřešili klasické úrovně z prvních dvou částí této kapitoly a výzvy v první části. Žáci chodili jeden za druhým ke katedře, kde každý vyřešil jednu úroveň. Následně daný žák vybral svého následníka, který šel řešit další úroveň. První část vyřešili žáci obou skupin bez výraznějších potíží během třiceti minut. Ve skupině C při řešení třetí úrovně první části upozornil jeden ze žáků na podobnost mezi Pauliho X hradlem a logickým hradlem NOT. Tato podobnost byla autorem okomentována a potvrzena. V rámci skupiny D na tuto podobnost nikdo neupozornil, byla však představena autorem po dokončení všech úrovní v této části hry. S rostoucím počtem qubitů byl postup hrou pomalejší, nicméně stále bez potíží. Ve skupině D bylo nutné znovu okomentovat vliv Pauliho X hradla na qubit ve chvíli, kdy se objevilo více qubitů. Žákovi, který řešil první úlohu s více qubity museli pomoci spolužáci. Po dořešení úloh v této části hry byla žákům představena další hradla. Ve druhé části si lépe počínali žáci ze skupiny C, kteří vyřešili dané úlohy během třiceti minut. Žákům ze skupiny D trvalo řešení těchto úloh přibližně čtyřicet minut. Na začátku bylo žákům ukázáno barevné schéma, které je zabudované přímo ve hře. Následně žáci pokračovali v řešení s tím, že se na toto schéma mohou kdykoliv podívat. Význam hradel představených v této části byl průběžně komentován jak hrou samotnou, tak autorem této práce. Ve skupině C nebylo nutné podávat obsáhlejší vysvětlení, jelikož žáci bez potíží pracovali s danými hradly. Dva žáci si zobrazili barevné schéma a po zodpovězení dotazu na skládání barev správně vyřešili dané úrovně. Vzhledem k časové rezervě bylo žákům této skupiny představeno Hadamardovo hradlo, přičemž úlohy s tímto hradlem byly řešeny a komentovány autorem této práce. Žáci ve skupině D si zobrazovali barevné schéma téměř pokaždé a velmi často žádali o překlad komentářů poskytnutých hrou. Ve třech úrovních si museli příslušní žáci zavolat na pomoc spolužáka a společně úroveň vyřešit. Vzhledem k času strávenému při řešení těchto úrovní nebylo žákům v této skupině představeno Hadamardovo hradlo. Na závěr měli žáci obou skupin možnost vznést libovolné dotazy, připomínky či komentáře. Ve skupině C se jeden ze žáků zeptal, jestli se tímto způsobem opravdu programují kvantové počítače. Bylo mu sděleno, že to, co viděl, je grafickým znázorněním působení jednotlivých hradel. Ve skupině D se jedna žačka zeptala, zda existuje i česká verze hry. Dle autorova vědomí neexistuje, což bylo dané žačce sděleno.

Během vysvětlování ovládní na prvních úrovních bylo patrné zaujetí většiny žáků obou skupin. Ve chvíli, kdy žákům bylo řečeno, že budou chodit ke katedře a řešit úlohy, nastaly smíšené reakce. Ve skupině C se několik žáků ihned dobrovolně hlásilo, zatímco ve skupině D nebyl žádný dobrovolník. Právě těchto několik žáků ze skupiny C dlouhodobě projevovalo zájem a diskutovalo o podobnosti Pauliho X hradla s logickým hradlem NOT. Většina žáků obou skupin byla v průběhu testování aktivní a každý vyřešil alespoň jednu úlohu. Přibližně ve druhé polovině testování však začal být patrný úbytek pozornosti žáků, kteří zrovna neřešili úlohu u katedry. Nikdo sice výrazně nenarušoval průběh testování, rostl však počet žáků, kteří věnovali pozornost svým mobilním telefonům. I přesto tito žáci neměli problém při řešení svých úloh. Tento stav pak trval do konce testování. U žáků ze skupiny D se ve druhé části začaly výrazněji projevovat nedostatky v oblasti anglického jazyka. Velmi často bylo nutné překládat celé pasáže ze hry, aby měli žáci dostatek informací k dokončení úrovně. Několikrát bylo zaznamenáno využití překladačů, přičemž se žáci dále dotazovali na kostrbatý či příliš doslovný překlad. To mělo za následek zdržení průběhu testování a úpadek pozornosti žáků, kteří zrovna neřešili překlad.

Slabší stránkou testování byla nutnost využívat jeden počítač pro celou třídu. Právě z tohoto důvodu nejspíše začala upadat pozornost žáků v průběhu testování. Celkově byli žáci při samotném hraní aktivní a u katedry řešili dané úlohy. V rámci celého testování reagovali na dotazy směřované na řešení úrovně a dotazovali se na případné nejasnosti. Po zkušenostech s touto hrou v praxi je dle autorova subjektivního názoru Quantum Odyssey vhodným prostředkem pro rozšiřování povědomí o základních principech kvantové fyziky. Vzhledem k omezené dostupnosti této hry a množství herního obsahu je však hra vhodnější spíše pro jednotlivce než pro celé třídy.

Vyučující skupiny C popsal žáky, kteří se účastnili testování jako „nepříliš studijní typy“. Přesto se však našli jedinci, kteří téměř okamžitě upozornili na podobnost kvantových hradel s běžně používanými logickými hradly. Průběh testování zhodnotil vyučující po hodině jako velmi povedený, přičemž žáci byli dle jeho slov aktivnější než obvykle a jistí jedinci projevovali neobvyklý zájem. Hru samotnou shledal vyučující poutavou a zajímavou. Po dotazu mu byl poskytnut odkaz [30] na oficiální stránky této hry.

Vyučující skupiny D popsala své žáky jako průměrnou třídu, ve které se najdou tací, pro které je fyzika utrpením, ale i tací, které fyzika baví. Na základě aktivity žáků při testování nebylo obtížné odhadnout, o kterých žácích mluvila. Přesto se alespoň někteří aktivně zapojovali do konverzací jak mezi sebou, tak s autorem této práce. Průběh testování, jehož se sama zúčastnila, zhodnotila vyučující jako velmi zdařilý a pro studenty přínosný. O hře prohlásila, že je velmi inovativní, a že ve vývoji této hry vidí velký potenciál. Vyjádřila rovněž obavu o žáky, kteří nejsou tak zdatní v anglickém jazyce.

Následuje přehled jednotlivých otázek a příslušných žakovských odpovědí. Všechny níže uvedené odpovědi byly zkopírovány přímo z prostředí Google Forms a nebyly nijak upravovány. Z tohoto důvodu obsahují některé odpovědi pravopisné chyby či nespisovné fráze.

1) Jmenujte alespoň jeden fyzikální poznatek z kvantové fyziky, o kterém jste získali povědomí díky této hře:

Ve skupině C odpovědělo 6 žáků, že si nepamatují nic, protože to bylo už dávno. Třináct žáků uvedlo ve svých odpovědích kvantová hradla a zbylých 6 žáků uvedlo qubity. Níže jsou uvedeny příklady těchto odpovědí:

- „existuje pauliho x hradlo“
- „Lze používat kvantová hradla, která na první pohled fungují podobně jako logická hradla klasická.“
- „byly tam kvantové bity, které mohou nést víc informací než klasické“
- „programovaly se tam kvantové bity“

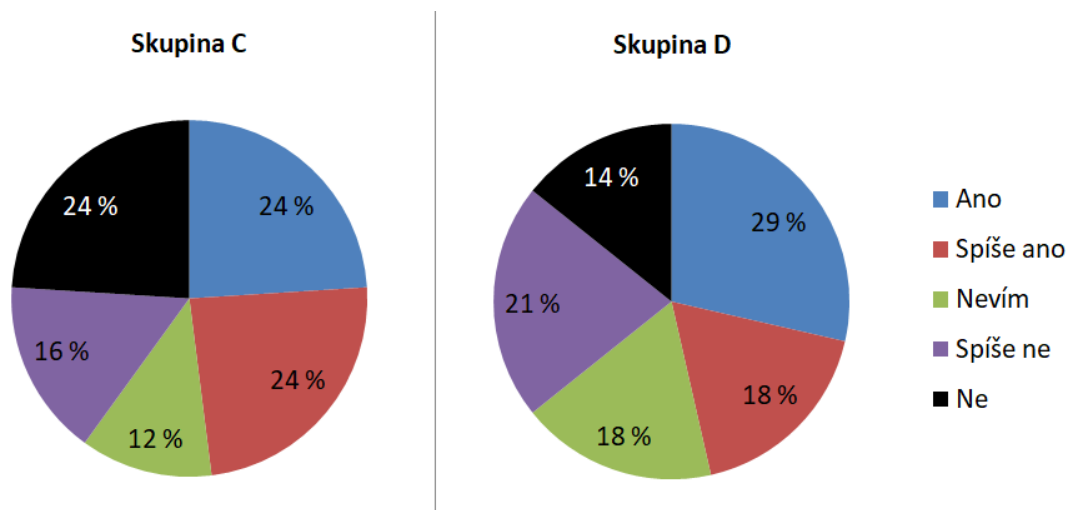
Ve skupině D udali pouze 2 žáci, že jim tato hra nic nedala. Patnáct žáků uvedlo ve svých odpovědích kvantová hradla a zbylých 9 žáků uvedlo qubity. Níže jsou uvedeny příklady jejich odpovědí, které se nejčastěji vyskytovaly v dotazníku:

- „kvantová fyzika byla docela podobná programování akorát tam byly kvantová hradla místo klasických“
- „kvantová hradla“
- „i v kvantové fyzice existují bity, kterým se říká qubity“
- „ovládaly se tam qubity“

Z výsledků obou skupin je zřejmé, že nejzmiňovanějšími termíny jsou kvantová hradla a qubity. Povědomí o existenci kvantových hradel díky této hře získalo dle vlastního vyjádření celkově 28 žáků z celkového počtu 51 žáků, kteří vyplnili dotazník. O existenci qubitů takto získalo povědomí 15 žáků. Dále je patrné, že ačkoliv žáci celou dobu ve hře ovlivňovali stav qubitů prostřednictvím hradel, tak spíše než qubity si zapamatovali právě hradla. Pravděpodobnou příčinou je skutečnost, že hradla jsou ovladatelnými herními prvky, se kterými hráči většinu času pracují. Dále je z příkladů odpovědí zřejmé, že tato hra je velmi vhodná pro žáky, kteří mají zkušenosti s logickými hradly. Pro ně lze totiž snadno přirovnat působení kvantových hradel na qubity k působení logických hradel na klasické bity, přičemž stačí vysvětlit podstatné rozdíly. Není tak třeba celou teorii budovat od základů.

2) Vyhovovala vám tato hra jako prostředek k získání povědomí o základních principech kvantové fyziky?

Tato otázka byla uzavřená a využívala Likertovy škály [48], přičemž žáci měli na výběr z možností *Ano*, *Spíše ano*, *Nevím*, *Spíše ne*, *Ne*.

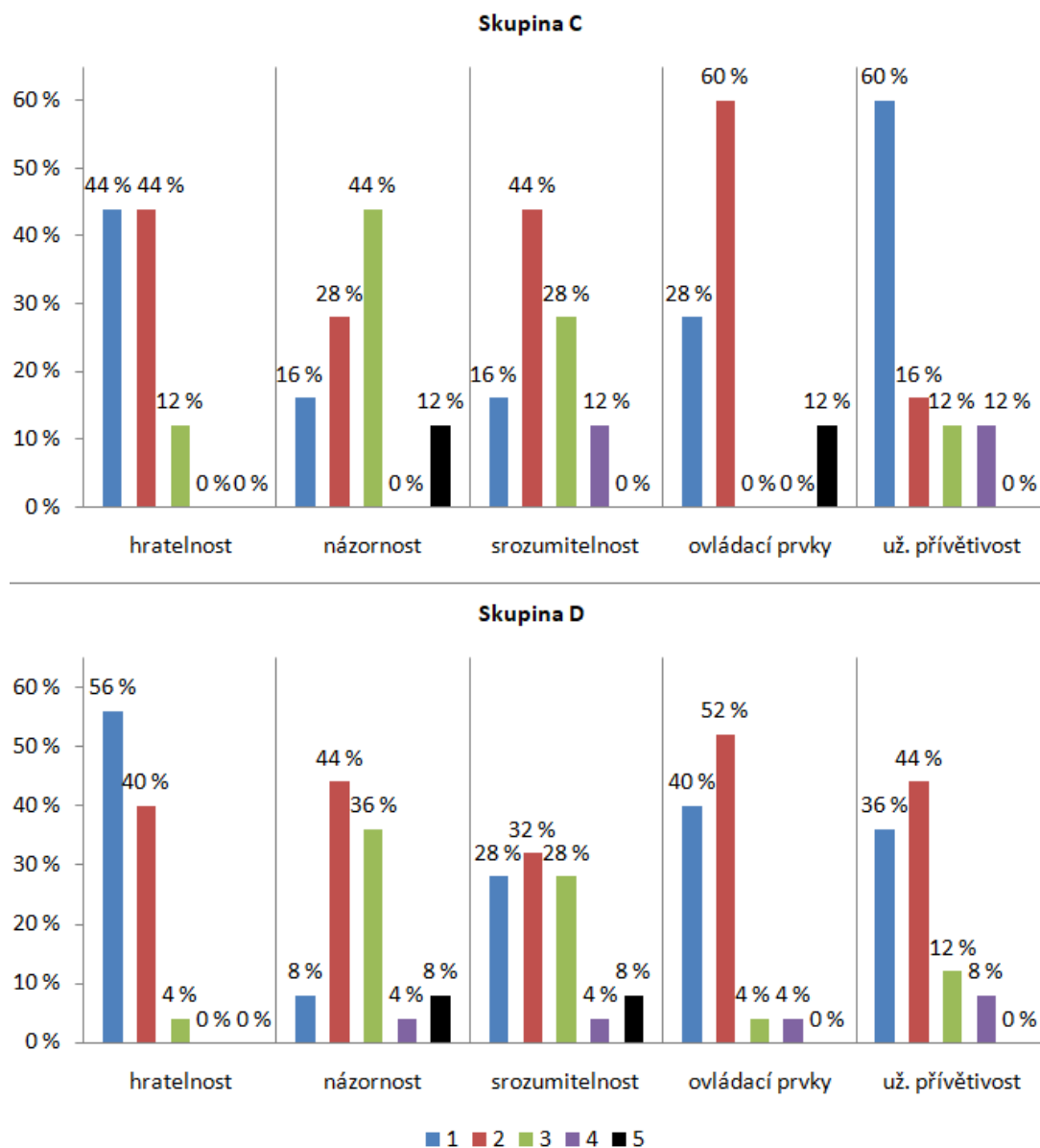


Obrázek 3.4: Grafické znázornění odpovědí žáků na druhou otázku v rámci testování hry Quantum Odyssey

Z výsledků skupiny C je patrné, že rozdíl mezi počtem žáků, kterým hra *vyhovovala* nebo *spíše vyhovovala*, a mezi počtem žáků, kterým hra *nevyhovovala* nebo *spíše nevyhovovala*, je minimální. Nelze se tedy celkově přiklonit k žádné straně této stupnice. Ve skupině D lze pozorovat obdobné minimální rozdíly mezi stejnými stupni hodnocení.

Po převedení na číselnou stupnici ($Ano = 1, \dots, Ne = 5$) vychází u skupiny C průměrné hodnocení 2,9, což odpovídá stupni *Nevím*. Pro skupinu D vychází průměrné hodnocení 3,1, což odpovídá téměř stupni *Ano*. Pro obě skupiny dohromady vychází průměrné hodnocení 3,0, což odpovídá stupni *Nevím*. Tento výsledek lze reprezentovat jako nestranný.

3) Na základě vyzkoušení této hry ohodnoťte kategorie *hratelnost*, *názornost*, *srozumitelnost*, *ovládací prvky*, *uživatelská přívětivost* na stupnici 1 až 5 (1 – nejlepší, 5 – nejhorší).



Obrázek 3.5: Grafické znázornění odpovědí žáků na třetí otázku v rámci testování hry Quantum Odyssey

V rámci odpovědí na tuto otázku je patrné, že žáci z obou skupin hodnotili *názornost* spíše neutrálně a ostatní aspekty této hry spíše pozitivně. Výrazným vlivem na hodnocení *uživatelské přívětivosti* ve skupině D je pravděpodobně již zmíněný problém s angličtinou. Za zmínku dále stojí případy hodnocení krajními možnostmi stupnice. Oproti předchozí hře zde mnohem častěji žáci využili nejlepšího či nejhoršího možného stupně hodnocení.

Pro přehled jsou zde uvedena průměrná hodnocení (viz Tabulka 3.2) jednotlivých kategorií v rámci obou skupin.

Skupina	Hratelnost	Názornost	Srozumitelnost	Ovládací prvky	Už. přívětivost
C	1,7	2,6	2,4	2,1	1,8
D	1,5	2,6	2,3	1,7	1,9

Tabulka 3.2: Průměrná hodnocení kategorií v rámci testování hry Quantum Odyssey

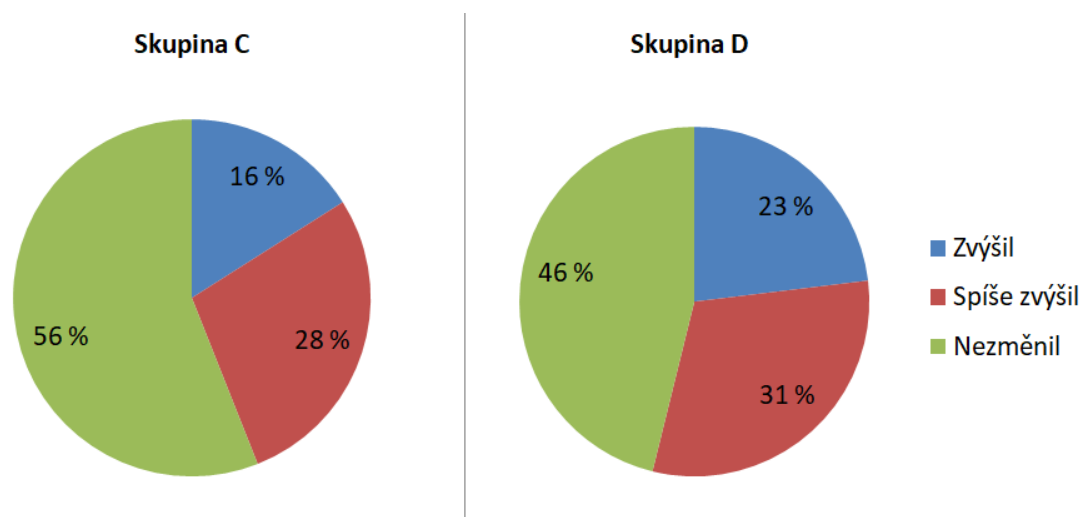
Z těchto hodnot je patrné, že nejhůře ohodnotili žáci obou skupin kategorii *názornost*, přičemž její průměrné hodnocení je spíše neutrální. Oproti tomu nejlépe hodnocenou kategorií v obou skupinách je *hratelnost*, jejíž průměrné hodnocení je na rozmezí stupně 1 a 2, tj. spíše hratelná. Všechny ostatní kategorie byly žáky hodnoceny spíše pozitivně. Průměrné hodnocení obou skupin dohromady odpovídá v kategorii *názornost* stupni 3 a ve všech ostatních kategoriích stupni 2, což lze celkově reprezentovat jako spíše pozitivní hodnocení.

4) Zvažoval/a jste pořízení této hry?

Ze skupiny C odpověděli pouze 3 žáci kladně, zbylých 22 žáků záporně. Ve skupině D odpovědělo všech 26 žáků záporně. Lze tedy předpokládat, že ačkoliv tuto hru hodnotili žáci spíše pozitivně, ve volném čase by jí většina žáků nevěnovala pozornost.

5) Váš zájem o kvantovou fyziku se díky zkušenostem s touto hrou:

Podobně jako ve druhé otázce i zde se jedná o uzavřenou otázku s využitím Likertovy škály [48], přičemž žáci měli na výběr z možností *Zvýšil*, *Spíše zvýšil*, *Nezměnil*, *Spíše snížil*, *Snížil*.



Obrázek 3.6: Grafické znázornění odpovědí žáků na pátou otázku v rámci testování hry Quantum Odyssey

Při nahlédnutí do grafů výše je patrné, že zkušenost žáků s touto hrou neměla negativní dopad na jejich zájem o kvantovou fyziku. V rámci skupiny C hra nijak nezměnila zájem nadpoloviční většiny žáků, nicméně sedm žáků uvedlo, že se jejich zájem spíše zvýšil, a u čtyř žáků se dokonce zájem zvýšil. Ve skupině D převažuje část žáků, u kterých tato hra jejich zájem o kvantovou fyziku dokonce zvýšila. U šesti žáků hra zájem zvýšila a osmi žákům hra zájem spíše zvýšila. U zbylých 12 žáků se po zkušenosti s touto hrou zájem o kvantovou fyziku nezměnil. Celkově tak lze říct, že na žáky měla zkušenost s touto hrou pouze neutrální či pozitivní dopad z hlediska jejich zájmu o kvantovou fyziku.

Po převedení na číselnou stupnici (*Zvýšil* = 1, . . . , *Snížil* = 5) vychází u skupiny C průměrné hodnocení 2,4, což odpovídá stupni *Spíše zvýšil*. Pro skupinu F vychází průměrné hodnocení 2,0, což rovněž odpovídá stupni *Spíše zvýšil*. Odtud je patrné, že žáci celkově hodnotili tuto hru z hlediska účinku na jejich zájem o kvantovou fyziku spíše pozitivně. Celkově tak lze říct, že v průměru hra spíše zvýšila zájem žáků o kvantovou fyziku.

6) Prostor pro libovolné komentáře či připomínky k proběhlé hodině či hře samotné:

Vzhledem k faktu, že tato otázka byla nepovinná, bylo očekáváno jen málo odpovědí. Toto očekávání se potvrdilo, jelikož odpověděli pouze dva žáci ze skupiny C. Zbylých 49 žáků z obou skupin nevedlo nic. Odpovědi těchto dvou žáků jsou:

- „Myslím, že komplexnější kvantová fyzika je pochopitelnější formou učebnice, ale pro základy je to přívětivé a pohodlné“
- „nikdo z nás nepochopil jak to souvisí s kvantovou fyzikou“

První odpověď svým obsahem podporuje hodnocení hry uvedené výše. Druhá z těchto odpovědí je poněkud zarážející, jelikož převážná většina respondentů hodnotila aspekty této hry spíše pozitivně. Lze předpokládat, že se tento komentář vztahuje spíše k tomu, jak se danému žákovi podařilo, či spíše nepodařilo zachytit z výkladu souvislost hry a stavu qubitu (základního prvku kvantových technologií). Pokud by tomu tak bylo, je z hodnocení druhé otázky patrné, že daný žák zřejmě vztahuje svůj subjektivní názor na celou skupinu.

3.2.3 Psi and Delta

Tuto hru lze hrát samostatně nebo ve dvojicích, přičemž rozdíly mezi těmito variantami jsou minimální. Žáci se mohli sami rozhodnout, zda chtějí hrát ve dvojicích či samostatně, přičemž jim bylo řečeno, že hrou bude postupováno společně. Po celou dobu testování bylo herní prostředí promítáno s využitím projektoru, takže všichni žáci mohli pozorovat celkový postup hrou. U každé úrovně byl poskytnut didaktický komentář ze strany autora této práce. Testování proběhlo na vzorku 56 žáků třetích ročníků čtyřletého gymnázia. Skupinu E, které byl zaslán dotazník dvanáct týdnů po testování, tvořilo 27 žáků. Skupinu F, které byl dotazník zaslán těsně po testování, tvořilo 29 žáků. Dotazníky týkající se této hry vyplnilo 23 žáků ze skupiny E a 26 žáků ze skupiny F.

V obou skupinách bylo testování této hry věnováno 45 minut. V obou skupinách byla v rámci testování odehrána celá hra, přičemž žádná úroveň nečinila žákům potíže. Ve skupině E zvolila většina žáků možnost hrát ve dvojicích, zatímco ve skupině F hrála většina žáků samostatně. S vyučujícím skupiny E byla hra hrána ve dvojici s autorem této práce, přičemž spolupráce probíhala bez potíží. Ve skupině F hrála vyučující samostatně na svém notebooku, přičemž autor této práce prováděl žáky hrou taktéž samostatně. Většina žáků obou skupin postupovala hrou rychleji než jak bylo prezentováno s využitím projektoru. V průběhu testování se dotázala žačka ze skupiny E, proč jí počty naměření elektronu na jednotlivých platformách neodpovídají příslušnému grafu hustoty pravděpodobnosti. Bylo jí vysvětleno, že na základě deseti měření nelze dosáhnout přesného výsledku a že pro odpovídající hodnoty by musela provést mnohem více měření. Následně jich provedla přibližně osmdesát a uznala, že výsledky jsou přesvědčivější. Podobný dotaz nikdo ze skupiny F nevznesl, nicméně byli žáci o této skutečnosti informováni autorem této práce v rámci jednoho z komentářů. Další dotazy od žáků z této skupiny byly přímo vázány na komentáře poskytované v rámci postupu hrou a byly okamžitě zodpovězeny. Ve druhé části hry směřoval autor na žáky otázky ohledně energetických hladin, přičemž žáci obou skupin zodpověděli tyto otázky bez problémů. V obou skupinách byly zaznamenány obtíže technického rázu. Žákům činilo potíže nastavit energii fotonů potřebnou pro přechod elektronu z jedné hladiny na druhou, protože ovládání hodnot této energie bylo velmi citlivé. Po dohrání této hry měli žáci přibližně pět minut, během kterých mohli vznést libovolné dotazy, připomínky či komentáře. Ze skupiny E okomentovali dva žáci jednoduchost hry a třetí žák navázal s tím, že by mu naopak vyhovoval více exaktnější přístup. Ze skupiny F nevyužil tuto možnost žádný žák.

V průběhu testování byl na první pohled zřejmý zájem většiny žáků, přesto se však žáci projevovali velmi odlišně. Žáci ze skupiny E byli velmi soustředěni na hru samotnou a poskytované komentáře, přičemž na většinu z nich alespoň jeden ze žáků reagoval. Lze tak říct, že zde panovalo spíše pracovní nasazení. Oproti tomu ve skupině F byli žáci více ponořeni do hry a na komentáře téměř nereagovali. Zároveň zde byla patrná méně formální atmosféra, jelikož žáci již od začátku vtipkovali a na otázky odpovídali s nadsázkou. K tomu napomohl i sám autor této práce, jelikož na většinu takových odpovědí reagoval rovněž s nadsázkou. Lze tak říct, že v této skupině probíhalo testování spíše v uvolněné atmosféře. Právě tyto rozdíly v přístupu k testování společně s rozdílností samotných skupin pravděpodobně mohly způsobit odlišnosti v žakovských odpovědích. Na rozdíl od předchozí zmíněné hry nečinila angličtina ve hře žádný problém.

Celkově byli žáci při testování aktivní, přiměřeně reagovali na dotazy směřované na řešení úrovní a dotazovali se na případné nejasnosti. Po vyzkoušení této hry se žáky je dle autorova subjektivního názoru Psi and Delta vhodným prostředkem pro rozšiřování povědomí o základních principech kvantové fyziky. Po zvážení všech kladů a záporů této hry je vhodné využít tuto hru jak ve skupině, tak pro jednotlivce. Nicméně je nutné hru průběžně komentovat, kvůli čemuž je potřebná přítomnost vyučujícího. Z hlediska obtížnosti a časové náročnosti je vhodné této hře věnovat celou vyučovací hodinu.

Vyučující skupiny E popsal žáky, kteří se účastnili testování jako „dlouhodobě docela schopné, místy však líné“. Tato lenost se během příslušné vyučovací hodiny naštěstí neukázala. Žáci byli velmi aktivní, kladli doplňující otázky a spolupracovali jak vzájemně, tak s autorem této práce. Průběh testování zhodnotil vyučující po hodině jako „super“ s tím, že bylo vidět, že je to bavilo. Hru samotnou shledal vyučující jako vhodný prostředek pro úvod do kvantové teorie. Pochválil grafickou stránku hry a začlenění prvků arkádové hry. Poznamenal, že některé komentáře ve hře mohou být zavádějící, ale tyto byly průběžně komentovány a doplňovány.

Vyučující skupiny F uvedla, že své žáky učí prvním rokem, takže o dlouhodobém chování třídy nemůže moc říct, nicméně během tohoto školního roku se jeví jako „oprsklí“, ale pracovití. Testování probíhalo v uvolněné atmosféře, přičemž žáci věnovali pozornost hře samotné, ale na didaktické komentáře příliš nereagovali. Po testování popsala vyučující proběhlou hodinu jako jednu z lepších. Žáci se prý snažili dávat pozor a oproti normální hodině se drželi zpátky. Hru popsala jako zajímavé a jednoduché představení často obtížně pochopitelné látky. Vyjádřila však obavu, zda tato hra není právě svou jednoduchostí až příliš „hloupoučká“ pro žáky třetích ročníků čtyřletého gymnázia.

Následuje přehled jednotlivých otázek a příslušných žákovských odpovědí. Všechny níže uvedené odpovědi byly zkopírovány přímo z prostředí Google Forms a nebyly nijak upravovány. Z tohoto důvodu obsahují některé odpovědi pravopisné chyby či nespisovné fráze.

1) Jmenujte alespoň jeden fyzikální poznatek z kvantové fyziky, o kterém jste získali povědomí díky této hře:

Ve skupině E odpovědělo 5 žáků, že si nepamatují nic, protože to bylo už dávno. Jedenáct žáků uvedlo ve svých odpovědích hustotu pravděpodobnosti a zbylých 7 žáků uvedlo ve svých odpovědích superponovaný stav a jeho souvislost s měřením. Níže jsou uvedeny příklady těchto odpovědí:

- „hustota pravděpodobnosti“
- „podobně jako ve fyzice udává hustota rozložení hmotnosti v objemu tak ve kvantové fyzice existuje funkce zvaná hustota pravděpodobnosti, která udává rozložení pravděpodobnosti v prostoru“
- „Částice má v superpozici určitou pravděpodobnost výskytu na každém místě. Místo výskytu ale zjistíme až změřením.“
- „měřením se zruší superpozice a elektron bude už jen na jednom místě“

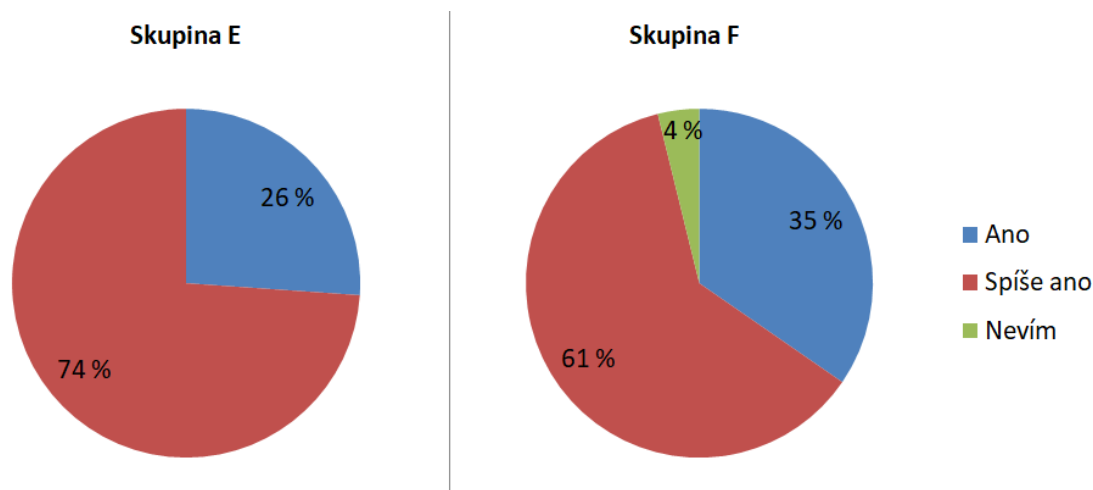
Ve skupině F udal pouze 1 žák nerelevantní odpověď. Ze zbylých 25 žáků uvedlo ve svých odpovědích 16 žáků hustotu pravděpodobnosti a zbylých 9 žáků uvedlo superponovaný stav a jeho souvislost s měřením. Níže jsou uvedeny příklady jejich odpovědí, které se nejčastěji vyskytovaly v dotazníku:

- „naměřím elektrony podle toho, jak vypadá hustota pravděpodobnosti“
- „byla tam hustota pravděpodobnosti, podle které se počítala pravděpodobnost“
- „V superponovaném stavu jsou elektrony jakoby na víc místech najednou. Akorát že tam ve skutečnosti nejsou, jen je tam jde naměřit. Teprve tím měřením vlastně zjistím, kde opravdu jsou.“
- „superpozici můžeme zrušit měřením“

Z výsledků obou skupin je patrné, že nejzmiňovanějšími termíny jsou hustota pravděpodobnosti a vztah superponovaného stavu a měření. Povědomí o existenci hustoty pravděpodobnosti díky této hře získalo dle vlastního vyjádření celkově 27 žáků z celkového počtu 51 žáků, kteří vyplnili dotazník. Existenci superponovaného stavu si zapamatovalo 16 žáků. Zajímavým zjištěním je, že hustota pravděpodobnosti byla uváděna častěji než princip superpozice. S hustotou pravděpodobnosti se žáci setkali při postupu hrou o několik úrovní později než se superponovaným stavem. Zároveň byly oba tyto koncepty přítomny v každé úrovni od svého představení ve hře, přičemž mechanika měření byla ve hře využívána k zasažení nepřátelského robota. Hustotu pravděpodobnosti hráči používali k odhadu, na kterém místě by bylo nejlepší robota zasáhnout. Z příkladů odpovědí je zřejmé, že tato hra je vhodná pro představení vztahu mezi superponovaným stavem a měřením. Dále lze s jejím využitím představit hustotu pravděpodobnosti, přičemž je vhodné zdůraznit její souvislost s pravděpodobností.

2) Vyhovovala vám tato hra jako prostředek k získání povědomí o základních principech kvantové fyziky?

Tato otázka byla uzavřená a využívala Likertovy škály [48], přičemž žáci měli na výběr z možností *Ano*, *Spíše ano*, *Nevím*, *Spíše ne*, *Ne*.

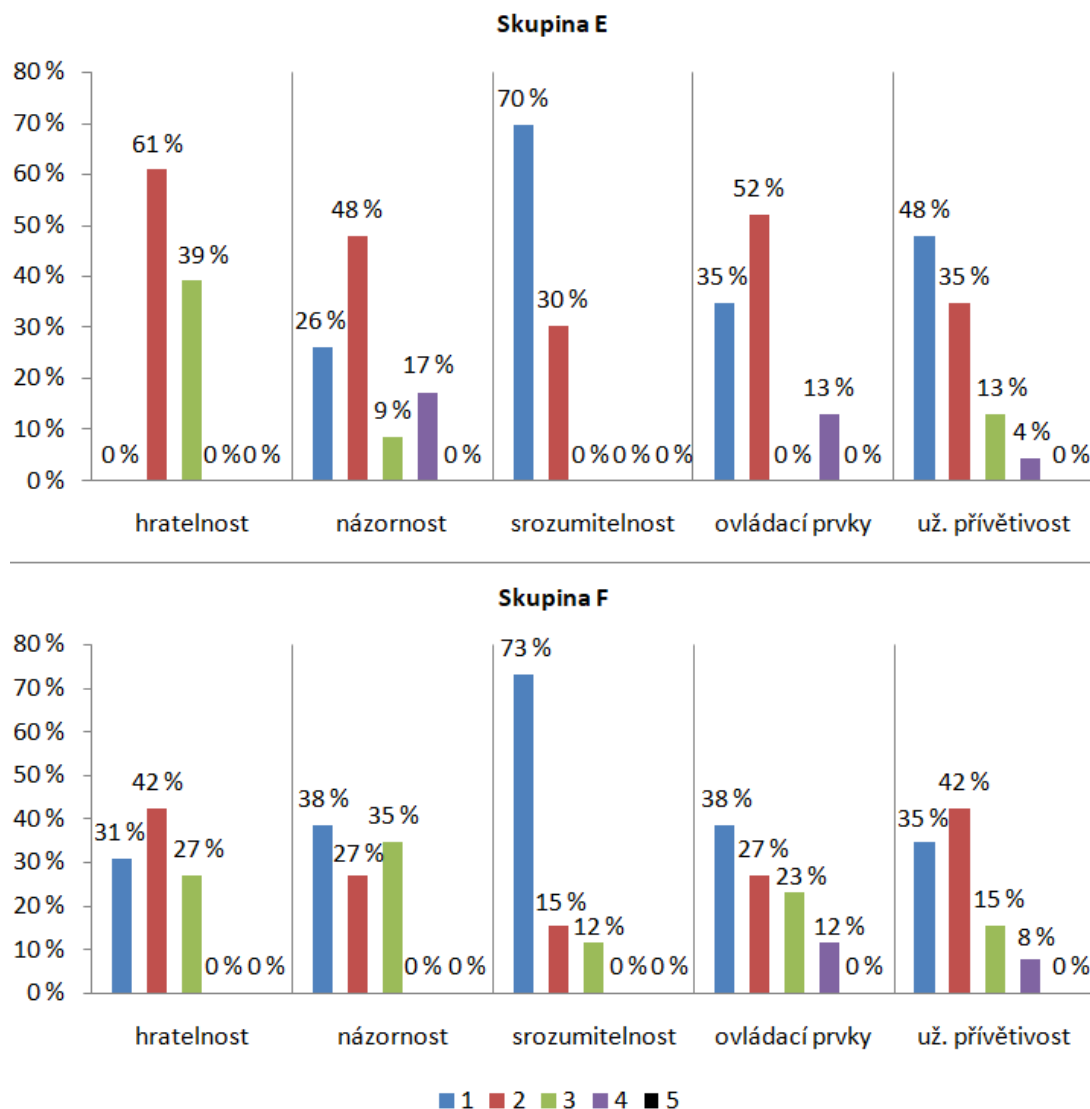


Obrázek 3.7: Grafické znázornění odpovědí žáků na druhou otázku v rámci testování hry Psi and Delta

Z výsledků obou skupin je patrné, že většině žáků tato hra vyhovovala jako prostředek k získání povědomí o základních principech kvantové fyziky. Výjimku tvoří jeden žák ze skupiny F, který zvolil odpověď *Nevím*.

Po převedení na číselnou stupnici ($Ano = 1, \dots, Ne = 5$) vychází u skupiny E průměrné hodnocení 1,7, což nejlépe odpovídá stupni *Spíše ano*. Pro skupinu F vychází průměrné hodnocení rovněž 1,7, což odpovídá témuž stupni. Odtud je patrné, že žáci celkově hodnotili tuto hru spíše pozitivně, a lze tak učinit závěr, že jim tato hra spíše vyhovovala jako prostředek k získání povědomí o základních principech kvantové fyziky.

3) Na základě vyzkoušení této hry ohodnoťte kategorie *hratelnost*, *názornost*, *srozumitelnost*, *ovládací prvky*, *uživatelská přívětivost* na stupnici 1 až 5 (1 – nejlepší, 5 – nejhorší).



Obrázek 3.8: Grafické znázornění odpovědí žáků na třetí otázku v rámci testování hry Psi and Delta

V rámci odpovědí na tuto otázku je patrné, že žáci hodnotili většinu aspektů této hry spíše pozitivně, přičemž žádný žák nevyužil stupně 5 na hodnotící škále. *Srozumitelnost* hodnotili hráči z obou skupin pozitivně, přičemž více než 70 % všech žáků ji ohodnotilo stupněm 1.

Pro přehled jsou zde uvedena průměrná hodnocení (viz Tabulka 3.3) jednotlivých kategorií v rámci obou skupin.

Skupina	Hratelnost	Názornost	Srozumitelnost	Ovládací prvky	Už. přívětivost
E	2,4	2,2	1,3	2,0	1,7
F	2,0	2,0	1,4	2,1	2,0

Tabulka 3.3: Průměrná hodnocení kategorií v rámci testování hry Psi and Delta

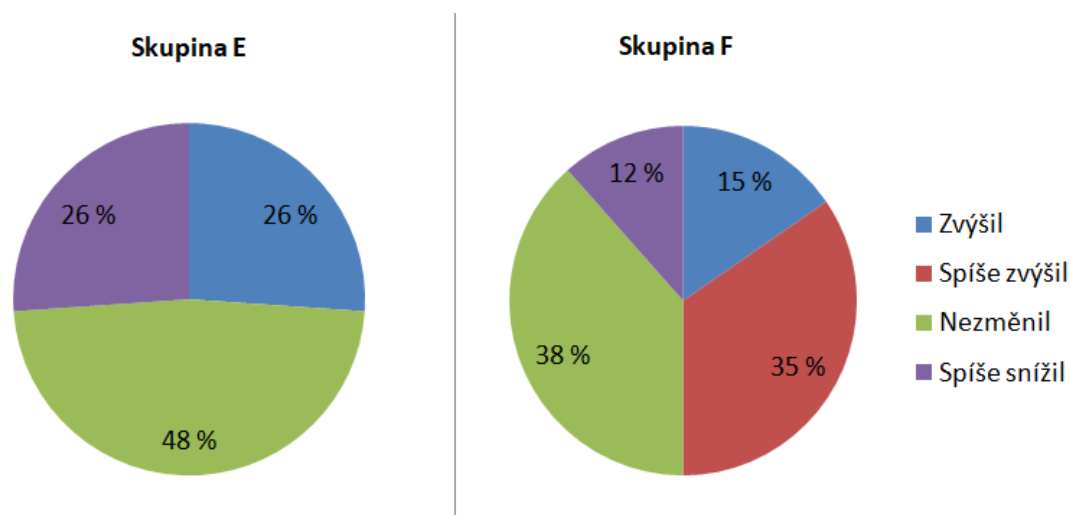
Z těchto hodnot je vidět, že nejlépe hodnocenou kategorií je *srozumitelnost*, přičemž žáci z obou skupin považovali hru za srozumitelnou. Všechny ostatní kategorie v rámci obou skupin ohodnotili žáci spíše pozitivně. Průměrné hodnocení všech žáků dohromady odpovídá v kategorii *srozumitelnost* stupni 1 a ve všech ostatních kategoriích stupni 2, což lze celkově reprezentovat jako spíše pozitivní hodnocení.

4) Vyzkoušel/a jste si tuto hru zahrát i mimo vyučovací hodinu?

I přes tato pozitivní hodnocení si žádný z respondentů nevyzkoušel zahrát hru mimo vyučovací hodinu. To si lze vysvětlit omezeným obsahem této hry, jelikož během testování byla celá odehrána.

5) Váš zájem o kvantovou fyziku se díky zkušenostem s touto hrou:

Podobně jako ve druhé otázce i zde se jedná o uzavřenou otázku s využitím Likertovy škály [48], přičemž žáci měli na výběr z možností *Zvýšil*, *Spíše zvýšil*, *Nezměnil*, *Spíše snížil*, *Snížil*.



Obrázek 3.9: Grafické znázornění odpovědí žáků na pátou otázku v rámci testování hry Psi and Delta

Při nahlédnutí do grafů výše je patrné, že zkušenost žáků s touto hrou měla u některých z nich negativní dopad na jejich zájem o kvantovou fyziku. V rámci skupiny E se jedná o šest žáků a ve skupině F se jedná o tři žáky. Tato skutečnost je vzhledem k předchozímu spíše pozitivnímu hodnocení poněkud zarážející. Jistý

vhled do zdůvodnění tohoto jevu nabízí jedna z odpovědí na šestou otázku níže. Dalším možným důvodem mohou být komentáře autora této práce při testování, jelikož při několika příležitostech zmínil, že se v kvantové fyzice hojně využívá pravděpodobnost, což je mezi žáky všeobecně neoblíbená matematická disciplína.

Po převedení na číselnou stupnici (*Zvýšil* = 1, . . . , *Snížil* = 5) vychází u skupiny E průměrné hodnocení 2,7, což nejlépe odpovídá stupni *Nezměnil*. Pro skupinu F vychází průměrné hodnocení 2,5, což je na rozmezí stupňů *Spíše zvýšil* a *Nezměnil*. Odtud je patrné, že žáci celkově hodnotili tuto hru z hlediska účinku na jejich zájem o kvantovou fyziku spíše neutrálně. Celkově tak lze říct, že v průměru hra nezměnila zájem žáků o kvantovou fyziku.

6) Prostor pro libovolné komentáře či připomínky k proběhlé hodině či hře samotné:

Podobně jako u výše zmíněných her bylo očekáváno jen málo odpovědí. Toto očekávání se opět potvrdilo, jelikož odpověděli pouze dva žáci ze skupiny E. Zbýlých 47 žáků z obou skupin nevedlo nic. Odpovědi těchto dvou žáků jsou:

- „Můj zájem se snížil, protože nemám rád obtížné věci.“
- „Hra by dle mého názoru měla větší šanci u cílové skupiny, kdyby se více soustředila na mechaniky hry a na ně potom nasazovala „vzhled“ vzdělávací aplikace. Zrovna u tak zajímavého tématu, jakým je kvantová fyzika by to nemuselo být tak obtížné. Ve zkratce, co se snažím říct je, že by mělo větší úspěch, kdyby to byla hra se vzdělávacími prvky, než aby to byl vzdělávací program s herními prvky. (Jako inspiraci si můžete vzít například hru Blackhole, tam by šly vzdělávací prvky nasadit jedna báseň a stále by si to zachovalo svou herní hodnotu.)“

První výše uvedená odpověď byla již zmíněna výše, protože poskytuje určitý vhled do odpovědí na pátou otázku. Ze druhé odpovědi lze vyčíst, že žákovi kvantová fyzika přijde zajímavá a že vzdělávací programy s herními prvky nejspíš nemá v oblibě. Přesto mu tato hra dle jeho odpovědi v dotazníku spíše vyhovovala. Ve všech kategoriích ji hodnotil spíše pozitivně a jeho zájem o kvantovou fyziku se po zkušenosti s touto hrou zvýšil. Jeho odpověď lze proto považovat za doporučení určené pro ostatní žáky, kterým kvantová fyzika nemusí připadat zajímavá.

3.2.4 Quantum Game and Virtual Lab by Quantum Flytrap

V rámci testování této hry žáci řešili úlohy z Quantum Game a následně jim byly ukázány a popsány vybrané experimenty ve Virtual Lab. Po dokončení této části měli žáci zbytek hodiny na samostatné prozkoumávání prostředí Virtual Lab. Po celou dobu testování byl průběh hry promítán s využitím projektoru, takže všichni žáci mohli pozorovat řešení všech úrovní. U každé úrovně a každého pokusu byl poskytnut didaktický komentář ze strany autora této práce. Testování proběhlo na vzorku 54 žáků třetích ročníků čtyřletého gymnázia v rámci fyzikálního semináře. Skupinu G, které byl zaslán dotazník dvanáct týdnů po testování, tvořilo 28 žáků. Skupinu H, které byl dotazník zaslán těsně po testování, tvořilo 26 žáků. Dotazníky týkající se této hry vyplnilo 24 žáků ze skupiny G a 25 žáků ze skupiny H.

V obou skupinách bylo testování této hry věnováno 90 minut. Z toho bylo přibližně 60 minut věnováno odehrání celé Quantum Game a zbylý čas byl věnován vybraným experimentům a samostatnému průzkumu ve Virtual Lab. Během prvních úrovní byla kromě ovládání herních prvků ukázána možnost zobrazení komentářů a popisu těchto prvků přímo ve hře. Ve skupině G postupovala většina žáků společně s autorem této práce a věnovala pozornost poskytnutým komentářům. Oproti tomu většina žáků ze skupiny H postupovala spíše samostatně a komentáře tak vyslechla zpětně. V obou skupinách byly pro všechny žáky nejobtížnější osmnáctá a dvacátá úloha, které bylo nutné projít společně. Tyto úlohy nevyřešili ani žáci, kteří postupovali samostatně a měli tak na ně více času. Zpočátku testování kladli více dotazů žáci ze skupiny G, přičemž se tyto dotazy týkaly hlavně kvantového provázání. Tyto otázky byly zodpovězeny a žákům bylo doporučeno prostudování materiálů, na které jsou přímo ve hře umístěny odkazy. Četnost dotazů od žáků v této skupině s průchodem hrou postupně klesala. Oproti tomu žáci ze skupiny H kladli čím dál tím více dotazů, které však byly zaměřeny spíše na herní prvky a jejich funkce. Těmto žákům byly poskytnuty odpovědi a byla znovu zdůrazněna možnost zobrazení popisu jednotlivých prvků. Po dokončení Quantum Game byly žákům prezentovány a popsány vybrané experimenty ve Virtual Lab. Konkrétně se jednalo o *Spooky action at distance*, *BB84 protocol* a *Measurement destroys interference*. Následně měli žáci možnost prozkoumat toto prostředí samostatně a sestavit si vlastní experimenty. V závěru byli žáci vyzváni ke vznesení libovolných dotazů, komentářů či připomínek, žádný z nich však tuto možnost nevyužil.

Na začátku testování bylo zřejmé zaujetí většiny žáků, které však přibližně v polovině první části začalo opadat. Nejčastěji k tomu docházelo v případě, kdy žáci došli k již zmíněné osmnácté úloze. Po jejím společném vyřešení se však počáteční zaujetí již nevrátilo. Jeden ze žáků skupiny G si dokonce nasadil sluchátka a po zbytek testování si je nesundal. Přesto však hrou nadále postupoval. Horší situace nastala ve skupině H, kde dvojice žáků opakovaně narušovala průběh testování hlasitým hovorem o irrelevantních záležitostech. Zároveň se tato dvojice nevěnovala testování této hry, přičemž využívala školní notebooky pro jiné účely. Teprve důrazné napomenutí jejich vyučujícího mělo požadovaný efekt, jelikož žáci následně přestali vyrušovat. Při samostatném průzkumu Virtual Lab nebylo pozorováno sestavování vlastních experimentů. Někteří žáci si

sice prohlíželi již sestavené experimenty, většina žáků v obou skupinách však již nepracovala s tímto prostředím. V průběhu testování nebyly pozorovány potíže žáků s angličtinou ve hře.

Celkově byli žáci při samotném hraní zpočátku aktivní a dotazovali se na případné nejasnosti. Jejich zájem a aktivita se však v průběhu testování snížily. Po otestování této hry se žáky je dle autora subjektivního názoru Quantum Game and Virtual Lab by Quantum Flytrap vhodným prostředkem pro rozšiřování povědomí o základních principech kvantové fyziky. Je nicméně důležité dbát zvýšené ostražitosti u výše zmíněných úrovní, jelikož jejich obtížnost může být pro žáky demotivující. Zároveň je vhodné tuto hru zařadit spíše do semináře z fyziky vzhledem k její obtížnosti a časové náročnosti.

Vyučující skupiny G popsala žáky, kteří se účastnili testování jako ty chytřejší oproti průměru. Během příslušné hodiny projevovali někteří žáci iniciativu v podobě řešení úrovní samostatně a rychleji. Většina žáků však spíše postupovala pomaleji společně. Průběh testování zhodnotila vyučující po hodině jako příjemné zpestření běžné výuky, které navíc není plýtvání časem. O hře samotné prohlásila, že ji pravděpodobně bude využívat v hodinách optiky. Vychválila grafickou i faktickou stránku hry. Nicméně poznamenala, že pro některé žáky by mohlo být uvažování o pravděpodobnosti při odrazech až příliš náročné.

Vyučující skupiny H popsal své žáky jako snaživou třídu, ve které se ale najde pár žáků, kteří na fyziku prostě nemají buňky. V průběhu testování bylo poměrně jednoduché rozpoznat snaživé jedince, jelikož se často vyptávali. Oproti tomu se našli dva jedinci, které bylo nutné opakovaně napomínat, jelikož se na počítačích nevěnovali této hře. O tomto testování prohlásil, že pro některé jedince to mohla být zajímavá zkušenost, ale jistě se najdou i tací, kteří to neocení. O hře prohlásil, že přehledně zobrazuje optiku a základy kvantové fyziky. Jako možnou nevýhodu uvedl omezenou možnost postupu hrou, kde je nutné řešit úrovně postupně. Žáci by se totiž mohli někde zaseknout a mohlo by je to po chvíli přestat bavit.

Následuje přehled jednotlivých otázek a příslušných žákovských odpovědí. Všechny níže uvedené odpovědi byly zkopírovány přímo z prostředí Google Forms a nebyly nijak upravovány. Z tohoto důvodu obsahují některé odpovědi pravopisné chyby či nespisovné fráze.

1) Jmenujte alespoň jeden fyzikální poznatek z kvantové fyziky, o kterém jste získali povědomí díky této hře:

Ve skupině G odpovědělo 7 žáků, že si nepamatují nic, protože to bylo už dávno. Zbýlých 17 žáků uvedlo ve svých odpovědích kvantové provázání. Níže jsou uvedeny příklady těchto odpovědí:

- „Lépe jsem porozuměl kvantovému provázání částic“
- „používal jsem tam krystal, který vytvářel provázané částice“
- „šlo tam vytvářet kvantově provázané částice a pak s nimi pracovat“
- „Byly tam provázané částice a když se jeden z těch fotonů odrazil nebo pohltil tak se změnil i ten druhý.“

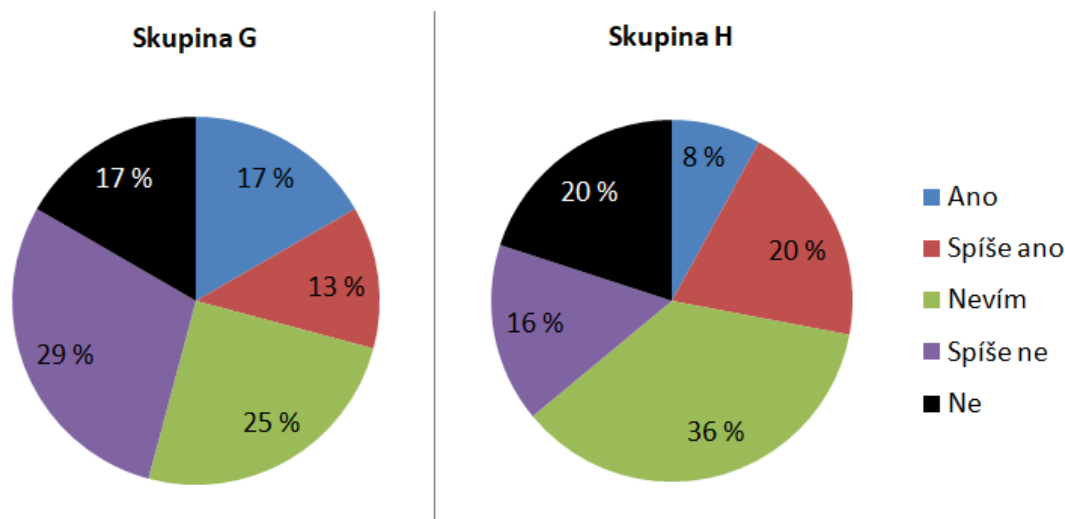
Ve skupině H udalo 5 žáků nerelevantní odpověď nebo odpověděli, že jim hra nic nedala. Ze zbylých 20 žáků uvedlo ve svých odpovědích 17 žáků kvantové provázání a zbylí 3 žáci uvedli superponovaný stav. Níže jsou uvedeny příklady jejich odpovědí, které se nejčastěji vyskytovaly v dotazníku:

- „přes jednu částici můžu změnit druhou, protože jsou provázané“
- „Jako zdroj kvantově provázaných částic se tam používal barnatý krystal. Částice, které vyráběl, vykazovaly zvláštní chování, protože byly provázané.“
- „kvantově provázané částice“
- „Při průchodu polopropustnými zrcadly to bylo 50/50, že se odrazí nebo projde. To odpovídá superponovanému stavu, protože se může stát obojí, ale nevím, co se stalo doopravdy.“

Z výsledků obou skupin lze usuzovat, že nejvýrazněji se do paměti žáků zapsalo kvantové provázání částic, o kterém dle vlastního vyjádření získalo povědomí celkově 34 žáků z celkového počtu 49 žáků. Pouze 3 žákům z obou skupin dohromady utkvěl v paměti superponovaný stav. Navíc všichni tito žáci pocházeli ze skupiny H. To lze interpretovat tak, že pokud někdo ze skupiny G získal povědomí o existenci superponovaného stavu, nebyla zkušenost s tímto jevem dostatečná na dlouhodobé uchování této informace. Alternativou by byla možnost, že o tomto jevu nezískal ze skupiny G povědomí nikdo. Jelikož byl však v obou skupinách superponovaný stav několikrát důrazně komentován, je tato alternativa spíše nepravděpodobná. Celkově lze říct, že z dlouhodobého hlediska není tato hra vhodná pro představení superponovaného stavu. Oproti tomu je vhodnější použít tuto hru pro představení kvantového provázání.

2) Vyhovovala vám tato hra jako prostředek k získání povědomí o základních principech kvantové fyziky?

Tato otázka byla uzavřená a využívala Likertovy škály [48], přičemž žáci měli na výběr z možností *Ano*, *Spíše ano*, *Nevím*, *Spíše ne*, *Ne*.

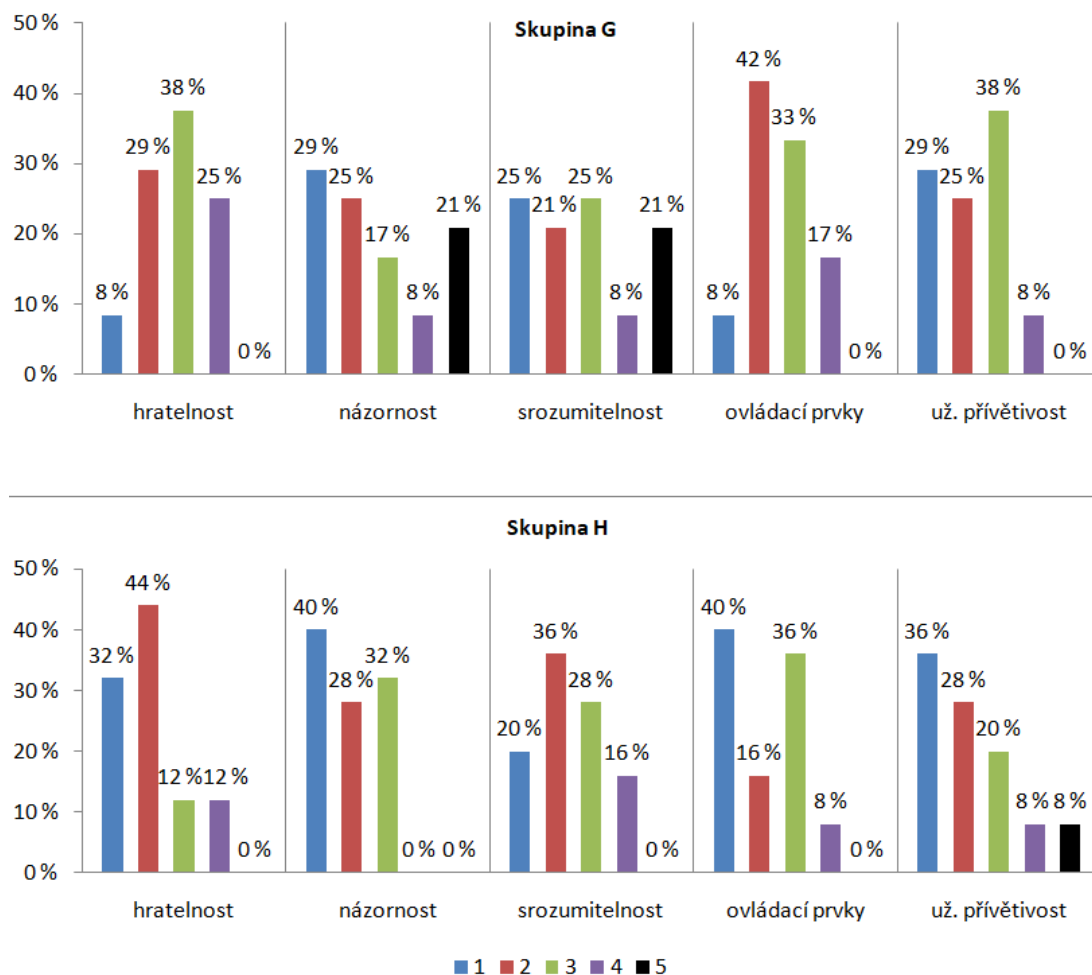


Obrázek 3.10: Grafické znázornění odpovědí žáků na druhou otázku v rámci testování hry Quantum Game and Virtual Lab by Quantum Flytrap

V obou skupinách je patrná velká část žáků, kterým tato hra spíše nevyhovovala. Po zaměření na část žáků, která vyjádřila svůj názor jinak než odpovědí *Nevím*, lze navíc říct, že větší část žáků hodnotila tuto hru záporně. Ve skupině G se jedná téměř o polovinu žáků a ve skupině H přibližně o třetinu žáků.

Po převedení na číselnou stupnici ($Ano = 1, \dots, Ne = 5$) vychází u skupiny G průměrné hodnocení 3,2, což nejlépe odpovídá stupni *Nevím*. Pro skupinu H vychází průměrné hodnocení taktéž 3,2, což odpovídá témuž stupni. Odtud je patrné, že průměrné hodnocení obou skupin dohromady nejlépe odpovídá stupni *Nevím*, což lze reprezentovat jako nestranné hodnocení.

3) Na základě vyzkoušení této hry ohodnoťte kategorie *hratelnost*, *názornost*, *srozumitelnost*, *ovládací prvky*, *uživatelská přívětivost* na stupnici 1 až 5 (1 – nejlepší, 5 – nejhorší).



Obrázek 3.11: Grafické znázornění odpovědí žáků na třetí otázku v rámci testování hry Quantum Game and Virtual Lab by Quantum Flytrap

V rámci odpovědí na tuto otázku je zřejmé, že žáci ze skupiny G hodnotili všechny aspekty hry spíše neutrálně a žáci ze skupiny H spíše pozitivně až spíše neutrálně. Výrazný vliv na hodnocení této hry měla pravděpodobně výše zmíněná osmnáctá úloha, která negativně ovlivnila chování většiny žáků v průběhu testování. Dalším vlivem mohla být volba společného či samostatného postupu hrou.

Pro přehled jsou zde uvedena průměrná hodnocení (viz Tabulka 3.4) jednotlivých kategorií v rámci obou skupin.

Skupina	Hratelnost	Názornost	Srozumitelnost	Ovládací prvky	Už. přívětivost
G	2,8	2,7	2,8	2,6	2,3
H	2,0	1,9	2,4	2,1	2,2

Tabulka 3.4: Průměrná hodnocení kategorií v rámci testování hry Quantum Game and Virtual Lab by Quantum Flytrap

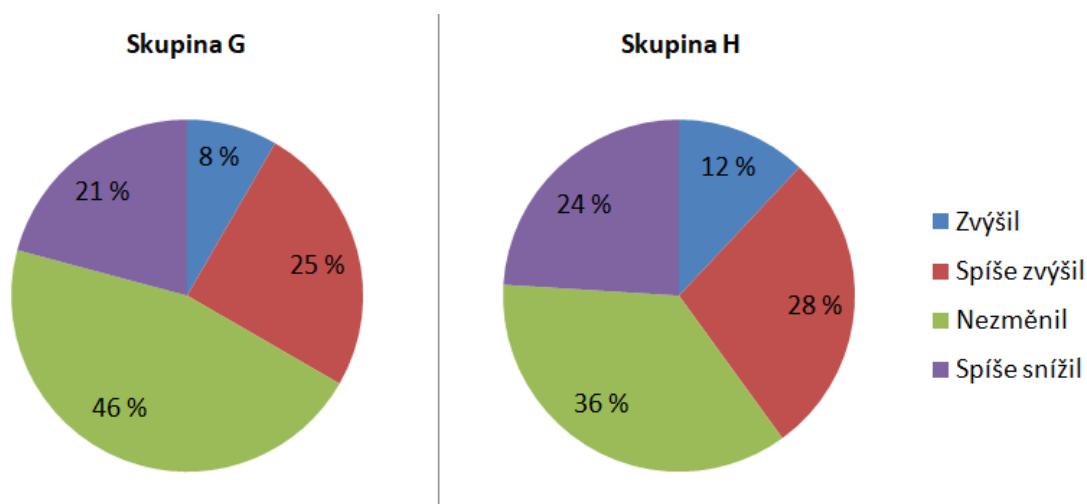
Z těchto hodnot je vidět, že nejhůře ohodnotili žáci obou skupin kategorii *srozumitelnost*, přičemž její průměrné hodnocení je spíše neutrální. Všechny ostatní kategorie byly celkově ohodnoceny spíše pozitivně až spíše neutrálně. Průměrné hodnocení obou skupin dohromady odpovídá v kategorii *srozumitelnost* stupni 3 a ve všech ostatních kategoriích stupni 2, což lze reprezentovat jako spíše pozitivní hodnocení.

4) Vyzkoušel/a jste si tuto hru zahrát i mimo vyučovací hodinu?

Všichni testovaní žáci z obou skupin zvolili na tuto otázku odpověď *Ne*. To si lze vysvětlit tím, že Quantum Game má omezený herní obsah, který byl celý vyzkoušen v rámci testování. Pokud jde o Virtual Lab, je možné, že žáky odradila přílišná volnost a absence zadání.

5) Váš zájem o kvantovou fyziku se díky zkušenostem s touto hrou:

Podobně jako ve druhé otázce i zde se jedná o uzavřenou otázku s využitím Likertovy škály [48], přičemž žáci měli na výběr z možností *Zvýšil*, *Spíše zvýšil*, *Nezměnil*, *Spíše snížil*, *Snížil*.



Obrázek 3.12: Grafické znázornění odpovědí žáků na pátou otázku v rámci testování hry Quantum Game and Virtual Lab by Quantum Flytrap

Při nahlédnutí do grafů výše je patrné, že zkušenost žáků s touto hrou měla u některých z nich spíše negativní dopad na jejich zájem o kvantovou fyziku. V rámci skupiny G se jedná o pět žáků a ve skupině H se jedná o šest žáků.

Nejvíce žáků v obou skupinách sdělilo, že se jejich zájem o kvantovou fyziku nezměnil. Při pohledu na žáky, jejichž zájem byl touto hrou ovlivněn je však patrné, že převažují žáci, kteří zvolili odpověď *Zvýšil* nebo *Spíše zvýšil*. Za úspěch lze považovat, že nikdo ze žáků nezvolil možnost *Snížil*.

Po převedení na číselnou stupnici (*Zvýšil* = 1, . . . , *Snížil* = 5) vychází u skupiny G průměrné hodnocení 2,8, což nejlépe odpovídá stupni *Nezměnil*. Pro skupinu H vychází průměrné hodnocení 2,7, což odpovídá téměř stupni. Odtud je patrné, že žáci celkově hodnotili tuto hru z hlediska účinku na jejich zájem o kvantovou fyziku spíše neutrálně a nelze proto říct, že by hra změnila zájem žáků o kvantovou fyziku.

6) Prostor pro libovolné komentáře či připomínky k proběhlé hodině či hře samotné:

U této hry odpověděl na šestou otázku pouze jediný žák, který byl ze skupiny H. Zbýlých 48 žáků neodpovědělo. Žákova odpověď byla:

- „Hra je dobře udělaná, ale bohužel jsem měl pocit, že levely, kde byl uveden nový prvek nebyly nejlépe vysvětleny. Myslím, že by v takových případech pomohlo přidat jeden level navíc, kde jsou nové principy vysvětleny.“

V tomto případě by žákovi zřejmě mohl pomoci i obsáhlejší komentář v průběhu hraní. Případně by mohla pomoci vyšší časová dotace, aby měl možnost přečíst si o daných prvcích hrou poskytnuté vysvětlující materiály.

3.3 Vyhodnocení provedeného šetření

Na základě odpovědí 172 žáků třetích a čtvrtých ročníků gymnázií a odpovídajících ročníků osmiletých gymnázií, kteří se zapojili do testování čtyř vybraných kvantových her, byly zjištěny níže uvedené skutečnosti.

Testování deskové hry Entanglion a následného šetření se zúčastnilo celkem 23 žáků maturitních ročníků gymnázia. Tato hra přinesla žákům povědomí o existenci qubitů a kvantových hradel. Hra byla žáky přijata spíše nestranně, nicméně zájem žáků o kvantovou fyziku spíše zvýšila. Samotnou hru pak rovněž hodnotili nestranně.

Testování programu Quantum Odyssey a následného šetření se zúčastnilo celkem 51 žáků třetích ročníků gymnázia. Tato hra přinesla žákům povědomí o existenci qubitů a kvantových hradel. Hra byla žáky přijata nestranně, nicméně jejich zájem o kvantovou fyziku spíše zvýšila. Samotnou hru pak žáci hodnotili spíše pozitivně.

Testování online hry Psi and Delta a následného šetření se zúčastnilo celkem 49 žáků třetích ročníků gymnázia. Tato hra přinesla žákům povědomí o existenci hustoty pravděpodobnosti a vztahu superponovaného stavu a měření. Hra byla žáky přijata spíše pozitivně, nicméně zájem žáků o kvantovou fyziku spíše nezměnila. Samotnou hru pak žáci hodnotili spíše pozitivně.

Testování online hry Quantum Game and Virtual Lab by Quantum Flytrap a následného šetření se zúčastnilo celkem 49 žáků třetích ročníků gymnázia. Tato hra přinesla žákům povědomí o existenci kvantového provázání. Hra byla žáky přijata spíše neutrálně a zájem žáků o kvantovou fyziku spíše nezměnila. Samotnou hru pak žáci hodnotili spíše pozitivně.

Celkově lze říct, že vybrané hry byly žáky přijaty spíše neutrálně, přičemž zájem žáků o kvantovou fyziku v důsledku zkušeností s danými hrami nebyl snížen. Na základě odpovědí žáků na první otázku v dotazníku lze říct, že tyto hry přinesly povědomí o existenci alespoň jednoho z výše uvedených poznatků celkem 137 žákům z celkového počtu 172 žáků, kteří vyplnili dotazník. Závěrem lze tedy prohlásit, že tyto hry jsou vhodným prostředkem pro rozšiřování povědomí o základních principech kvantové fyziky.

Závěr

V rámci této práce byly splněny vytyčené cíle. Po provedení rešerše byly z celkového počtu 68 nalezených her vybrány dvě online hry, jeden samostatný program a jedna desková hra, přičemž principy těchto her se opírají o základní myšlenky kvantové fyziky. Použitelnost vybraných her jako prostředků pro rozšíření povědomí o základních principech kvantové fyziky bylo následně otestováno na vzorku 189 žáků středních škol. Následného dotazníkového šetření, které bylo hlavní metodou sběru dat použitou v této práci, se zúčastnilo 172 žáků. Na základě zpracování jejich odpovědí byla potvrzena možnost využití těchto her pro rozšíření povědomí o základních principech kvantové fyziky.

V textu práce byla stručně popsána didaktická hra ve výuce, přičemž toto široké téma bylo následně zúženo na hry ve výuce kvantové fyziky. V rámci této části je rovněž podána současná definice kvantových her. Součástí této práce je dále podrobný popis vybraných her včetně představení jejich pravidel, popisu souvislostí těchto her s kvantovou fyzikou a jejich celkové zhodnocení.

V rámci praktické části této práce bylo provedeno testování možného využití vybraných her ve výuce. Tyto hry, byť byly žáky přijaty spíše neutrálně, přinesly povědomí o existenci některého z poznatků kvantové fyziky celkem 137 žákům z celkového počtu 172 žáků, kteří se zúčastnili dotazníkového šetření. Zájem žáků o kvantovou fyziku se po zkušenostech s těmito hrami celkově nesnížil.

Vhodným způsobem by na tuto práci šlo navázat hledáním způsobů, kterými lze zakomponovat hry do výuky jako součást běžné hodiny. Alternativou by bylo vytvoření nové kvantové hry, která by svou náročností byla zaměřena právě na žáky středních škol. Vhodnost této hry by následně musela být pečlivě otestována na vzorku žáků středních škol. Další alternativou je pak výzkum výuky kvantové fyziky na střední škole.

Literatura

- [1] UBBEN, M., BITZENBAUER, P. (2023). Exploring the relationship between students' conceptual understanding and model thinking in quantum optics. *Frontiers in Quantum Science and Technology, Volume 2*. ISSN 2813-2181. Online. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frqst.2023.1207619/full> [citováno 2024-05-23]
- [2] FOX, M. F. J., ZWICKL, B. M., LEWANDOWSKI, H. J. (2020). Preparing for the quantum revolution: what is the role of higher education? *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, 16 020131. Online. Dostupné z: <https://journals.aps.org/prper/abstract/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.020131> [citováno 2024-06-19]
- [3] VRÁNOVÁ, A. a kol. (2006) *Hry ve vyučování matematice jako významná strategie vedoucí k rozvoji klíčových kompetencí žáků*. Online. Dostupné z: <https://people.fjfi.cvut.cz/novotant/jarmila.novotna/D04%20Hry.pdf>. [citováno 2024-05-14].
- [4] KREJČOVÁ, E., VOLFOVÁ, M. (2001). *Didaktické hry v matematice*. Hradec Králové, Gaudeamus. ISBN 80-7041-423-5
- [5] OTÁHALOVÁ, K. (2021). *Didaktické hry ve fyzikálním vzdělávání*. Online. Dostupné z: <https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/150267/120397277.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [citováno 2024-05-16].
- [6] GERHÁTOVÁ, Ž., OŽVOLDOVÁ, M. (2010). *Interaktivní tabuľa vo vyučovaní fyziky – didaktická technika i učebná pomôcka*. Online. Dostupné z: http://sfs.savba.sk/smolenice/pdf_10/09_Gerhatova_Ozvoldova.pdf. [citováno 2024-05-16].
- [7] KABRT, V. (2015). *Didaktická hra ve výuce fyziky na ZŠ*. Online. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/19820/1/Vladimir%20Kabrt_Didakticka%20hra%20ve%20vyuce%20fyziky%20na%20ZS_2015.pdf. [citováno 2024-05-16].
- [8] STYER, D. F. (1996). Common misconceptions regarding quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 64, 31–34. Online. Dostupné z: <https://www2.oberlin.edu/physics/dstyer/TeachQM/misconnzz.pdf>. [citováno 2024-05-23].
- [9] PIISPANEN, L., MORRELL, E., PARK, S., PFAFFHAUSER, M., KULTIMA, A. (2023). The History of Quantum Games. *2023 IEEE Conference on Games (CoG)*, 1–8. Online. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/reader/2d70bc4a116d31e39992e0c541d9c2ae01d17e10>. [citováno 2024-05-23].

- [10] GORDON, M., GORDON, G. (2010). Quantum computer games: quantum minesweeper. *2010 Physics Education, Volume 45, Number 4*. Online. Dostupné z: <https://minesweepergame.com/research/quantum-computer-games-quantum-minesweeper-2010.pdf>. [citováno 2024-05-23].
- [11] PIISPANEN, L. et al. (2022). Defining quantum games. *ArXiv, abs/2206.00089*. Online. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/reader/495613ea5048775f0f74f80439d23cd4c4afb7e4>. [citováno 2024-05-23].
- [12] SESKIR, Z. C. et al. (2022). Quantum games and interactive tools for quantum technologies outreach and education. *Optical Engineering 61 (2022): 081809 - 081809*. Online. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2202/2202.07756.pdf>. [citováno 2024-06-21].
- [13] MANČAL, T. (2023). Alberte, nezlob se! Online. Dostupné z: https://vesmir.cz/cz/on-line-clanky/2023/09/alberte-nezlob-se.html?fbclid=IwAR3ZJL1xLTeRosUB5z9K10hFjfjW2mzyX6ISp48D7_nsTzjbjk7cx9ZiyWQ_aem_ARj50eNaOUF10mJC6_wPDHXR88Eo5tCtw5_Z2V141v2iLKbBZ5JW0aE-Um4KvKR0qaA. [citováno 2024-06-21].
- [14] NITA, L. et al. (2020). The challenge and opportunities of quantum literacy for future education and transdisciplinary problem-solving. *Research in Science & Technological Education 41 (2020): 564 - 580*. Online. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/2004.07957>. [citováno 2024-06-21].
- [15] BONDANI, M. et al. (2022). Introducing Quantum Technologies at Secondary School Level: Challenges and Potential Impact of an Online Extracurricular Course. *Physics (2022): n. pag.* Online. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/reader/0820df5da7f87e2d14a57a303eccf06b99d4dae0>. [citováno 2024-06-21].
- [16] SANDHIR, R. P. (2023). Quantum Explorers: A Game-Based Approach to Quantum Education. *Qiskit (2023)*. Online. Dostupné z: <https://medium.com/qiskit/quantum-explorers-a-game-based-approach-to-quantum-education-9b84d0a0ba46>. [citováno 2024-06-21].
- [17] MIGDAŁ, P. et al. (2022). Visualizing quantum mechanics in an interactive simulation–Virtual Lab by Quantum Flytrap. *Optical Engineering 61.8 (2022): 081808 - 081808*. Online. Dostupné z: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/optical-engineering/volume-61/issue-08/081808/Visualizing-quantum-mechanics-in-an-interactive-simulation--Virtual-Lab/10.1117/1.0E.61.8.081808.full?tab=ArticleLink>. [citováno 2024-06-21].

- [18] NITA, L. et al. (2021). Inclusive learning for quantum computing: supporting the aims of quantum literacy using the puzzle game Quantum Odyssey. Online. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/2106.07077>. [citováno 2024-06-21].
- [19] *ScienceAtHome – Quantum Games*. Online. Dostupné z: <https://www.scienceathome.org/quantum/games/>. [citováno 2024-06-21].
- [20] ARCHER, N. (2022). Visual design of quantum physics–Lessons learned from nine gamified and artistic quantum physics projects. *MS thesis. (2022)*. Online. Dostupné z: <https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/c72d4e8f-e86c-426b-9ac7-9ce16f12a366/content>. [citováno 2024-06-21].
- [21] PIISPANEN, L. (2023). Designing Quantum Games and Quantum Art for Exploring Quantum Physics. *2023 IEEE Conference on Games (CoG)*, 1–8. Online. Dostupné z: https://acris.aalto.fi/ws/portalfiles/portal/136621714/SCI_Piispanen_IEEE_CoG_2023.pdf. [citováno 2024-06-21].
- [22] CARBERRY, D. E. et al. (2022). Board Games to teach Quantum Technologies to Engineers: A Peer Instruction Approach. *SSRN Electronic Journal (2022): n. pag.* Online. Dostupné z: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4258302. [citováno 2024-06-21].
- [23] WEISZ, J. D., ASHOORI, M., ASHKTORAB, Z. (2018). Entanglion: A Board Game for Teaching the Principles of Quantum Computing. *Proceedings of the 2018 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play, CHI PLAY '18*, 523–534. ACM, New York, NY, USA. ISBN 978-1-4503-5624-4.
- [24] LOUDA, J. *Entaglion*. Online. Dostupné z: <https://github.com/janlouda/entanglion>. [citováno 2024-06-26].
- [25] LOUDA, J. *Pravidla deskové hry Entaglion*. Online. Dostupné z: <https://github.com/janlouda/entanglion/tree/master/pravidla> [citováno 2024-06-23]
- [26] LOUDA, J. *Herní deska Entaglion*. Online. Dostupné z: <https://github.com/janlouda/entanglion/blob/master/images/setup.png>. [citováno 2023-11-26].
- [27] LOUDA, J. *Akční karty Entaglion*. Online. Dostupné z: https://github.com/janlouda/entanglion/blob/master/images/engine_cards.png. [citováno 2023-11-26].
- [28] LOUDA, J. *Kvantové události Entaglion*. Online. Dostupné z: <https://raw.githubusercontent.com/janlouda/entanglion/master/images/events.png>. [citováno 2023-11-29].

- [29] LOUDA, J. *Součásti kvantového počítače Entaglion*. Online. Dostupné z: https://raw.githubusercontent.com/janlouda/entanglion/master/images/quantum_components.png. [citováno 2023-11-29].
- [30] QUARKS INTERACTIVE. *Quantum Odyssey*. Online. Dostupné z: <https://www.quarksinteractive.com/quantum-odyssey>. [citováno 2024-01-10].
- [31] QUARKS INTERACTIVE. *Quantum Odyssey ve službě Steam*. Online. Dostupné z: https://store.steampowered.com/app/2802710/Quantum_Odyssey/ [citováno 2024-06-21].
- [32] LUKAŠÍK, P. (2012) Základní principy kvantového výpočetního systému *Trilobit*. *Informatika*. Číslo 2/2012 ISSN 1804-1795. Online. Dostupné z: https://trilobit.fai.utb.cz/zakladni-principy-quantoveho-vypocetniho-systemu_1e06ceed-17c9-495d-b3b7-9363bed2c098 [citováno 2024-06-22]
- [33] VISWANATH, P. (2021) Quantum States And The Bloch Sphere *Quantum Untangled*. Online. Dostupné z: <https://medium.com/quantum-untangled/quantum-states-and-the-bloch-sphere-9f3c0c445ea3> [citováno 2024-06-22]
- [34] QUARKS INTERACTIVE. *Quantum Odyssey* [software]. Dostupné z: <https://www.quarksinteractive.com/quantum-odyssey>. [citováno 2024-03-05].
- [35] *Psi and Delta*. Online. Dostupné z: <https://learnqm.gatech.edu/WebGLMay2018/index.html>. [citováno 2023-12-13].
- [36] FOTI, C. et al. (2021) Quantum Physics Literacy Aimed at K12 and the General Public *Universe*, 7, 86. Online. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/reader/103bf4c63bf7dcef81b0ecc67bdd1824c8cd2aa2> [citováno 2024-06-29]
- [37] *Quantum Game by Quantum Flytrap*. Online. Dostupné z: <https://lab.quantumflytrap.com/game>. [citováno 2024-03-06].
- [38] *Virtual Lab by Quantum Flytrap*. Online. Dostupné z: <https://lab.quantumflytrap.com/lab>. [citováno 2024-03-06].
- [39] DORLAND, B. et al. (2019) Quantum physics vs. classical physics: introducing the basics with a virtual reality game *Games and Learning Alliance: 8th International Conference, GALA 2019, Athens, Greece, November 27–29, 2019, Proceedings 8*. Springer International Publishing, 2019. p. 383-393. Online. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Rafael-Bidarra/publication/337390012_Quantum_Physics_vs_Classical_Physics_Introducing_the_Basics_with_a_Virtual_Reality_Game/links/5df3a4724585159aa47a993c/Quantum-Physics-vs-Classical-Physics-Introducing-the-Basics-with-a-Virtual-Reality-Game.pdf. [citováno 2024-06-29].

- [40] WEISZ, J. D., ASHOORI, M., ASHKTORAB, Z. (2019) Thinking too classically: research topics in human-quantum computer interaction *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2019.* p. 1-12. Online. Dostupné z: <http://library.usc.edu/ph/ACM/CHI2019/1proc/paper256.pdf>. [citováno 2024-06-29].
- [41] KAUR, M., VENEGAS-GOMEZ, A. (2022) Defining the quantum workforce landscape: a review of global quantum education initiatives *Optical Engineering, 2022, 61.8: 081806-081806*. Online. Dostupné z: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/optical-engineering/volume-61/issue-8/081806/Defining-the-quantum-workforce-landscape--a-review-of-global/10.1117/1.0E.61.8.081806.full>. [citováno 2024-06-29].
- [42] *Quantum Game by Quantum Flytrap*. Online. Dostupné z: <https://lab.quantumflytrap.com/game/level/more-than-one>. [citováno 2024-03-12].
- [43] *Virtual Lab by Quantum Flytrap*. Online. Dostupné z: <https://lab.quantumflytrap.com/lab/spooky-action-at-a-distance>. [citováno 2024-03-19].
- [44] KAFKA, J. *Dotazník se zpětnou vazbou ke hře Enatnglion*. Online. Dostupné z: https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLScc1AvgFstKhM1CzIzZaD499_nHd0Zw8kExlivXSGT2vG0zPA/viewform. [citováno 2024-06-28].
- [45] KAFKA, J. *Dotazník se zpětnou vazbou ke hře Quantum Odyssey*. Online. Dostupné z: https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLScQymM16r5n_25CU2d84BeRelp_KYmj466nL6-ghZq3RSTFtQ/viewform. [citováno 2024-06-28].
- [46] KAFKA, J. *Dotazník se zpětnou vazbou ke hře Psi and Delta*. Online. Dostupné z: https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSf0y05wgvP6UtcTnJZhh-tUHK0QgpHg3Zq65hu_Kj3WF1BVCw/viewform. [citováno 2024-06-28].
- [47] KAFKA, J. *Dotazník se zpětnou vazbou ke hře Quantum Game and Virtual Lab by Quantum Flytrap*. Online. Dostupné z: https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSeI_EDRwBvw401T8DW6D395r36SbylS2Vlat9KIUKe_N1xZbQ/viewform. [citováno 2024-06-28].
- [48] ROD, A. (2012) Likertovo škálování *E-Logos, Electronic Journal for Philosophy, 13/2012*. ISSN 1211-0442. Online. Dostupné z: <https://elogs.vse.cz/pdfs/elg/2012/01/13.pdf>. [citováno 2024-06-26].

Seznam obrázků

2.1	Herní deska a desky obou lodí [26]	9
2.2	Akční karty [27]	9
2.3	Kvantové události [28]	11
2.4	Součásti kvantového počítače [29]	12
2.5	Relativní a globální fáze komplexních čísel α a β	16
2.6	Blochova sféra	17
2.7	Poloha stavů z významných bází na Blochově sféře	18
2.8	Působení Pauliho X hradla na stavy qubitu $ 0\rangle$ a $ 1\rangle$	19
2.9	Působení Pauliho X hradla na qubit ve stavu $ 0\rangle$ ve hře Quantum Odyssey [34]	19
2.10	Působení Z hradla na stavy qubitu $ +\rangle$, $ -\rangle$, $ i\rangle$ a $ -i\rangle$	20
2.11	Působení Z hradla na qubit ve stavu $ 1\rangle$ ve hře Quantum Odyssey [34]	21
2.12	Působení S hradla na stavy qubitu $ +\rangle$, $ -\rangle$, $ i\rangle$ a $ -i\rangle$	22
2.13	Působení S hradla na qubit ve stavu $ 1\rangle$ ve hře Quantum Odyssey [34]	23
2.14	Působení Y hradla na stavy qubitu $ 0\rangle$, $ 1\rangle$, $ +\rangle$ a $ -\rangle$	23
2.15	Působení Y hradla na qubit ve stavu $ 0\rangle$ ve hře Quantum Odyssey [34]	24
2.16	Působení Hadamardova hradla na stavy qubitu $ 0\rangle$, $ 1\rangle$, $ +\rangle$ a $ -\rangle$	25
2.17	Působení Hadamardova hradla na qubit ve stavu $ 1\rangle$ ve hře Quantum Odyssey [34]	26
2.18	Průběh hustoty pravděpodobnosti a pravděpodobnost nalezení elektronu ve hře Psi and Delta [35]	29
2.19	Znázornění energetických hladin a změny barvy světla ve hře Psi and Delta [35]	29
2.20	Generátor provázaných částic v Bellově singletním stavu [42]	32
2.21	Experiment Spooky action at distance ve Virtual Lab [43]	33
3.1	Grafické znázornění odpovědí žáků na druhou otázku v rámci testování hry Entanglion	39
3.2	Grafické znázornění odpovědí žáků na třetí otázku v rámci testování hry Entanglion	40
3.3	Grafické znázornění odpovědí žáků na pátou otázku v rámci testování hry Entanglion	41
3.4	Grafické znázornění odpovědí žáků na druhou otázku v rámci testování hry Quantum Odyssey	46
3.5	Grafické znázornění odpovědí žáků na třetí otázku v rámci testování hry Quantum Odyssey	47
3.6	Grafické znázornění odpovědí žáků na pátou otázku v rámci testování hry Quantum Odyssey	48
3.7	Grafické znázornění odpovědí žáků na druhou otázku v rámci testování hry Psi and Delta	53
3.8	Grafické znázornění odpovědí žáků na třetí otázku v rámci testování hry Psi and Delta	54
3.9	Grafické znázornění odpovědí žáků na pátou otázku v rámci testování hry Psi and Delta	55

3.10 Grafické znázornění odpovědí žáků na druhou otázku v rámci testování hry Quantum Game and Virtual Lab by Quantum Flytrap .	60
3.11 Grafické znázornění odpovědí žáků na třetí otázku v rámci testování hry Quantum Game and Virtual Lab by Quantum Flytrap .	61
3.12 Grafické znázornění odpovědí žáků na pátou otázku v rámci testování hry Quantum Game and Virtual Lab by Quantum Flytrap .	62

Seznam tabulek

2.1	Počáteční a koncové polohy lodí při přesunu do galaxie Enanglion a zpět [25]	11
3.1	Průměrná hodnocení kategorií v rámci testování hry Entanglion .	41
3.2	Průměrná hodnocení kategorií v rámci testování hry Quantum Odyssey	48
3.3	Průměrná hodnocení kategorií v rámci testování hry Psi and Delta	55
3.4	Průměrná hodnocení kategorií v rámci testování hry Quantum Game and Virtual Lab by Quantum Flytrap	62

A. Příloha č. 1

Níže jsou vypsané všechny relevantní hry, aktivity s herními prvky a herní platformy nalezené v rámci rešerše.

- Quantum Minesweeper [10]
- Quantum Moves 2 [11; 12]
- Hamsterwave [11; 21]
- Quantum TiqTaqToe [11; 12]
- Quantum Game [11]
- Quantum Entanglement [11]
- Quantum Labyrinth [11]
- Escape from the Quantum Computer [11]
- Cat/Box/Scissors [11; 20]
- C.L.A.Y. [11]
- Quantum Sheep [11]
- Quantum Cabare [11]
- Quantum Fruit [11]
- meQuanics [11]
- Quantum Awesomeness [11]
- Quantum Break [11]
- Hopping Mode [11]
- 1-D Quantum MEchanics Applet [12]
- Alice Challenge [12]
- Hello Qiskit / Hello Quantum [12]
- Particle in a Box [12]
- Psi and Delta [12]
- Quantum Game with Photons [12]
- Quantum Odyssey [12; 18]
- Virtual Lab by Quantum Flytrap [12; 17]
- QPlayLearn [12]
- Quantum Tensors [12]
- ScienceAtHome [12; 19]
- Quantum Composer [12]
- QEngine [12]
- The Virtual Quantum Optics Laboratory (VQOL) [12]
- Dave the Hackerman by Dodo Boys [12]
- QuanTetrum [12]
- QG Crusher [12]
- Quaze [12]
- Qhess [12]
- Quantum Mafia [12]
- Quantum Boss Battle [12]
- Battle of Millenniums [12]
- Quantum Uno [12]
- Quantum FPS [12]
- Quantum Invasion [12]
- Trump cards at Birmingham [12]
- Quantum Tour [12]
- Quantum Garden [12; 21]
- Quantum Jungle [12]
- Alberte, nezlob se! [13]
- Puzzle visualization tool [14]
- IBM Q-composer [15]
- QuVis simulation of Stern–Gerlach experiment [15]

- QuVis simulation of BBM92 cryptographic protocol [15]
- Quantum Explorers [16]
- Quantum Moss [20]
- Weaving of Reality [20]
- Heisenberg's Bicycle [20]
- Playful Asset Package [20]
- LIT – Of Quantum and Life [20]
- Ludic Quantum Project [20]
- Quantum Explorations [20]
- Quantum Cabaret [20]
- Through the Quantum Gate [20]
- QWiz [21]
- Lemmings Condensate [21]
- Quantum Playground [21]
- States & Gates [22]
- Quantum Race [22]
- Entanglion [22]
- Quantum Tic-Tac-Toe [22]

B. Příloha č. 2

Tato příloha je tvořena příkladem jednoho z dotazníků sestavených a využitých v rámci této práce. Dotazník je určen pro internetové rozhraní a je z něj rovněž převzat [45], čemuž odpovídá jeho vzhled a kvalita.