

Pochopení základních konceptů kvantové mechaniky mezi budoucími učiteli fyziky

Jaroslav Kafka

Univerzita Karlova, MFF KDF

VNUF 2026

• Porovnání sylabů

- 11 studijních programů
- 98 unikátních témat napříč 22 sylaby
- Společná témata
 - Vlnově–částicový dualismus
 - Základní postuláty
 - Schrödingerova rovnice a její aplikace
 - Relace neurčitosti
 - Spin
 - Energetické hladiny a spektrum
 - Bohrov model atomu
 - Atomová jádra a jejich charakteristiky
 - Radioaktivita
 - Elementární částice

• Konceptuální testy

- Action Concept Inventory (ACI) [McGinness a Savage 2016]
- Quantum Mechanics Assessment (QMA) [Singh 2008]
- Quantum Mechanics Assessment Tool (QMAT) [Goldhaber et al. 2009]
- Quantum Mechanics Concept Assessment (QMCA) [Sadaghiani a Pollock 2018]
- Quantum Mechanics Concept Inventory (QMCI) [Falk 2004]
- Quantum Mechanics Conceptual Survey (QMCS) [McKagan et al. 2008]
- Quantum Mechanics Formalism and Postulates (QMFPS) [Marshman a Singh 2021]
- Quantum Mechanics Survey (QMS) [Zhu a Singh 2011]
- Quantum Mechanics Visualization Instrument (QMVI) [Cataloglu a Robinett 2000]
- Quantum Physics Conceptual Survey (QPCS) [Wutti-prom et al. 2009]
- Relativity Concept Inventory (RCI) [Aslanides a Savage 2013]

- Multiple-choice formát
- 38 úloh, 50 minut
- Témata:
 - Vlnová funkce
 - Měření
 - Časová závislost
 - Pravděpodobnost
 - Nekonečná pravoúhlá potenciálová jáma
 - 1D tunelování
 - Energetické hladiny
 - Spin
- Devět párů izomorfních úloh (spin a vlnová funkce)
- Pět párů navazujících úloh (odpověď na otázku a zdůvodnění odpovědi)

Ukázka izomorfního páru úloh

2. Uvažujte nyní měření energie systému výše, $\left(\sqrt{\frac{4}{5}}\psi_1(x) + \sqrt{\frac{1}{5}}\psi_2(x)\right)$, jehož výsledkem je hodnota energie s **nejvyšší pravděpodobností**. Jak vypadá normovaná vlnová funkce systému po tomto měření?

- A. $\sqrt{\frac{4}{5}}\psi_1(x)$
- B. $\sqrt{\frac{1}{5}}\psi_2(x)$
- C. $\psi_1(x)$
- D. $\psi_2(x)$
- E. $\sqrt{\frac{4}{5}}\psi_1(x) + \sqrt{\frac{1}{5}}\psi_2(x)$

23. Uvažujte měření S_z ve výše uvedeném systému $\left(\sqrt{\frac{1}{5}}|+\rangle + \sqrt{\frac{4}{5}}|-\rangle\right)$. Naměříte

nejpravděpodobnější hodnotu z-ové složky spinu. Jaký bude normovaný stav tohoto systému po měření?

- A. $\sqrt{\frac{4}{5}}|-\rangle$
- B. $\sqrt{\frac{1}{5}}|+\rangle$
- C. $|-\rangle$
- D. $|+\rangle$
- E. $\sqrt{\frac{1}{5}}|+\rangle + \sqrt{\frac{4}{5}}|-\rangle$

Ukázka páru navazujících úloh

13. Jakou část/jaké části časově závislé (obecně komplexní) vlnové funkce $\Psi(x, t)$ potřebujete, abyste určili pravděpodobnost konkrétního výsledku měření polohy?
- A. Pouze reálnou část.
 - B. Pouze imaginární část.
 - C. Jak reálnou, tak imaginární část.
 - D. Buď reálnou, nebo imaginární část.
 - E. Vlnová funkce neobsahuje informace o výsledku tohoto měření.
14. Vyberte **nejlepší zdůvodnění** své odpovědi na předchozí úlohu z možností níže.
- A. Měřitelné veličiny jako například poloha jsou reálné.
 - B. Pouze reálná část závisí na poloze a $\langle x \rangle$ nemá imaginární část, jelikož se vyruší v $\Psi^*(x, t)\Psi(x, t)$.
 - C. Pokud by $\Psi(x, t)$ byla reálná, nebyl by výraz $|\Psi(x, t)|^2$ závislý na čase.
 - D. $|\Psi(x, t)|^2$ lze určit pouze s oběma částmi, protože $\Psi(x, t)$ nemusí být reálná.
 - E. Vlnová funkce tohoto systému nemá imaginární část.

- **Charakteristika vzorku ($N = 41$ (44^*))**

- Dvě skupiny ($N_1 = 15$; $N_2 = 26$ (29^*))

- Věk (20–24)

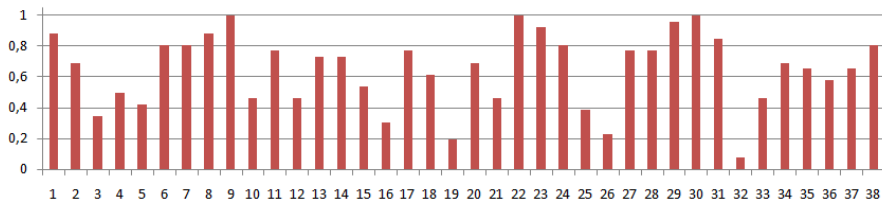
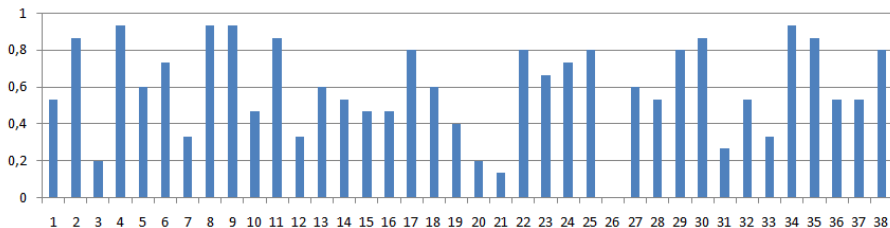
- Ročník studia (druhý ročník Bc. – první ročník NMgr.)

- **Deskriptivní statistika**

Skupina	N	Průměr	Směrodatná odchylka	Cronbachovo α
S1	15	0,59	0,13	0,73
S2	26 (29*)	0,65 (0,63)	0,15 (0,16)	0,80 (0,83)
Celkem	41 (44*)	0,63 (0,62)	0,14 (0,15)	0,77 (0,79)

Výsledky pilotního šetření

- Percentuální úspěšnost jednotlivých úloh ve skupinách S1 a S2



25. Uvažujte nyní časovou prodlevu mezi měřením S_x a S_z . Záleží pravděpodobnost naměření hodnoty $+\hbar$ pro z -ovou složku spinu na délce této prodlevy?

- A. Ano
- B. Ne

26. Vyberte **nejlepší zdůvodnění** své odpovědi na předchozí úlohu z možností níže.

- A. Postupem času se částice vrátí do původního stavu.
- B. Kvůli precesnímu pohybu částice v magnetickém poli se pravděpodobnosti naměření jednotlivých hodnot mění s časem.
- C. $\hat{S}_z$ komutuje s Hamiltoniánem, takže pravděpodobnosti naměření jeho vlastních hodnot nezávisí na čase.
- D. Všechny pravděpodobnosti při libovolných měřeních v kvantové mechanice jsou časově nezávislé, protože se určují pomocí kvadrátu absolutní hodnoty příslušných koeficientů.
- E. Jakmile proběhne měření S_x , nenachází se již částice ve stavu, který by byl vlastním stavem Hamiltoniánu.

9. Pravděpodobnost naměření hodnoty energie E_2 má v zadaném stavu $\psi(x) = C_1\psi_1(x) + C_2\psi_2(x)$ určitou hodnotu.
Jak se změní pravděpodobnost naměření hodnoty E_2 , nahradíme-li konstantu C_2 výrazem $C_2 e^{i\theta_2}$ (kde θ_2 je reálné číslo, $0 < \theta_2 < 2\pi$)?
- A. Pravděpodobnost se nezmění.
 - B. Pravděpodobnost se změní.
 - C. Pravděpodobnost závisí na konkrétní hodnotě θ_2 .

Na počátku uvažujte částici ve stavu $|\psi\rangle = \sqrt{\frac{1}{5}}|+\rangle + \sqrt{\frac{4}{5}}|-\rangle$.

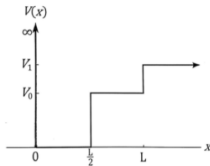
22. Jakou **maximální hodnotu** S_z (z-ové složky spinu) lze v tomto systému naměřit?

- A. $\frac{4}{5}$
- B. $-\hbar/2$
- C. $+\hbar/2$
- D. $\frac{1}{5}\hbar/2 + \frac{4}{5}(-\hbar/2)$
- E. $\sqrt{\frac{1}{5}}\hbar/2 + \sqrt{\frac{4}{5}}(-\hbar/2)$

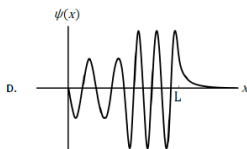
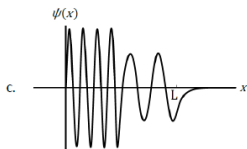
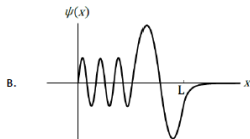
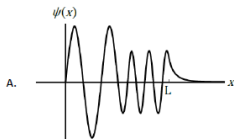
-
30. Pravděpodobnost naměření hodnoty z-ové složky spinu $-\hbar/2$ má v zadaném stavu $|\psi\rangle = C_1|+\rangle + C_2|-\rangle$ určitou hodnotu.
Jak se změní pravděpodobnost naměření hodnoty $-\hbar/2$ při měření S_z , nahradíme-li konstantu C_2 výrazem $C_2 e^{i\theta_2}$ (θ_2 je reálné číslo, $0 < \theta_2 < 2\pi$)?

- A. Pravděpodobnost se nezmění.
- B. Pravděpodobnost se změní.
- C. Pravděpodobnost závisí na konkrétní hodnotě θ_2 .

V úlohách 31–32 uvažujte průběh potenciální energie $V(x)$ nějakého jednodimenzionálního kvantově mechanického systému. Platí, že $V(x) = \infty$ pro $x \leq 0$ a $V(x) = V_1$ pro $x > L$.



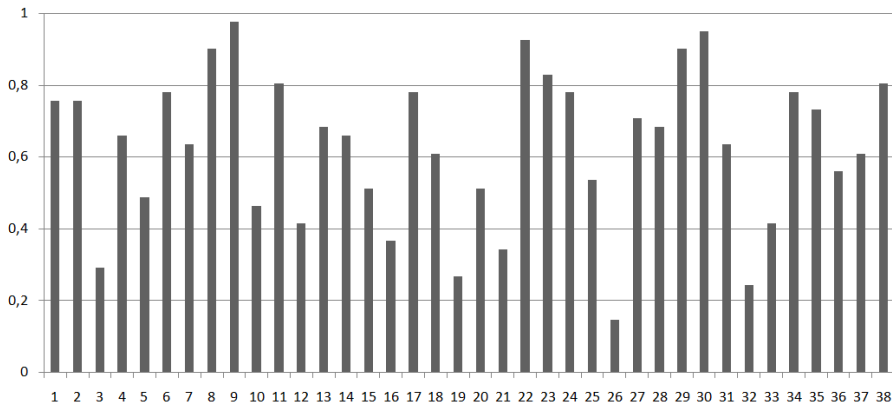
32. Předpokládejte nyní, že pro celkovou energii platí $V_0 < E < V_1$. Níže vyberte nejlépe odpovídající náčrt průběhu vlastní funkce energie, který zachycuje důležité kvalitativní prvky vlnové funkce systému.



- E. Žádný z výše uvedených náčrtů. (Níže stručně vysvětlete)

Výsledky pilotního šetření

- Percentuální úspěšnost jednotlivých úloh celkem



- Páry navazujících úloh

Pár	Správně	Nejčastější chybné odpovědi
ú4–ú5	19 BC	7 AB
ú13–ú14	27 CD	7 AB
ú20–ú21	14 BD	20 AA
ú25–ú26	6 BC	11 BD (S1); 12 AB (11 S2, 1 S1)
ú37–ú38	25 AA	6 BA

20. Je následující tvrzení pravdivé či nepravdivé pro všechny operátory $\hat{Q}$? Systém ve vlastním stavu operátoru $\hat{Q}$ zůstane v tomto stavu, dokud není ovlivněn měřením.

- A. Pravda
- B. Nepravda

21. Z možností níže vyberte **nejlepší zdůvodnění** své odpovědi na předchozí úlohu.

- A. Systém zůstane ve vlastním stavu operátoru $\hat{Q}$, dokud neproběhne měření veličiny, již přísluší operátor nekomutující s $\hat{Q}$.
- B. Střední hodnota $\hat{Q}$ nezávisí na čase.
- C. Systém se vyvine a jeho stav nemůžeme znát.
- D. Operátor $\hat{Q}$ nemusí komutovat s Hamiltoniánem nebo může explicitně záviset na čase.
- E. Operátor $\hat{Q}$ nemusí komutovat s operátorem polohy.

Výsledky pilotního šetření

- Izomorfní páry úloh

Pár	Správně	Nejčastější chybné odpovědi
ú1–ú22	30 CC	3 BC
ú2–ú23	28 CC	5 DC
ú3–ú24	9 DD	15 CD
ú4–ú25	19 BB	10 AA; 8 BA
ú5–ú26	4 CC	8 CD
ú6–ú27	26 DD	5 DC
ú7–ú28	23 BB	10 AA
ú8–ú29	34 BB	3 AB; 3 BA
ú9–ú30	38 AA	1 BA; 1 AB; 1 AC

Porovnání výsledků s originální verzí

Metrika	Originální verze	Česká verze
N	263	41
Průměr	0,59	0,63
Směrodatná odchylka	0,16	0,14
Cronbachovo α	0,76	0,77

Originální verze: Sadaghiani and Pollock (2015).

- (Polo)strukturované rozhovory s vyučujícími
- Hlavní šetření
- Hlubší psychometrická analýza
- Analýza miskoncepcí
- Formulace doporučení pro zlepšení vysokoškolské přípravy budoucích učitelů fyziky v oblasti kvantové fyziky