

Kvantna fizika: delci, valovanje, simboli

dr. Janez Strnad

Povzetek

Uvajanje osnov kvantne fizike v srednjo šolo je težavna naloga. Obstajajo različni pogledi na osnovne pojme v kvantni mehaniki in kvantni teoriji polja. Profesorjem fizike na srednjih šolah in sestavljalcem učnih programov utegne koristiti, če te poglede spoznajo.

Glavne besede: Kvantna fizika, valovna funkcija, delci, valovanje, polje, simboli

Quantum Physics: Particles, Waves, Symbols

Abstract

Introducing the basics of quantum physics into secondary school is a difficult task. There are different views on the basic concepts in quantum mechanics and quantum field theory. Physics teachers and curricula planners may benefit from knowing these viewpoints.

Keywords: quantum physics, wave function, particles, waves, field, symbols

Delci in valovanja

V revijah, namenjenih poučevanju fizike, se pogosto razvije razprava o osnovah kvantne mehanike. Eno od zadnjih razprav te vrste je sprožil članek o tem, kako bi se godilo Bohrovi köbenhavnski interpretaciji kvantne mehanike, če bi bil Bohm rojen pred Bornom [1]. Na članek se je odzval Nico G. van Kampen [2]. Po njegovem mnenju je nesprejemljivo, da je še osemdeset let po nastanku kvantne mehanike »literatura preplavljena z obsežnimi razpravami o tem, kar imenujejo 'interpretacije'. V resnici kvantna mehanika ponuja popoln in ustrezen opis opazovanih fizikalnih pojavov v svetu atomov. Kaj več bi si želeli? [...] Težava je v tem, da pisci ne zmorejo prilagoditi svojega načina razmišljanja – in govorjenja – dejstvu, da so pojavi v mikroskopskem merilu drugačni od tega, na kar smo navajeni v vsakdanjem življenju.« Art Hobson je van Kampenu pritrdil, a predlagal, da bi »manifestacije valovne funkcije« nadomestili z »manifestacijami snovnega polja« [3]. »Elektroni (kvarki, protoni, atomi itd.) so kvanti polja, nerazcepni svežnji kvantiziranega snovnega polja«, kot so »fotoni nerazcepni svežnji sevalnega polja«. S tem je razširil razpravo, ki se je dotlej vrtela v okviru nerelativistične kvantne mehanike, na relativistično kvantno teorijo polja. Richard Conn Henry je nasprotoval Hobsonovima trditvama, da so polja »osnovna sestavina vesolja« in sploh da je vesolje »sestavljeno iz česa« [4]. Po njegovem mnenju tudi ne

drži, da so edina realna stvar opazovanja. Opazovanja so zgolj »miselna«. Hobson je odgovoril, da je potem tudi njegova miza »zgolj miselna« [5].

Pozneje je Hobson objavil dolg članek *Ni delcev, so samo polja* [6]. Po njegovem mnenju razpravljanje o kvantni mehaniki med fiziki lahko fiziki škodi in spodbuja »kvantni misticizem«. Razčlenil je razvoj in pribil, »da iz eksperimenta in teorije sledi, da so osnovna prosta polja in ne vezani delci«. Robert J. Sciama je vzbudil pozornost s kratkim odzivom, naslovljenim *Ni delcev in ni polj*: »Z razširitvijo nekaterih Hobsonovih zamisli sem prišel do sklepa, da poleg tega, da ni delcev, celo ni polj!« [7]. V isti številki revije sta še dva prispevka nasprotovala Hobsonovim izvajanjem [9]. Eden od njiju je zagovarjal obstoj delcev. Hobson ni ostal brez odgovora [10].

S Hobsonom je mnenje delil tudi Steven Weinberg: »Nadalje so vsi ti delci svežnji ali kvanti različnih vrst polj. Polje kot na primer električno ali magnetno polje je vrsta napetosti v prostoru. Enačbe teorije polja kot na primer standardnega modela ne zadevajo delcev, ampak polja, delci se pojavijo kot manifestacije teh polj« [11]. In: »Kot obstaja elektromagnetno polje, katerega energija in gibalna količina se pojavita v drobnih svežnjih, imenovanih fotoni, tako obstaja elektronsko polje, katerega energijo, gibalno količino in naboj najdemo v svežnjih, imenovanih elektroni, in podobno je za vsako vrsto osnovnih delcev. Osnovne sestavine narave so polja, delci so izpeljani pojav« [12].

Drugačno stališče je pred časom zastopal Richard Feynman o svetlobi: »Rad bi poudaril, da se svetloba pojavlja v obliki – delcev. Zelo pomembno je vedeti, da se svetloba vede kot delci, posebej za tiste, ki ste hodili v šolo, kjer so vam verjetno povedali nekaj o tem, da se svetloba vede kot valovi« [13]. Feynman je sodeloval pri nastanku kvantne teorije elektromagnetnega polja, kvantne elektrodinamike, Weinberg pa pri nastanku enotne kvantne teorije elektromagnetnega in šibkega polja, elektrošibke teorije. Za svoja prispevka sta dobila Nobelovi nagradi. Trditev nista zapisala nepremišljeno. Na kaj sta mislila?

Simboli

Do podobne razprave je prišlo že pred časom. Matt Young je v odzivu na neki Henryjev članek zapisal: »Valovna funkcija in elektron nista isto. Vsi študenti fizike (in nekateri profesorji) bi morali stokrat napisati: 'Elektron ni valovna funkcija,' in nato še stokrat: 'Valovna funkcija ni elektron.' Po kopenhavski interpretaciji valovna funkcija ni fizikalna realnost. Kvadrat njene absolutne vrednosti pa je verjetnostna gostota. Toda elektron ni ne valovna funkcija ne kvadrat njene absolutne vrednosti. Je delec, ali je točkast ali ne, ne vem, toda valovna funkcija samo poda verjetnost, da naletimo na delec v bližini kake točke« [14]. Henry je odgovoril: »Vse, kar imamo, so simboli: besedni simboli in matematični simboli. Nimamo ne 'delcev' ne 'elektronov', zgolj simbole. Če bi M. Young in jaz primerjala številske simbole (preglednico izmerjenih leg), bi se popolnoma strinjala. Tudi če bi primerjala matematične simbole, bi se popolnoma strinjala. Ne strinjava se edino, ko primerjava angleške stavke. Toda ti stavki ne izvirajo iz ničesar drugega v naravi kot iz matematičnih trditev in preglednice merjenj. S stavki si prizadevamo, da bi v neprimernem jeziku (besedah) ponovili, kar smo že zelo natančno povedali v matematiki, ki se zdi popoln jezik. Morda bi se morali v celoti odpovedati trditvam v angleščini in se oprijeti le računanja s Schrödingerjevo enačbo, merjenja in ugotavljanja, da se oboje ujema. [...] V svojem prispevku izrecno svarim pred tem, da bi besede, ki spremljajo matematiko, vzeli preresno. Matematiko je mogoče zapisati na več enakovrednih načinov, ki jih spremljajo različne besede« [15].

Sledilo je svarilo: »[...] če kdo verjame, da ne obstaja objektivna realnost (ali če dvomi o njenem obstoju), potem nima motivacije, da bi jo poskusil odkriti. Za tako osebo je manj verjetno, da bo kaj znamenitega odkrila. Pomembno je, da se postopno odmikanje od starokopitnega realizma Galileja in Newtona [...] presenetljivo ujema z obžalovanjem vrednim upadanjem števila pomembnih odkritij v temeljih fizike v zadnjih desetletjih« [16].

Nazornost

Wolfgang Pauli je v pismu Nielsu Bohru zapisal, »da je zahteva po nazornosti delno upravičena, vendar v fiziki nikoli ne sme obveljati kot razlog za to, da obdržimo

nekatero skupino pojmov. Brž ko te skupine pojasnimo, postanejo novi pojmi nazorni.«

Z nazornostjo so nasploh težave. Pogosto si električno in magnetno polje ponazorimo s silnicami. Feynman je opozoril, da »zamisel silnic ne vsebuje najglobljega načela elektrodinamike, načela superpozicije. Čeprav poznamo silnice za kako razporeditev nabojev in silnice za drugo razporeditev, ne vemo in nimamo nobene zamisli o tem, kakšne bodo silnice, če sestavimo obe razporeditvi. Na drugi strani je matematično superpozicija preprosta – seštejemo oba vektorja [...] Najbolje je uporabiti abstraktno zamisel polja. Da je abstraktna, je nesrečno, a potrebno« [18]. Razkril je tudi, kako si predstavlja polje v valovanju: »Vidim nekakšne nejasne senčne, spremenljive črte – tu in tam je na njih neka-ko napisano E ali B in morda imajo nekatere črte narisane puščice – puščica tu, puščica tam, ki izginejo, ko pogledam podrobneje. Če govorim o poljih, ki potujejo po prostoru, imam strahotno zmešnjavo med simboli, ki jih uporabljam za opis predmetov, in predmeti samimi. Ne morem si narediti slike, ki bi bila približno podobna pravim valovom« [18].

Ali si je mogoče predstavljati Schrödingerjevo polje, ki mu Hobson pravi snovno polje? Za en delec je to valovna funkcija $\Psi(\vec{r}, t)$. Kompleksno funkcijo si lahko mislimo sestavljeno iz dveh realnih funkcij, ki sta peri-odični v kraju in času. Globalna faza pa je nedoločena, tako da ne moremo ugotoviti, v kateri točki v katerem trenutku valovna funkcija doseže vrh ali dolino. Valovna funkcija opiše kvantnomehanski fizikalni sistem in je ne moremo naravnost primerjati z izidi merjenj in si je ne moremo nazorno predstavljati. Nazorno si lahko predstavljamo le verjetnostno gostoto $|\Psi(\vec{r}, t)|^2$, ki jo lahko primerjamo z izidi merjenj. Veliko bolj zapletena je valovna funkcija sistema N delcev, ki je določena v prostoru s $3N$ dimenzijami. Spočetka je Erwin Schrödinger mislil, ko je vpeljal »skalar polja«, da je $-\epsilon_0 |\Psi(\vec{r}, t)|^2$ gostota električnega naboja. Njegova enačba je valovna enačba, torej enačba za polje. Delčno naravo ji je priredil Max Born, ki je v $|\Psi(\vec{r}, t)|^2$ prepoznal verjetnostno gostoto za delec.

Kot vidimo, je razvoj tekkel od nazornega k abstraktnemu. Poleg tega se svarilo [16] ne zdi umestno. Vsa velika odkritja niso bila povezana z nazorno predstavo. Do nekaterih je prišlo na podlagi teorije. V razvoju fizike se je bilo treba v številnih primerih odpovedati nazornim predstavam, ki so pripeljale do odkritij. Zgled je odkritje elektronskega spina. Nazadnje se je bilo treba sprijazniti z abstrakcijo.

Kaže, da je na to mislil Sciamanda: »Morda ni uporabnega pojmovnega modela, ki bi opisal dokončno dejavnost s človeškimi izrazi – in morda tudi ni potrebe po njem« [7]. Sciamanda je tudi zapisal, da so »polja kvantne teorije polj operatorji. Stanje sistema je abstraktni vektor v Hilbertovem ali Fockovem prostoru, ki ga ne opiše polje, ampak vektor 'bra' in 'ket', preprosta etiketa. Operatorji

polja opisujejo interakcije. V tem pogledu kvantna teorija polja sestavi nadvse uporaben računski model, a ne naredi malo ali nič, da bi izbrala model za ontološko realnost (delec, polje, valovanje ali karkoli) zadeve, ki jo opisuje« [7].

Spin elektrona

Fiziki, ki so raziskovali spektre, so v spektrih alkalijskih par opazili dvojice bližnjih črt. Menili so, da gre to pripisati »trupu«, elektronskemu oblaku, okoli katerega se giblje najšibkeje vezani zunanji elektron. »Trup« alkalijskih atomov je tak kot elektronski oblak atomov žlahtnih plinov. Pauli pa je to pripisal zunanjemu elektronu in govoril o »dvojnosti, značilni za kvantno mehaniko«. George Uhlenbeck in Samuel Goudsmit sta si elektron predstavljala kot vrtavko in pojasnila Paulijevo »dvojnost« [17]. Os vrtavke lahko kaže v smer magnetnega polja ali v nasprotno smer. Potem so se jima pojavili dvomi, denimo, ker bi, kot je ugotovil Hendrik Antoon Lorentz, hitrost elektrona na površju presegla hitrost svetlobe. Niels Bohr ju je pomiril, češ da klasične omejitve v svetu atomov pogosto ne veljajo. Na koncu so vsi pomisleki odpadli. Na osnovi nazorne predstave je Uhlenbecku in Goudsmitu uspel pomemben korak: vpeljala sta spin elektrona. Toda nazorna predstava se ni obdržala. Danes vemo, da spin »nima klasične analogije«.

Hobson je mislil drugače. Zanj je valovna funkcija del »realnosti«: »Da bi razpravljali o tej zadevi, zadostuje, da pogledamo samo nerelativistično limito Diracove enačbe, namreč Schrödingerjevo enačbo. Tukaj se predmet razprave spusti do realnosti Schrödingerjevega polja, to je valovne funkcije.« Izrazi z imaginarnim eksponentom (1) so značilni za valovanje. Hobson pa valovanje priredi tudi stanju, ki ga opiše s ketom $|n\rangle$. V njegovi nerelativistični limiti vidi valovno funkcijo, torej polje.

Hobson (in Weinberg) se ni omejil na elektrone in druge delce z maso, vendar je tem posvetil glavno pozornost. Zato se zdi poudarjanje valovnih lastnosti razumljivo. Interferenčni poskus z elektroni je, na primer, mogoče pojasniti s poljem, medtem ko pri pojasnjevanju z delci naletimo na nepremostljive težave. Feynman je pri svetlobi izhajal z drugačnega izhodišča. Osnove kvantne elektrodinamike je želel pojasniti nestrokovnjakom. Pri merjenju s fotopomnoževalko interferenčne slike ni mogoče pojasniti drugače kot s fotoni. Ko fotopomnoževalka zazna foton, se energija, ki je bila porazdeljena po vsem prostoru V , zbere pri merilniku.

Sklep

Težave, ki smo jih opisali, se ne pojavijo pri raziskovalnem delu. Pojavijo se, ko raziskovalci kako fizikalno spoznanje poskušajo pojasniti nestrokovnjakom ali študentom v nižjih letnikih, ki še nimajo dovolj znanja.

Opazimo tudi, kako fiziki vztrajno zagovarjajo svoja osnovna stališča in svoje predstave, ki jih ni mogoče ovreči s poskusi.

Kvantna teorija polja ni v programu rednega študija fizike, z njo se zares spoznajo le raziskovalci, ki se odločijo za razmeroma ozko delovno področje v teoretični fiziki. V resnici ni treba seči do kvantne teorije polja. Hobson je priporočil: »Učbeniki naj se zavedajo, da so polja, ne delci naš najbolj temeljni opis narave. To zlahka dosežemo, ne da bi pri osnovnih predavanjih poskušali poučevati formalizem kvantne teorije polja, ampak z govorjenjem o poljih, s pojasnjevanjem, da ni delcev, ampak samo delcem podobni pojavi, ki jih povzroči kvantizacija polja« [6].

Nazadnje še omenimo, da poleg opisane razprave iz zadnjega časa vse od začetka kvantne mehanike teče razprava o njenih interpretacijah [19]. Oboje je vsaj rahlo povezano. Tudi o potrebnosti interpretacij so mnenja deljena. Na eni strani nekateri fiziki zagotavljajo, da kvantna mehanika ne potrebuje interpretacij [20], medtem ko drugi trdijo, da so interpretacije neizogibne [21]. Z nekaj pretiravanja je mogoče reči, da je skoraj toliko različnih pogledov, kot je fizikov. To napelje na misel, da gre pri tem za osebne poglede, pri katerih pojmi niso natančno določeni in izjav ni mogoče neposredno preizkusiti z opazovanji in merjenji pri poskusih. Navsezadnje pa vse razprave o valovanju in delcih ter o interpretacijah pripeljejo do enakih rezultatov, ki jih je mogoče preizkusiti z opazovanji in merjenji pri poskusih. Tako kvantna mehanika ostaja ena od najuspešnejših fizikalnih teorij, če že ni najuspešnejša.

Učitelj fizike se pri uvajanju kvantne fizike odloči glede na zmogljivost svojih študentov. Brez slabe vesti lahko ubere pot, ki sledi razvoju fizike. Začne z »realizmom Galileja in Newtona«. Ob nabiranju novega znanja po običajni poti preko dvojnosti delec-valovanje in načela komplementarnosti uvidi njegove omejitve. Prehod v abstraktnost lahko samo nakaže, saj, denimo, v srednji šoli ni mogoče vpeljati Schrödingerjeve enačbe. Ob vsaki priliki pa naj opozarja, da vsak korak v razvoju teorij v fiziki pripelje do globljega spoznanja, ki ni odvisno od želja ali okusa kogarkoli in ki omogoči, da bolje razumemo naravo. Vseskozi naj poudarja, da v svetu atomov ni mogoče uporabiti izkušenj iz velikega sveta in da v svetu atomov veljajo zakoni, ki se razlikujejo od zakonov makroskopskega sveta. O omenjenih različnih pogledih najbrž pri poučevanju ne more razpravljati. Omogočijo pa mu, da si ustvari svojo sliko in izbere svoje stališče. Pri tem lahko izhaja od delcev, valovanj ali simbolov, če le podrobno opredeli, kaj ima v mislih.

...

Da bi bralci bolje razumeli vsaj del začetne razprave, nakažimo, kako kvantna elektrodinamika obravnava poskus z dvema režama [22]. V njej jakosti električnega polja v smeri osi y v linearno polariziranem enobarvnem

valovanju s krožno frekvenco ω in komponento valovne-
ga vektorja k v smeri osi x priredimo operator:

$$\hat{E} = i\sqrt{\hbar\omega/2\varepsilon_0 V} (e^{i(kx-\omega t)} \hat{a} - e^{-i(kx-\omega t)} \hat{a}^\dagger) \quad (1)$$

V je prostornina votline, v katero je sevanje zaprto.
 $\hat{a}$ je anihilacijski operator, ki uniči kvant, in $\hat{a}^\dagger$ krea-
cijski operator, ki kvant ustvari. Za operatorja velja
 $\hat{a}^\dagger |n\rangle = \sqrt{n+1} |n+1\rangle$ in $\hat{a} |n\rangle = \sqrt{n} |n-1\rangle$ ter komutacijs-
ka zveza $\hat{a}\hat{a}^\dagger - \hat{a}^\dagger\hat{a} = 1$.

Izhajali smo iz razvoja vektorskega potenciala A po last-
nih nihanjih harmoničnega oscilatorja, vektorski po-
tencial A in A^* pa nadomestili z operatorjema $\hat{a}$ in $\hat{a}^\dagger$.
Operator (1) razdelimo na del s pozitivno frekvenco in
del z negativno frekvenco. Obravnavamo poskus z dve-
ma režama in vzamemo, da je pot od izvira do zaslona
z režama x_0 za oba delna curka enaka, pot od zaslona z
režama do zaslona z interferenčno sliko pa meri v prvem
delnem curku x_1 in v drugem x_2 :

$$\hat{E}^+ = (i/2)\sqrt{\hbar\omega/2\varepsilon_0 V} (e^{ikx_2} + e^{ikx_1})e^{i(kx-\omega t)} \hat{a} \quad (2a)$$

$$\hat{E}^- = (i/2)\sqrt{\hbar\omega/2\varepsilon_0 V} (e^{-ikx_2} + e^{-ikx_1})e^{-i(kx-\omega t)} \hat{a}^\dagger \quad (2b)$$

Merilnik izmeri povprečno vrednost:

$$\begin{aligned} \langle n | \hat{E}^+ \hat{E}^+ | n \rangle &= (1/4)(\hbar\omega/2\varepsilon_0 V)(e^{ik(x_2-x_1)} + 2 + e^{-ik(x_2-x_1)}) \langle n | \hat{a}^\dagger \hat{a} | n \rangle = \\ &= (1/4)(\hbar\omega/2\varepsilon_0 V)(e^{(i/2)k(x_2-x_1)} + e^{-(i/2)k(x_2-x_1)})^2 n = \\ &= (n\hbar\omega/2\varepsilon_0 V) \cos^2(\frac{1}{2}k(x_2-x_1)) = (n\hbar\omega/2\varepsilon_0 V) \cos^2(\pi l \sin \vartheta / \lambda). \end{aligned} \quad (3)$$

Upoštevali smo, da velja $\hat{a}^\dagger \hat{a} |n\rangle = \sqrt{n} \hat{a}^\dagger |n-1\rangle = n |n\rangle$
in $\langle n | n | n \rangle = n$. Nazadnje smo razliko poti izrazili kot
 $x_2 - x_1 = l \sin \vartheta$ z razmikom med režama l in kotom ϑ
proti pravokotnici na zaslon z režama ter postavili
 $k = 2\pi / \lambda$.

$|n\rangle$ in $|n\rangle^* = \langle n|$ sta stanji z n fotoni. Če hočemo dobiti
stanje, ki opiše enobarvno sinusno valovanje, moramo
sestaviti stanja, ki ustrezajo različnim številom fotonov
z enako frekvenco. Tako dobimo koherentno stanje
 $|\alpha\rangle = \sum_n c_n |n\rangle$, za katerega velja $c_n^* c_n = (\alpha^* \alpha)^n e^{-\alpha^* \alpha} / n!$.
Običajno valovno potezo dobimo, ko sestavimo več ta-
kih stanj z različno krožno frekvenco na ozkem pasu.
Vendar ne prvo ne drugo bistveno ne vpliva na končno
interferenčno sliko. Kot vidimo, je zadeva dokaj zaplete-
na, vsekakor preveč zapletena za srednjo šolo in začetne
letnike na univerzi.

Opis poskusa z elektroni je drugačen. Pri elektronih je
treba vpeljati anihilacijski operator $\hat{b}$ in kreacijski ope-
rator $\hat{b}^\dagger$, za katera velja drugačna komutacijska zveza
 $\hat{b}\hat{b}^\dagger + \hat{b}^\dagger\hat{b} = 1$. Ta upošteva Paulijevo prepoved, po kateri
vsako stanje zasede največ en elektron. Tega razločka se
je treba zavedati, ko interferenčni poskus s fotoni pri-
merjamo z interferenčnim poskusom z elektroni. Zares
pa nazadnje v obeh primerih dobimo podobno interfe-
renčno sliko.

Literatura

- [1] Nikolić, H. (2008). *Would Bohr be born if Bohm were born before Born?*. Am. J. Phys. 76, 143–146.
- [2] Van Kampen, N. G. (2008). *The scandal of quantum mechanics*. Am. J. Phys. 76, 989–990.
- [3] Hobson, A. (2009). *Response to »The scandal of quantum mechanics« by N. G. van Kampen*. Am. J. Phys. 77, 293.
- [4] Henry, R. C. (2009). *The real scandal of quantum mechanics*, Am. J. Phys. 77, 869–870.
- [5] Hobson, A. (2009). *Response to »The real scandal of quantum mechanics« by Richard Conn Henry*. Am. J. Phys. 77, 870–871.
- [6] Hobson, A. (2013). *There are no particles, there are only fields*. Am. J. Phys. 81, 211–223.
- [7] Sciamanda, R. J. (2013). *There are no particles, and there are no fields*. Am. J. Phys. 81, 643.
- [8] Hobson, A. (2013). *Hobson responds*, Am. J. Phys. 81, 645.
- [9] Sassoli de Bianchi, M. (2013). *Quantum fields are not fields: comment on »There are no particles, there are only fields,« by Art Hobson*, Am. J. Phys. 81, 707–708; M. Nauenberg, *Comment on »There are no particles, there are only fields,« by Art Hobson*, Am. J. Phys. 81 (2013) 708–709.
- [10] Hobson, A. (2013). *Response to M. S. de Bianchi and M. Nauenberg*, Am. J. Phys. 81, 709–711.
- [11] Weinberg, S. (1992). *Dreams of a Final Theory: The Search for the Fundamental Laws of Nature*. New York: Random House, str. 25.
- [12] Weinberg, S. (2001). *Facing Up: Science and its Cultural Adversaries*. Cambridge: Harvard University Press.
- [13] R. P. Feynman, R. P. (1985). *QED, The Strange Theory of Light and Matter*, Princeton University Press, Princeton, N. J., str. 15.
- [14] Young, M. (1983). *An electron is not a wavefunction*, Phys. Teacher 21, 74.
- [15] Henry, R. C. (1983). *The author responds*, Phys. Teacher 21, 74.
- [16] Psimopoulos, M. in Theocharis, T. (1986). *»...to see it as it is... to know it as it isn't...«*, Am. J. Phys. 54, 969.
- [17] Goudsmit, S. A. (1976). *It might as well be spin*, Phys. Today 29, 40 (6); G. E. Uhlenbeck, *Personal reminiscences*, Phys. Today 29 (1976) 43 (6).
- [18] Feynman, R. Leighton, R. B. in Sands, M. (1964). *The Feynman Lectures in Physics, Vol. II*, Addison-Wesley, Reading, Mass. 1–5, 20–9.
- [19] Strnad, J. (2010/11). O interpretacijah kvantne mehanike (1), Proteus 73, str. 414–421; O interpretacijah kvantne mehanike (2), Kaj nekateri fiziki menijo o interpretacijah kvantne mehanike, Proteus 74 (2011/12) 27–32; Subjektivna interpretacija kvantne mehanike, Proteus 76 (2013/14) 221–223; L. Lyons, Bayes and frequentism: a particle physicist's perspective, Contemporary Physics 54 (2012) 1–16.
- [20] Fuchs, C. A., Peres, A. (2000). Quantum theory needs no 'interpretation', Phys Today 53, str. 70–71 (3); D. Styer, S. Sobottka, W. Holladay, T. A. Brun, R. B. Griffiths, P. Harris, C. A. Fuchs, A. Peres, Quantum theory – interpretation, formulation, inspiration, Phys. Today 53 (2000) 11–14, 90 (9).
- [21] Beneduci, R. in Schroek, jr., F. E. (2014). On the unavoidability of the interpretations of quantum mechanics, Am. J. Phys. 82, str. 80–81.
- [22] Strnad, J. (1986). Na pot v kvantno elektrodinamiko, DMFA, Ljubljana, str. 118, str. 82.