



**QUO WADIS НАНОТЕХНИКА ИЛИ ОЩЕ ЕДНА СТЪПКА В ПРЕХОДА ОТ  
КЛАСИЧЕСКАТА МЕХАНИКА НА НЮТОН КЪМ КВАНТОВА МЕХАНИКА  
QUO WADIS NANOTECHNIC OR ANOTHER STEP IN TRANSITION FROM THE  
CLASSICAL NEWTON'S MECHANICS TO QUANTUM MECHANICS**

**Петър Феодоров, Стефан Кирилов Къртунов\***  
ТУ-Габрово, катедра „Машиностроене и уредостроене“

Статията е постъпила на 29 април 2013 г.; приета за отпечатване на 17 май 2013 г.

**Резюме:** В публикацията се изказва позиция относно развитието на нанотехниката и нейното влияние в прехода от класическа към квантова механика. Разгледани са историческият аспект на проблема, основните понятия, приликите и разликите между двете механики и промените в хода на този преход. Накрая се дава скромно мнение за по-нататъшното развитие на процеса или отговор на QUO WADIS нанотехника. Ключови думи: квантова механика, постулати, основни моменти в развитието.

**Summary:** The publication expresses position on the development of nanotech and its influence in the transition from classical to quantum mechanics. Discusses the historical aspect of the problem, the basic concepts, the similarities and differences between the mechanics and the changes during this transition. Finally humble opinion gives a further development of the process or QUO WADIS nanotech. Keywords: quantum mechanics, postulates, key moments in development.

## 1. УВОД

Нанотехниката и в частност нано-технологиите, като едно от приоритетните, често назовавано стратегическо направление, определят научното, техническото и социално-икономическото развитие на човешката цивилизация понастоящем. Тази интер-дисциплинарна област на познанието обединява технологии, които са насочени към създаване и ефективно използване на наноекти, материали и системи с контролирани на молекулярно, атомно и податомно ниво свойства, но не се отнася до въздействието върху атомни процеси. Определения за тях в специализираната литература са дадени достатъчно много [1, 2, 3, 4, 5, 6], а може да се намерят и в автоматизирани библиотеки, електронни бюлетини, сайтове за информационно on-line-споделяне в Интернет и т. н. Всички те обаче се базират на предшествениците си като специализираната теория за корпускулярната природа на материята, физиката на малко-размерни структури и молекулярната биология, както – и на общо-образователните науки или части от тях като колоидна химия, квантова физика и разбира се класическата механика на Нютон. Обособяването на нанотехниката като самостоятелна област в науката води и доведе до ново преосмисляне на основни постановки, възприятия и похвати в отделни области или цялостно в ”традиционните значимите” науки. Именно този преход е обект на разсъжденията в тази публикация.

## 2. ИЗЛОЖЕНИЕ

Квантовата физика и в частност квантовата механика (тук не се обсъжда дали квантовата физика е част от квантовата механика или обратно) се основава на схващането, че определени явления на микроскопично ниво не могат да се осъществяват непрекъснато – наблюдаемите явления се явяват такива – а само с дискретни нараствания, известни като „кванти”. През IV

в. пр. Хр. гръцкият философ Епикур описва един тип движение на атомно ниво, различно от познатото кинетично движение. Той го нарича „атомно отклонение” – спорадично, мигновено прескачане на частицата от нейния път след някакъв минимален фиксиран интервал, от гръцки „елахистон”. Епикур противопоставя своето „отклонение” на движението, което възниква директно в резултат на гравитацията или ударите: това, което днес се нарича движение на билиардна топка, падане на ябълка или Нютонова механика. Отклонението е единственият пример за квантова физика в епикурейската система. Но около 600 години по-късно индийските философи, последователи на Джайна, свеждат всички материални явления до квантови явления. Това е неизбежен резултат от тяхната атомна теория на времето, която представя времето като редица от кванти. В последствие, историята на квантовата механика се формира от няколко важни открития като законите за излъчване на абсолютно черно тяло, фотоелектрическият ефект и хипотезата за поглъщане и отделяне на енергията на малки порции или кванти. През деветдесетте години на XIX век германският физик Макс Планк (1858 -1947г.) забелязва, че интензивността на излъчването не продължава да расте при по-малките дължини на вълната на лъчението, както твърди традиционната теория. През 1900г. той предлага обяснението, че енергията на излъчването се емитира на фиксирани кванти, като стойността на кванта зависи от честотата на осцилациите. Първият, който развива по-нататък анализа на структурата на атома, е датският учен Нилс Бор през 1913 г. Той предполага, че движението на електроните може да става само мигновено с прескачане от едно ниво на друго, а не непрекъснато в резултат на въздействие. Така нещата започват да се стиковат и терминът квантова механика е използван за първи път от М. Борн през 1924 г. в не-

\* Тел.: 066827365, E-mail: skartunov@abv.bg

говия труд „Zur Quantenmechanik“ (от гер. Към квантова механика). Преходът от класическата механика към квантовата механика, що се отнася до нанотехниката, започва със създаването на неголямо общество от специалисти по механика на непрекъснатата среда през 1973 г. в Киото, Япония, с цел изследване на микромеханиката на твърдото тяло [7]. В последвалото десетилетие в страни като САЩ, Русия, Германия, Корея, България и други се развиват регионални и интер-национални дружества на инженери-механици, издаващи литература, периодични списания и провеждащи научни семинари, конференции и конгреси за утвърждаване и решаване на нови постановки, понятия и проблеми в механиката, което се налага от бурното развитие на промишлеността, структурните изменения в машиностроенето от началото на 80-те години на ХХ век и свързаните с това използване на нова елементна база, различни мениджърски методи в производството и търговски прийоми. В следствие формулировките за преход от процеси на макрониво към процеси на микро/нанониво и обратно, създаването на концепции в молекулярно-атомните технологии и синтезираните нанообекти и процеси, преобладаващи в Нобеловите награди през 90-те години, се налага обособяването на самостоятелни области в науката като нано-технология, мехатроника, наноелектроника, фотоника и бионика, отговор на които трябва да даде променящата се към квантова механика. Първото десетилетие на ХХI век започна с практически резултати и комерсиализация по стратегически програми, проекти и разработки, за което пионери са САЩ (NNI-програма). Изследвания за състоянието на отделни области, в случая например за нанотехниката към този период, са публикувани в [8, 9].

При нанотехнологиите се различават нанообекти (наноелементи) и нано-материали, както по нанотехнология, така и по функционални параметри, но често това разделяне и смисъл на понятията имат двойствен характер [1]. Към параметрите спадат квантов размер, дължина на кохерентност, вътрешна организация, силни латерални взаимодействия и голямо отношение на площ към обем (виж фиг. 3). Размерите на елементите в микропроцесорната техника се приближават към квантовите предели, т.е. до границите на най-малките единици материя и енергия – един електрон, спин, квант на магнитния или светлинен поток и т.н. Квантовият размер на малки системи се задава с дължината на вълната на Л. де Бройл (около 1nm) или разстоянието, по протежение на което се запазва кохерентността на вълновата функция. За критичен най-малък размер се счита размерът, при който кристалната решетка запазва свойствата си, например за желязо 0,5nm и 0,6 nm за никел. Другата важна характеристика на вълната е дължината на кохерентност или разстоянието, в което вълната се запазва по фаза (обикновено по-малко от 10nm) [1]. Фотонните кристали са именно материалите, оптичните свойства на които се променят по определена закономерност: амплитудата на колебанията е няколко стотин nm. Те предават светлина само с една дължина на вълната и предлагат големи възможности за реализиране на определен вид вълнова функция, определяща взаимодействието им.

За анализа на прехода от класическа към квантова механика, с цел яснота, трябва да се дадат следните пояснения за някои известни понятия. Квант е най-малка-

та неделима частица, а светлинен квант е елементарната единица светлина, която се нарича и „фотон“. Измервателната единица е ангстрьом  $\text{Å} = 1/10,000,000,000$  метъра. Квантовите точки (от англ. quantum dots - QD) са структури, размерите на които в трите направления съставляват няколко междуметрични разстояния и в зависимост от мащаба на разглежданата структура могат да се считат нулмерни или триизмерни. Съвременните методи за изготвяне на квантови точки основно са литографически, поради което те се получават по двете координати достатъчно големи от порядъка на 100-300 nm. По третата координата чрез разпръскване се нанася тънък слой с избираема дебелина от порядъка на 0,2 – 0,5 nm. Това означава плътност около 105 точки/ $\mu\text{m}^3$ . Като цяло се смята, че съвременните операции за микроструктуриране, към които спадат епитаксия, окисление, дифузия, вакуумно изпарение, йонна имплантация и термичните обработки ще изчерпят технологичните си възможности с достигане на размери на елементите от порядъка на 100 – 150 nm [1] и изходът отново е квантова електроника с нейните активни елементи на молекулярно ниво, квантови схеми, транзистори, памети и други. Количеството информация, необходимо за задаването на състоянието на квантова система на две нива или на самата система е единицата за измерване на квантова информация и се нарича квантбит или кубит (от англ. quantum bit, или qubit). Единицата за информация, квантовият бит, благодарение на нееднозначната природа на материята, може да бъде въввлечена в няколко процеса едновременно. При увеличаване броя на кубитите изчислителната способност на компютъра нараства експоненциално. Като кубити могат да се използват множество видове елементарни частици - йони, молекули или фотони.

И така: Какво е Квантова механика? Квантовата механика, наричана още вълнова механика, описва движението на микро-частиците, взаимодействията между тях и взаимодействията им с външни полета. Иначе казано – обеснява корпускулярните и вълновите свойства на частиците. Тя замества класическата механика на Нютон, защото последната не обяснява адекватно наблюдаваните явления на атомно и субатомно ниво и елементарните частици - електрони, протони, неутрони и взаимодействието им с електромагнитното излъчване. Квантовите ефекти като правило се наблюдават само при микроскопични мащаби, докато класическата механика е валидна при макроскопични мащаби. Основната разлика от класическата механика, която описва една система от тела с определено количество постоянни и променливи величини е, че тази система не може да се приложи към квантови системи поради принципа на Хайзенберг. Ако се опитаме умишлено да премахнем неопределеността в координатите на електрона, ние неизбежно ще увеличим неопределеността в импулса му. Оказва се, че производението на тези две неопределености никога няма да бъде по-малко от една конкретна величина, константата на Планк. Това съотношение се нарича принцип на неопределеността. Аналогичните съотношения на неопределеността създават и някои други характеристики на микрочастиците, които се наричат допълнителни характеристики. Другата разлика е т.н. „Квантуване“. Много важно свойство на микрочастиците се явява фактът, че частицата не винаги може да се намира в произволно състояние. В частност, ако тя задържа някакви сили в ло-

кализирано състояние, то състоянията на частиците се оказват квантувани - тоест частицата може да притежава само определен дискретен набор от енергия в полето на свързващите сили. Това напълно се отличава от класическата механика - в нея частицата може да притежава неопределено количество енергия. От практическа гледна точка най-важното следствие от това се явява линейният (непрекъснатият) спектър на излъчване и поглъщане на атоми.

Квантовата механика предсказва:

- възможните стойности на измерваната физична величина,
- вероятностите с които се получават тези стойности, като използва набор от принципи, явяващи се като постулати [10]. Тези принципи са:

- Нулев - Във всеки един момент от времето състоянието на една квантово-механична система се описва от абстрактен комплексен вектор в Хилбертовото пространство, наречен вектор на състоянието или вълнова функция  $|\Psi(q;t)\rangle$ , където  $q$  е обобщената координата на системата, т.е. съвкупността от всички координати на частиците, съставляващи системата. Вълновата функция съдържа цялата информация за системата; познаването на вълновата функция позволява намирането на всички величини, описващи системата, съгласно следващите по-долу постулати. Приема се, че вълновата функция на системата е нормирана:

$$\langle\Psi(q;t)|\Psi(q;t)\rangle = \int \Psi(q;t) \Psi^*(q;t) dq = 1 \quad (1)$$

- Първи - на квантовата механика (оператори): На всяка физична величина  $A$  се съпоставя линеен оператор  $\hat{A}$ . Функционалните зависимости в класическата физика остават непроменени, като физичните величини се заместват със съответните оператори.

- Втори (допустими стойности) - При измерването на една физична величина  $A$  могат да се получат само числени стойности  $\hat{a}_n$ , които са собствени стойности на оператора  $\hat{A}$  на тази величина.

- Трети (на вероятностите) - В състояние  $|\Psi\rangle$  на квантовата система вероятността при измерването на една физична величина  $A$  да се получи собствената стойност на оператора  $\hat{A}$ , съответстваща на собственото състояние  $|\hat{a}\rangle$ , е

$$p(\hat{a}) = |\langle \hat{a} | \Psi \rangle|^2 \quad (2)$$

- Четвърти (постулат за измерването) - Ако при измерването на една физична величина  $A$  се получи собствената стойност на оператора  $\hat{A}$ , съответстваща на собственото състояние  $|\hat{a}\rangle$ , то след измерването квантовата система се намира в състояние  $|\hat{a}\rangle$ .

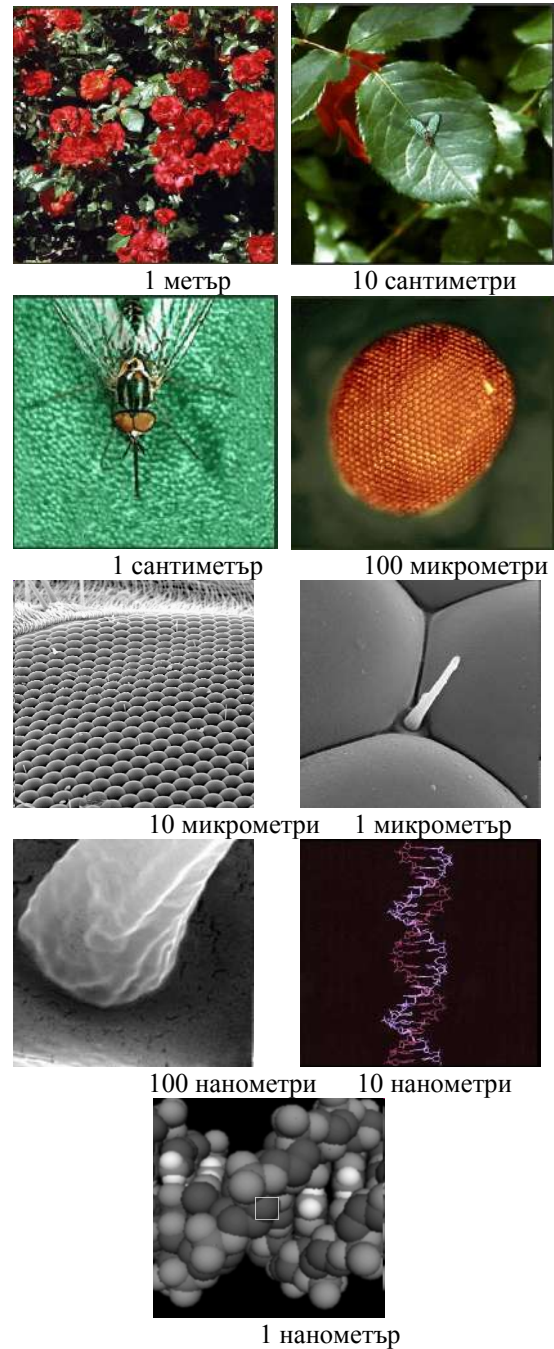
- Пети (еволюция) - Еволюцията на вълновата функция  $|\Psi\rangle$  в една квантова система с хамилтониан  $H$  във времето се определя от уравнението на Шрьодингер:

$$i\hbar \partial/\partial t |\Psi\rangle = H |\Psi\rangle; \quad (3)$$

където  $\hbar = h/2\pi = 1.054 \times 10^{-34}$  J.s е редуцираната константа на Планк.

Какви са промените в прехода от класическа към квантова механика имайки предвид тези принципи? Основните нови моменти, лаконично казано, са: малки неща (по размери и мащаб), малки времена, малки стойности, малки вероятности. Първият момент е промененото разбиране за големина, наложено от достигането на минитюаризация на квантов предел. За колко

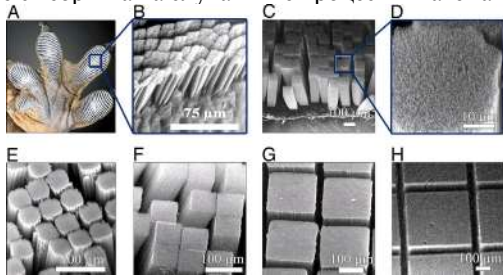
големи (малки) неща става на въпрос всъщност? Специфичните свойства на веществата в нанометричен мащаб и свързаните с това физични явления се определят от това, че характерните размери на елементите в структурите на нанобекти са в диапазона  $1 \cdot 10^{-8}$  -  $1 \cdot 10^{-9}$  nm, съответстващи на средните елементи на атомите и молекулите в обичайните материали. „Наноскалата е по-интересна от атомната, защото при нея за първи път можем да създадем нещо – когато започнем да комбинираме атоми - за да създадем нещо полезно”, казва Хорст Щрьомер – нобелов лауреат по физика. Със следната фигура 1 с онагледени примери от природата се пояснява отговорът на този въпрос.



Фиг. 1. Големина на различни обекти в природата

Възможности в зависимост от размера коментира М. Ратнер в „Нанотехнологиите: Едно леко въведение в Следващата Голяма Идея“. В Наномасщаб най-фундаменталните възможности на материалите и машините,

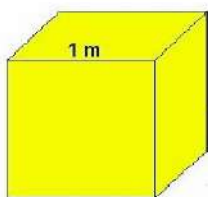
зависят от техният размер по начин недостъпен за никой друг мащаб.” При работа с такива малки размери се проявяват квантови ефекти и ефекти на междумолекуларни взаимодействия, като Ван-дер-Ваалсови сили и взаимодействия (ориентирано, индукционно, дисперсионно), демонстрирани на фиг.2. Поради самата разлика на този мащаб от нормалните ежедневни размери повечето от наноматериалите (полупроводници, метали и др.) притежават характерни физико-химични свойства, които са различни от тези на същите материали при традиционната им употреба. Физичните явления в контекста на мащаба се изразяват с измервателни единици в гравитацията, триенето, горенето със сантиметър, в електростатиката – с милиметър, а с микрометър – сили на Ван дер Ваалс и Брауново движение (топлинно движение на микрочастици от твърдо вещество, намиращи се в течна или газообразна среда. Описва се с теорията на случайните процеси в математиката).



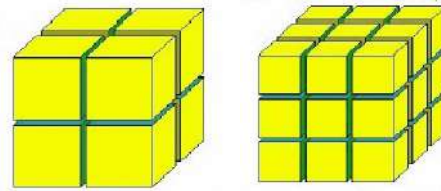
Фиг. 2. Физичните явления в контекста на мащаба

Нещата се случват различно в Нановселената, което означава, че влизат в сила законите на квантовата механика. Първоначалната идея за съществуването на Наносветът е на нобеловият лауреат от 1959 г. Р. Фейман, изложена в неговата лекция "Има достатъчно място на дъното". Основната теза в нея е, че колкото по-навътре в нещата се вглеждаме, толкова повече свободно място се открива. Как е възможно това? Отново пояснението дава следният пример (фиг. 3). Колкото повече режем кубчето, толкова повече ще се увеличава общата площ, но общата маса ще остава постоянна. В този смисъл нанотехнологията открива безкрайно много място. Представяте ли са това на молекулярно ниво?!

Вторият момент за малките времена означава бързодействие на елементите от порядъка на THz ( $\approx 10^{12}$  операции/sec). Известно от квантовата механика е, че скоростта на светлината във вакуум е пределната, най-голямата скорост за предаване на сигнали и комуникация в нашия свят. С други думи, нито едно явление не може да протече по причина на друго явление по-рано от промеждутъка от време, необходим на светлината за преодоляване на разстоянието между определени точки във вакуума, в който тези явления се осъществяват. Както бе казано по-горе, следващата област от нанотехниката е квантовата електроника. Квантовите изчислителни устройства, по идея на Р. Фейман от 80-те години на миналия век, разширяват възможностите за изчисления и увеличават бързодействието  $N^2$ -пъти чрез използване на квантовите точки като битове.



Обем =  $1 \text{ m}^3$     Площ =  $6 \text{ m}^2$



Обем =  $1 \text{ m}^3$   
Площ =  $12 \text{ m}^2$

Обем =  $1 \text{ m}^3$   
Площ =  $18 \text{ m}^2$

Фиг. 3. Поясняване на идеята "Има достатъчно място на дъното"

Що се отнася до третият момент, нанотехниката използва квантово-механични характеристики на електроните като спин. Спинът (от англ. spin – въртене, кръжение), може да бъде представен като резултат от въртенето на частиците по траектория около своята ос. Класическите механика и физика не могат да обяснят появата на спин в тримерното пространство. На база достиженията в молекулярната нанотехника и спинтроника, основни елементи на която стават магнитните молекули, които представляват интерес за квантови изчисления, благодарение на големите си времена за декохерентност.

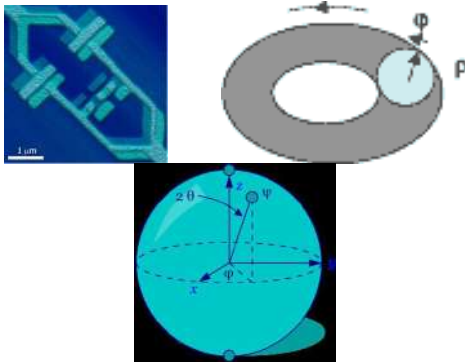
В началото на XXI век се зароди „нова“ съвременна физика с авангардни идеи, появи се течение за оборване на постулатите на квантовата механика и теорията на относителността и отхвърляне на здравия смисъл, заложен в досегашния опит на човечеството от предшестващите векове. Паралелно с това се работи за философско и математическо осмисляне на новата област - квантова информация. Нещо подобно се наблюдава и в компютърните и информационни технологии. Въпреки, че ни се отдаде да намалим разделителната способност на растерната линия, получена след литография до размера на атома, трябва да преразгледаме същността на изчислителния процес, защото той отново се реализира по формалната булева логика. Съществува обаче и друга възможност, основана на квантово-механичното разбиране за информацията или представянето ѝ като фундаменталните категории материя и енергия. Мощта на квантовите компютри се заключава в необичайното поведение на материята на субатомно ниво. В квантовата реалност частиците могат да се намират едновременно в няколко места и да обединяват свойствата на частицата и вълната. По-конкретно, отново влиза в сила принципът на Хайзенберг за неопределеност.

На база тези разсъждения се дава и следното пояснение за четвъртия момент или малките вероятности. Квантовият компютър или обект, класифициран според технологичното си изпълнение като такъв, се основава именно на квантово-механичното представяне на състоянието на физичния обект. Квантовите състояния, притежаващи свойството на суперпозиция, може да се събират линейно като при това се получават нови състояния. Квантовият аналог на класическа система е квантово-механичната система с две базови състояния, които се наричат „0” и „1”, например взаимодействие на спин-магнитен момент на електрона с външно магнитно поле. Освен в тези две базови, такава система може да се намира в състояние, задавано с линейната комбинация:

$$y = a|0\rangle + b|1\rangle \quad (4)$$

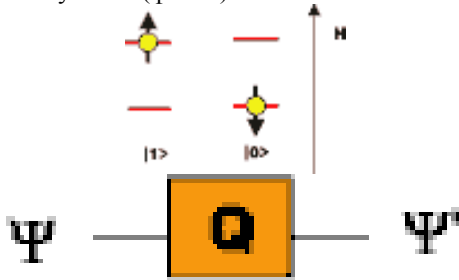
където  $a$  и  $b$  са комплексни числа, удовлетворяващи условието  $|a|^2 + |b|^2 = 1$ . (5)

Множеството от състояния на кубита е тримерно тяло (тор) и идентификацията му зависи от три координати (фиг. 4). Ако в първия случай са възможни само две състояния, то във втория – всякакви движения вътре в тора. При ограничаване само на вътрешните състояния множеството може да се изобрази като кръг, на който да се изразят множество от състояния. Очевидно е, че сложността на кубита е несъизмеримо по-голяма от бита и до някаква степен оценява достиженията на човешката цивилизация. Така вероятностите се увеличават



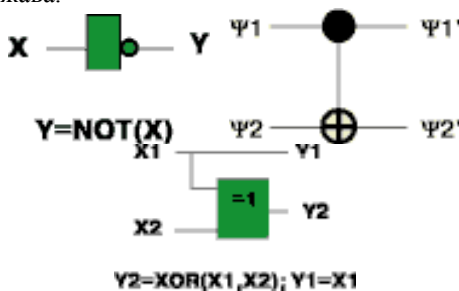
Фиг. 4. Снимка от ел. микроскоп на 1 кубит. Множество от състояния в тримерно тяло [11]

неимоверно много. Прието е кубитите да се означават с гръцката буква  $\Psi$  (фиг. 5).



Фиг. 5. Кубит – означения

В квантовата логика съществуват базови функции, от които могат да се построят производни функции. Поради излизане от темата на статията само ще споменем тези, които реализират постановката от фиг. 4. Примери са еднокубитовият елемент  $Q$  и двукубитовият елемент «управлявано НЕ», CNOT (controlled NOT), показани на фиг. 6. Търсенето на модел между физическите и информационните връзки на частиците продължава.



Фиг. 6. Примери за функции на квантовата логика

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Квантовата механика описва физическото състояние на светлината и материята и формулира концепции, които напълно противоречат на нашите естествени, ежедневни възприятия за природата. Физиците се опитват да обяснят чрез причинно-следствени методи феномените в квантовата механика, по същия начин, по който правят това в класическата физика. Основна стъпка в прехода е нанотехниката. Затова в настоящата публикация са разгледани историческият аспект на проблема, основните понятия, приликите и разликите между двете механики и промените в хода на този преход. Всичко около нас е резултат от една мащабна картина в която отделните части имат връзка помежду си. Въпреки тези усилия, един от основните проблеми на квантовата механика е, че тя не може да даде адекватен отговор на въпроса „Как обектите, които виждаме около нас всеки ден, възникват от странното поведение на микрочастиците?“. В този смисъл задаването на въпроса „Жива ли е идеята, че съзнанието играе роля в създаването на реалността?“ остава актуално. Преходът продължава. QUO WADIS нанотехника? Навярно отговор на това ще ни дадат производните науки на нанотехниката или ангстрьомтехниката - следващото стъпало в прехода към квантова механика.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Къртунов С., Технологични основи в мехатрониката, микро- и наносистемната техника, (учебник-монография), Габрово, УИ „В.Априлов“, 2012 година, ISBN 978-954-683-482-9
2. Пул Ч., Нанотехнологии: учеб. пособие / Ч. Пул, Ф. Оуэнс; пер. с англ. под ред. Ю. И. Головин, 2-е изд., доп., Москва, Техносфера, 2006, стр. 336 (Мир материалов и технологий), ISBN 5-94836-081-4
3. Нанотехнологии. Азбука для всех / ред. Третьяков Ю., 2-е изд., испр. и доп., Москва, Физматлит, 2009, стр. 368, ISBN 978-5-9221-1048-8
4. Российские нанотехнологии, Журнал, Шифр издания: P846712, Москва, "Медиа-Гранд", 2011, ISSN 1992-7223
5. Специализированная база данных патентов США. "Нанотехнологии", Томск, Томски Университет СУР, 2009, УДК: 62-181.48(088.83) + 016:62-181.48
6. Алексенко А., Нано- и микросистемная техника, Перелік російських видань з нанотехнологій, N 9, 2009, ISSN 1813-8586, стр. 33-36
7. Онами М., Введение в микромеханику, Москва, Металлургия, 1987, УДК 531, перевод от японски П. Д. Баев
8. Kartunov S., State, Applications and Tendencies in the Advance of Novelty Nanotechnologies, Vranecchka banja, Serbia, ISK "RADMI-05", 2005, стр. 53, ISBN 86-83803-20-1
9. Къртунов С., Състояние и тенденции в развитието на водещите технологии за изделия от микро- и нанотехниката, Габрово, ЮНС "35г. катедра МУ", 2003, стр. 23
10. <http://course.quantum-bg.org/principles.pdf>, Принципи на квантовата механика, 2013
11. (<http://www.softvisia.com/users/pantockrator/1um.pn>, [http://en.wikipedia.org/wiki/Bloch\\_sphere](http://en.wikipedia.org/wiki/Bloch_sphere))

/ април 2013 г./