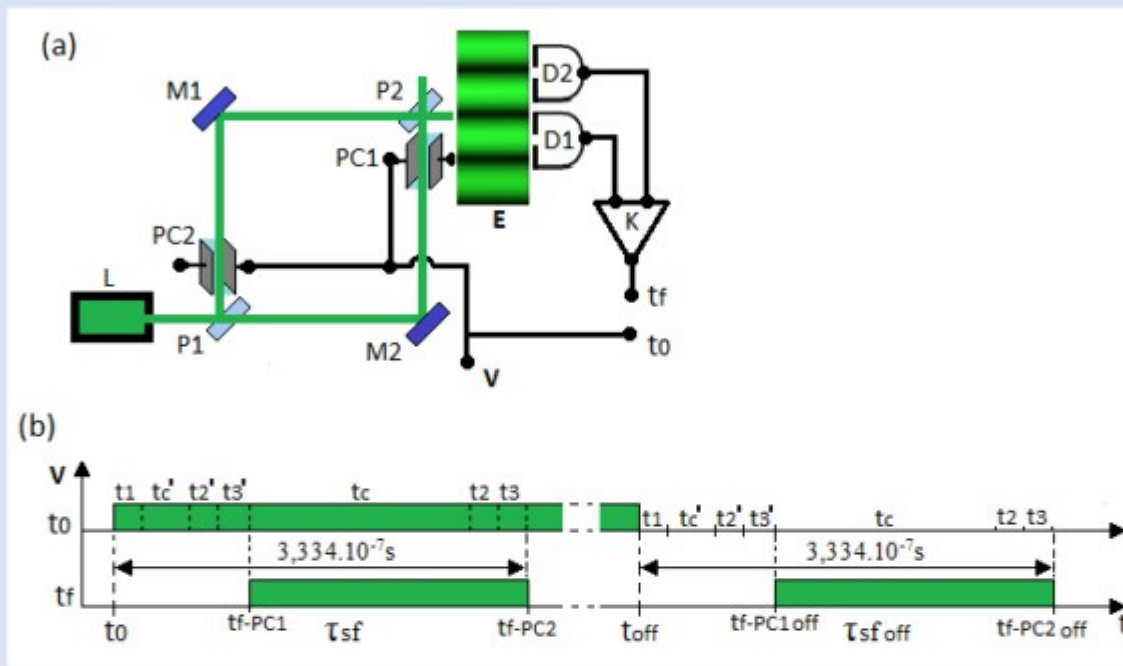


Лозко Георгиев, Даниел Георгиев



Експериментална проверка на колапс на вълновата функция и нелокалност

Лозко Георгиев, Даниел Георгиев

**Експериментална проверка на колапс на вълновата
функция и нелокалност**

Харманли, 2026

©Автор: Лозко Георгиев, Даниел Георгиев

©Издателство: ЛДГ2

Харманли, 2026г.

Анимации към публикацията -

https://ldg2.com/animation_qm

ISBN 978-619-93873-4-4

Експериментална проверка на колапс на вълновата функция и нелокалност

Лозко Г. Георгиев, Даниел Л. Георгиев
e-mail: comments@ldg2.com
(01 July 2020)

Резюме. В тази статия се разглеждат експерименти при манипулация на рамената на интерферометъра на Mach-Zehnder, със съответната измерена промяна в интерференчната картина. Разглежда се експерименталното измерване на време периоди, стартирани с манипулацията на рамената, съответно финализирани от измерената промяна в наблюдаваната интерференчната картина. Анализират се измерените време периоди и съгласуването им с константната скорост на светлината.

Ключови думи: квантова оптика, колапс на вълновата функция, нелокалност, интерференция

Съдържание

1. Увод.
 2. Експериментална проверка на колапс на вълновата функция и нелокалност с интерферометър на Mach-Zehnder. 2.1. Теоретични принципи. 2.2. Експериментална проверка.
 3. Обобщение.
 4. Заключение.
- Литература

Абревиатури: КМ - квантова механика, ИК - интерференчна картина, КИ - Копенхагенска интерпретация, ВФ - вълнова функция, КВФ - колапс на вълновата функция, ЕМВ - електромагнитни вълни

1. Увод

Експерименталният факт на наблюдавана интерференция при светлината, до началото на миналия век, се обяснява с вълновите свойства на светлината. Но с развитието на квантовата механика (КМ) и доказването, че светлината има квантови свойства, то тези ново доказани свойства задължително трябва да се съгласуват качествено и количествено с експерименталния факт на интерференция. За обяснение и съгласуване на крайния резултат на интерференчна картина (ИК), Копенхагенска школа, създатели на Копенхагенската интерпретация (КИ), приема вероятностния модел и дуалността на фотона със свойствата и на вълна, и на частица. Но от това следва вълновата функция (ВФ) на всеки конкретен фотон, от множеството фотони в снопа, да „удовлетворява“ и свойството мигновен колапс на вълновата функция (КВФ), както и следващите от това (или свързаните с това, според някои интерпретации) ефекти на квантова нелокалност.

Възможността за доказване на ВФ, КВФ и изискващата се квантова нелокалност, се разглежда с мислени и реални експерименти за които е писано в много литератури. Особено внимание заслужава обзора на Klyshko D. N. [1], където освен множеството литературни

източници по възникналите въпроси на КМ, се разглеждат и някои от проблемите относно: измерване на КВФ, измерване на частичен КВФ (наричан също - частична редукция на вълновата функция), както и проявата на КВФ в експериментите съгласно изискванията на КИ. В заключението автора пише: *Доколкото ни е известно, до сега не е намерен нито един експериментален факт, потвърждаващ или опровергаващ хипотезата за редукция на ВФ, както и различните модели на процеса измерване, независимо от всички усилия, остават напълно изолирани от експеримента.*

Същността на проблемите на мигновения КВФ и квантовата нелокалност, най-лесно могат да се изяснят с работата на интерферометъра на Mach-Zehnder и наблюдавана ИК. Когато на входа на интерферометъра постъпва лазерна светлина, то върху екрана наблюдаваме стандартна ИК със съответните максимуми и минимуми съгласно закономерностите на интерференция. Кое, съгласно КИ се обяснява с представата, че всеки конкретен фотон или съответно ВФ на фотона, по неизвестен начин „познава“ цялата експериментална постановка и „определя“ попадението (преразпределението, редукцията) на фотоните за образуване на стандартна ИК. Но това не се съгласува с доказаните свойства и факта, че фотона е неделим, и преминава само по едното рамо на интерферометъра, както и факта, че ВФ е само математична представа, и няма физична реалност. Следователно не може да „познава“ и „определя“ преразпределението на фотоните за образуване на ИК.

Но освен това, когато манипулираме интерферометъра, примерно променим оптичния път в едното рамо с разстояние - $\lambda/2$, виж [2] и разгледаните техники на промяна на оптичния път с $\lambda/2$. Тогава всяка манипулация на рамото с разстояние - $\lambda/2$, води до размяна и на местоположението на максимума и минимума на ИК, т.е. до промяна на ИК. Но двата процеса, манипулация на рамото и промяна на ИК, задължително трябва да са едновременни, следствие от мигновения КВФ изискван съгласно КИ. Но такава едновременност на двата самостоятелни процеса, влизат в явни противоречия с експериментално доказаните свойства на константната скорост на светлината в рамената на интерферометъра, виж [1] и разглежданата частична редукция на ВФ. Като в случая, за да проверим мигновения КВФ, тъй като ВФ няма физична реалност, съответно е ненаблюдаема и неизмерима по принцип, дори и съгласно КИ, то можем да измерим само крайния резултат на променената ИК в следствие на манипулацията.

Като в случая, имаме два реални самостоятелни процеса, манипулация в рамото на интерферометъра и съответна промяна на ИК, които съгласно КИ и мигновения КВФ, трябва задължително да са едновременни, която едновременност вече може експериментално да проверим. В настоящата статия, която разглеждаме като продължение на [2], ще разгледаме експерименти, при които експериментално да измерим, анализираме и проверим, едновременността на така разглежданите два процеса, като отчитаме закономерностите на интерференция и константна скорост на ЕМВ в рамената на интерферометъра.

2. Експериментална проверка на колапс на вълновата функция и нелокалност с интерферометъра на Mach-Zehnder

2.1. Теоретични принципи

Същността на експериментите разглеждащи проверка на мигновен КВФ и вероятни нелокални ефекти и процеси, можем да проверим със следната логика. Имаме работещ интерферометър на Mach-Zehnder и наблюдавана върху екрана ИК със съответните интерференчни ивици, т.е. максимуми и минимуми съгласно закономерностите на интерференция. Нека приемем, че рамената на интерферометъра имат размер 100 m, както разглеждаме и по-надолу, виж Фиг.1. (а). Ако манипулираме едното рамо на интерферометъра,

примерно удължим оптичния път с $\lambda/2$, то максимума и минимума на ИК ще разменят местата си, т.е. имаме промяна на ИК, която реално можем да измерим. Като по този начин, имаме двата реални самостоятелни процеса, манипулация и промяна на ИК, които можем да измерим, и съответно да проверим едновременността на двата процеса, изисквана съгласно мигновения КВФ, което основно ни интересува. Да отбележим, че за да имаме коректен резултат относно едновременността, то двата процеса, трябва да са възможно най-кратки, както и всеки поотделно да е точно измерен (фиксиран) във времето.

Процеса манипулация можем да извършим с клетка на Покелс, изпълнена като интегрално оптично устройство, виж [4] 20 глава, която има време за превключване, сработване по-малко от 10^{-11} s. Когато на клетка на Покелс се подаде подходящо по стойност напрежение, което отговаря на промяна на показателя на пречупване (Δn) [4], аналогично на удължаване на оптичния път с $\lambda/2$, както се разглежда в [2]. След времето за сработване, на изхода на клетката на Покелс имаме фазова задръжка с $\lambda/2$ за текущите преминаващи ЕМВ. Началото на процеса сработване, който започва с включване на напрежението на клетката на Покелс, съответно е и начало на процеса манипулация, който за удобство по-надолу, ще разгледаме и наричаме start на процеса манипулация.

Процеса размяна местоположението на максимума и минимума, разглеждан като промяна на ИК, следствие на фазовата задръжка в манипулираното рамо, който ще настъпи след като ЕМВ с фазова задръжка достигнат до екрана, можем да измерим по следния начин. Наблюдаваната върху екрана Е интерференчна картина, за хоризонталния изход на интерферометъра виж Фиг.1. (а), както графично е показано, можем да извършим с два фото диода D1 и D2. Като фотодиод D1 е позициониран да „вижда“ (наблюдава) само един от максимумите (ивиците) на ИК, а D2 е позициониран да вижда само един от минимумите на ИК. Такава експериментална техника, за наблюдение самостоятелно на максимум и минимум на ИК чрез подходящо позициониране, е позната в експерименталната оптика, виж [3]. По този начин на разположение на D1 и D2, светлинния интензитет, който попада върху тях, ще се промени при промяната на ИК (следствие на фазовата задръжка), съответно може да се измери момента на тази промяна на интензитета, която условно ще наречем final на процеса промяна на ИК.

Така, че имаме реално измерим времеви интервал от start до final, което основно ни интересува, който за удобство ще наречем tsf. Да отбележим, че продължителността на tsf, освен от времената за сработване на клетката на Покелс и фотодиодите, ще зависи и от разстоянието - L, което ЕМВ ще изминат до екрана, след като са придобили фазовата задръжка на изхода на клетката на Покелс, по закона $t = L/C$, където C е скоростта на светлината.

2.2. Експериментална проверка

Първи вариант на експеримента. Към входа на симетричен интерферометър на Mach-Zehnder Фиг.1. (а), е насочен лазерен сноп от лазера L. Полупрозрачното огледало P1 дели лазерния сноп на два снопа с равен интензитет в двете рамена на интерферометъра. Във всяко от рамената, непосредствено до огледалото P1 са поставени клетки на Покелс PC1 и PC2, изпълнени като интегрални оптични устройства. Огледалата M1 и M2 са отразяващи, а P2 е полупрозрачно огледало, което разделя интензитета към двата изхода на интерферометъра, на който върху екрана Е наблюдаваме ИК, както е показано на чертежа. Наблюдението на ИК на хоризонталния изход, заменяме с два фотодиоди D1 и D2, като фотодиод D1 е позициониран да „вижда“ (наблюдава) само един от максимумите (ивиците) на ИК, докато D2 е позициониран да вижда само един от минимумите на ИК, както е показано на Фиг.1. (а). По този начин на разположение на D1 и D2, светлинния интензитет, който попада върху тях, ще промени напрежението (съпротивлението) и на изходите на D1 и D2, които напрежения се подават към бърз компаратор – K, както е обозначено на чертежа (разглеждан като бърза електронна схема за съвпадения). Съответно на изхода на компаратора tf, ще имаме нулево напрежение за така разположените и

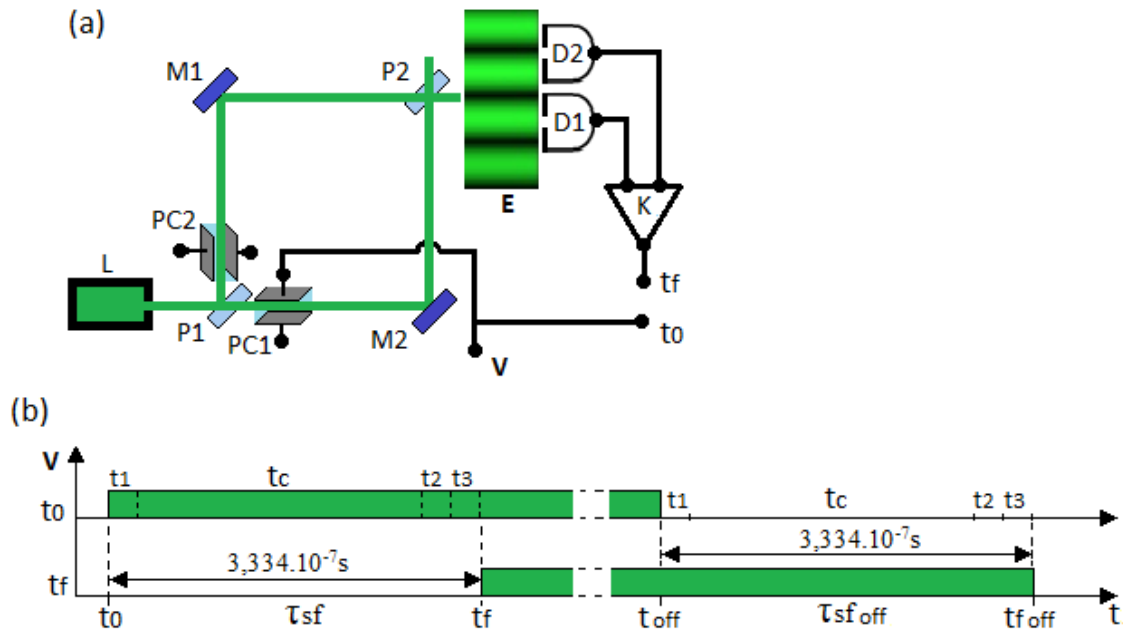
„осветени“ D1 и D2 и подбран режим на K, което за удобство ще разглеждаме, като основно състояние на ИК и изхода t_f , а фазовата разлика между двата интерфериращи снопа ще приемем за нулева.

Но когато включим подходящо по стойност напрежение в точка V свързана към PC1, както е показано на Фиг.1. (a), което разглеждаме като start на процеса манипулация, измерван в точка t_0 . След времето за сработване на PC1, поредните ЕМВ на изхода на PC1 с фазова задръжка $\lambda/2$, след времето за което ЕМВ ще достигнат до фотодиодите, по закона L/C, фазовата разлика между двата интерфериращи снопа ще се промени съгласно фазовата задръжка $\lambda/2$. Тогава вече максимума и минимума на ИК, ще разменят местата си, като в случая, фотодиод D1 ще вижда минимум, а фотодиод D2 ще вижда максимум от ИК. Съответно, изхода на компаратора t_f ще промени своето състояние, от текущо нулево напрежение, към максималното работно напрежение, което разглеждаме като final на процеса промяна на ИК. Като в случая вече имаме, start на процеса манипулация, който измерваме в точка t_0 , както и final на процеса промяна на ИК, който измерваме в точка t_f , които неедновременни процеси start и final можем да измерим с двулъчев осцилоскоп.

На Фиг.1. (b) (лявата част на чертежа), е показана време диаграма на измерените процеси start и final, като размера на интерферометъра, разстоянието от P1 до D1 и D2 приемаме за равно на 100 m. На входа на осцилоскопа t_0 , измерваме напрежението в точка t_0 , отговарящо на start на процеса манипулация, а на входа t_f , измерваме напрежението в точка t_f , отговарящо на final на процеса промяна на ИК. Съответно, продължителността на времето t_{sf} , което основно ни интересува, може да бъде измерено и анализирано.

Да отбележим, че времето t_{sf} се получава от два фактора. Като първия фактор е времената за сработване (превключване) на клетката на Покелс, фотодиодите и компаратора, което време за сработване ще обозначим като t_s . Клетката на Покелс изпълнена като интегрално оптично устройство, както и фотодиодите, могат да работят с честота по-голяма от 100 GHz, виж [4] 20 и 18 глави, т.е. период на сработване $T = 1 / \nu$ и имат стойност $\leq 10^{-11}s$. Електронните схеми, като компаратори, работят също с честота над 100 GHz, т.е. време за сработване също $\leq 10^{-11}s$. На време диаграмата Фиг.1. (b) са показани времената за сработване: t_1 е времето за сработване на PC1, t_2 е времето за сработване на D1 и D2, а t_3 е времето за сработване на компаратора K. Като сбора на времената за сработване за трите елемента, $t_s = t_1 + t_2 + t_3$, за удобство ще закръглим на $10^{-10}s$.

Втория фактор определящ времето t_{sf} , е времето за което, ЕМВ придобили фазова задръжка в PC1 ще достигнат до фотодиодите по закона L/C, където L е разстоянието от PC1 до фотодиодите, а C е скоростта на светлината, обозначено на време диаграмата Фиг.1. (b) като t_c . В случая, тъй като PC1 изпълнена като интегрално оптично устройство има минимален размер спрямо интерферометъра, то за удобство игнорираме размера на PC1 така, че размера на интерферометъра разглеждаме от P1 до фотодиодите. Съответно времето t_c , за размер от 100 m на интерферометъра е $L/C = 3,333 \cdot 10^{-7}s$, така че времето $t_{sf} = t_s + t_c = 3,334 \cdot 10^{-7}s$, а като хронология има следната последователност $t_{sf} = t_1 + t_c + t_2 + t_3$. Да отбележим, че тъй като $t_c \gg t_s$, то мащаба на разглежданите времена на чертежа не е спазен.



Фиг. 1. (а) Симетричен интерферометър на Mach-Zehnder, PC1 и PC2 се намират непосредствено до P1. При включване или изключване на напрежение към PC1 в точка V, изместването на максимума на ИК се измерва на изхода tf, както графично е показано на чертежа. (b) Време диаграма при включване на напрежението (лявата част по чертежа), започва от времето t0 и завършва с tf, измереното време $\tau_{sf} = t_1 + t_c + t_2 + t_3 = 3,334 \cdot 10^{-7} \text{ s}$. Време диаграма при изключване на напрежението (дясната част по чертежа), започва от времето toff и завършва с tfoff, измереното време $\tau_{sfoff} = t_1 + t_c + t_2 + t_3 = 3,334 \cdot 10^{-7} \text{ s}$.

Да отбележим, че дължините на проводника от точка V до PC1 и t0 са равни, както и проводниците от изходите на D1 и D2 до компаратора, т.е. задължително е спазването на симетричност на пътя на сигналите за цялата постановка Фиг.1. (а). Да отбележим, че времето ts е неотстранимо в експериментите, но има точно определена стойност зададена от използваните елементи, както и може да се измерва, освен това времето $t_c \gg t_s$, така, че ts няма пряко отношение към основните изводи.

Да отбележим, че с включването на напрежението в точка V, то остава постоянно включено за неограничено време, съответно времето tsf можем да измерим еднократно, както е показано на време диаграмата Фиг.1. (b) (лявата част на чертежа). Да отбележим, че изключването на напрежение което се разглежда по-надолу, за удобство ще обозначим като toff, т.е. времената разглеждани при изключване на напрежението получават обозначението – off (дясната част на чертежа), за да са различни от останалите времеви интервали и процеси.

Така, че изключването на напрежението в точка V, ще върне ИК и изхода на K, към така разглежданото основно състояние преди включване на напрежението. Защото, след момента на изключване на напрежението toff, разглеждан като start на процеса манипулация, след времето за сработване t1, на изхода на PC1, фазовата задръжка за текущите преминаващи ЕМВ ще бъде прекратена. Съответно, след времето tc, ЕМВ с прекратена фазова задръжка, ще достигнат до фотодиодите, където вече фазовата разлика между двата интерфериращи снопа ще е пак нулева. Което ще върне ИК към така разглежданото основно състояние, а след времето t2 и t3 ще върне в основно състояние и изхода на K, измервано на входа на осцилоскопа tf, и показано като времето tfoff. Тогава измерения време период tsfoff, ще има същата последователност и стойност както и tsf, т.е. $\tau_{sfoff} = t_1 + t_c + t_2 + t_3 = 3,334 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ и също можем да наблюдаваме еднократно.

задръжка на ЕМВ от единия сноп е достигнала местоположението където се пресичат двата снопа, преди да се проектират върху екрана, т.е. индиректно се доказва и ефекта на влияние между ЕМВ (фотоните) от двата снопа, разглеждан основно в [2].

Разгледаните експерименти в [таблица - 1](#), могат да се извършат във всяка лаборатория по оптика, като за това не се изисква сложна или скъпа апаратура, всъщност резултатите могат да се изведат и теоретично, като използваме експериментално доказаните закономерности на константната скорост на светлината. Получения импулс при трети вариант, може да намери приложение и се използва като времеви еталон, защото времетраенето му е функция на различното разстояние на РС1 и РС2 до Р2, както и за получаване на максимално къси импулси в електрониката и микропроцесорите, когато е изпълнен като интегрално - оптично устройство.

Експериментите в [таблица - 1](#), са на основа стандартни доказани закономерности, но в случая измерваните времена и процеси, както и динамиката на различните времеви процеси, които протичат паралелно във времето, усложнява донякъде, възприемането на цялостното ново въведено разглеждане, като за улеснение на разглежданите процеси е представена компютърна анимация, която трябва да се разглежда само като помощен материал -

https://ldg2.com/animation_qm

https://www.youtube.com/channel/UCKRHTPajIyqMPUCWp_Ps-xA

Липсващи ефекти от мигновен КВФ и нелокалност, можем да докажем също, ако модифицираме частично експерименталната постановка на [Фиг.1. \(а\)](#). Като РС1 вместо до Р1, поставим непосредствено до огледалото М2, в случая няма значение преди или след М2. За да не нарушим равенството на интензитета и наблюдаваната ИК, във всяка страна на така образувания квадрат на интерферометъра, поставяме по едно допълнително полупрозрачно огледало. Като между огледалата М2 и Р2 поставим Р3, между М2 и Р1 поставим Р4, между М1 и Р1 поставим Р5, а между М1 и Р2 поставим Р6. По този начин, отразен лазерен сноп от едно от допълнително поставените полупрозрачни огледала (Р3, Р4, Р5 и Р6), можем да насочим към сноп отразен от друго полупрозрачно огледало така, че да образуваме допълнителен интерферометър и да наблюдаваме ИК. Като изместване на максимума, когато включим или изключим напрежението на РС1, ще има само, ако единия от двойката интерфериращи снопове е от полупрозрачно огледало Р3 (разположено след РС1), съответно няма да има изместване на максимума, ако в двойката интерфериращи снопове не участва снопа отразен от Р3. Т.е. манипулацията върху РС1 и съответната фазовата задръжка, променят фазата само на ЕМВ разпространяващи се след РС1, докато ЕМВ (фотоните) разпространяващи се по другите части на интерферометъра, са в „неведение“ за манипулацията върху РС1.

4. Заключение

Приетата от КИ представа, че фотона (светлината) има вълново-корпускуларни свойства, не е доказана до сега с категорични експерименти, но въпреки това в повечето литератури, дуалността на фотона се приема и разглежда като даденост, основа, върху която се градят следващи представи и принципи. Съгласно тази представа, на входа на интерферометъра, след първото полупрозрачно огледало, фотона се разглежда с дуалистични свойства, така, че да се съгласува с наблюдавания факт на интерференция. С въведената неопределеност, че не знаем по кое от рамената преминава конкретен фотон, като тази неопределеност на фотона „управлява“ получаваната ИК, са само математични изисквани правила, верни по принцип, но наложени само за вътрешно съгласуване на КИ. Проблемата е, че тези свойства, изискват фотона въпреки, че е неделим, да „познава“ цялата експериментална постановка и когато манипулираме едно от рамената на интерферометъра, да „отреагира“ (промени ИК) и то мигновено.

Всъщност, всички процеси и времена разглеждани в настоящата статия, не се разглеждат последователно и цялостно при така наречените експерименти с отложен избор, квантово

изтриване и квантова корелация, с които КИ цели доказване на реално „влияние“ на ВФ върху експерименталния резултат ИК. Като така разглежданите в тази статия времена t_0 , t_f , t_s , t_c , t_{sf} и получени импулси, не се анализират коректно всички, когато това е възможно, както и не могат да се анализират и измерват по принцип поради спецификата на използваните експериментални постановки при експериментите с отложен избор, квантово изтриване и квантова корелация. Но въпреки това, в някои случаи се правят „фундаментални“ изводи, водещи до телепортация на състоянието на квантов обект и над светлинни скорости. Като един от проблемите на експериментите доказващи КИ, е че вместо манипулация за някой квантов процес, се използва модулация, независимо от вида и. Но модулацията обикновено е бърз периодичен процес, повтарящ се във времето, така че всеки период (честота, повтораемост на модулацията) е не отличим спрямо друг период на модулация, когато два или повече модулирани периода се намират в рамената на интерферометъра, т.е. при експериментите използващи модулация, анализ, измерване за всички времена от start до final е невъзможен. Докато, предимството на използвания процес манипулация, е че всички времена от start до final, могат да бъдат измервани и анализирани, тъй като те са еднократни, и при включване, и при изключване на напрежението в точка V.

С разглежданите експерименти в [таблица - 1](#), ефекти на мигновени процеси и нелокалност, не се наблюдават (измерват), а точно обратно, резултатите са детерминистични и следват хронологично константната скорост на светлината в раменете на интерферометъра. Като всички резултати, съгласно [таблица - 1](#), могат да се обяснят качествено и количествено единствено с детерминизма и константната скорост на светлината, без изискването за мигновени процеси и нелокалност. Освен това, изместване на максимум има, само когато манипулираната фазова разлика на ЕМВ от единия сноп е достигнала екрана (фотодиодите), т.е. индиректно се доказва и ефекта на процеса влияние между двата снопа (ЕМВ, фотони), разглеждан като модела на влияние в [\[2\]](#).

Литература

- [1] D.N. Klyshko, *Basic quantum mechanical concepts from the operational viewpoint*, Physics – Uspekhi **41** 885–922 (1998)
- [2] Л. Георгиев, Д. Георгиев, *Експерименти на интерференция със съвпадащи и отместени по време лазерни импулси*, Сп. Българска Наука, брой **128** (2020), <https://nauka.bg/>, (English translation <https://vixra.org/abs/1907.0105>)
- [3] T.L. Dimitrova and A. Weis, (2008) *The wave-particle duality of light: a demonstration experiment*, *Am. J. Phys.* **76** 137-14.
- [4] B. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics* (2007), John Wiley & Sons, ISBN 978-0-4713-5832-9 (en), 978-5-91559-135-5 (ru)