

# Experimental verification of wave function collapse and nonlocality

Lozko G. Georgiev, Daniel L. Georgiev  
e-mail: [lozko.daniel.georgiev@gmail.com](mailto:lozko.daniel.georgiev@gmail.com)  
(01 July 2020)

**Abstract.** This article discusses experiments in manipulating the arms of the Mach-Zehnder interferometer, with the corresponding measured change in the interference pattern. The experimental time measurement of periods started with the manipulation of the arms, respectively finalized by the measured change in the observed interference pattern, is considered. The measured time periods and their coordination with the constant speed of light are analyzed.

**Keywords:** quantum optics, wave function collapse, nonlocality, interference

---

## Експериментална проверка на колапс на вълновата функция и нелокалност

Лозко Г. Георгиев, Даниел Л. Георгиев  
e-mail: [lozko.daniel.georgiev@gmail.com](mailto:lozko.daniel.georgiev@gmail.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. Коего, 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 интерференцията 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 интерференцията. 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 ( $\Delta n$ ) [\[4\]](#), 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 разглеждаме 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  $\tau_{sf}$ . Да отбележим, че продължителността на  $\tau_{sf}$ , 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  $E$  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  $t_f$ , 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.

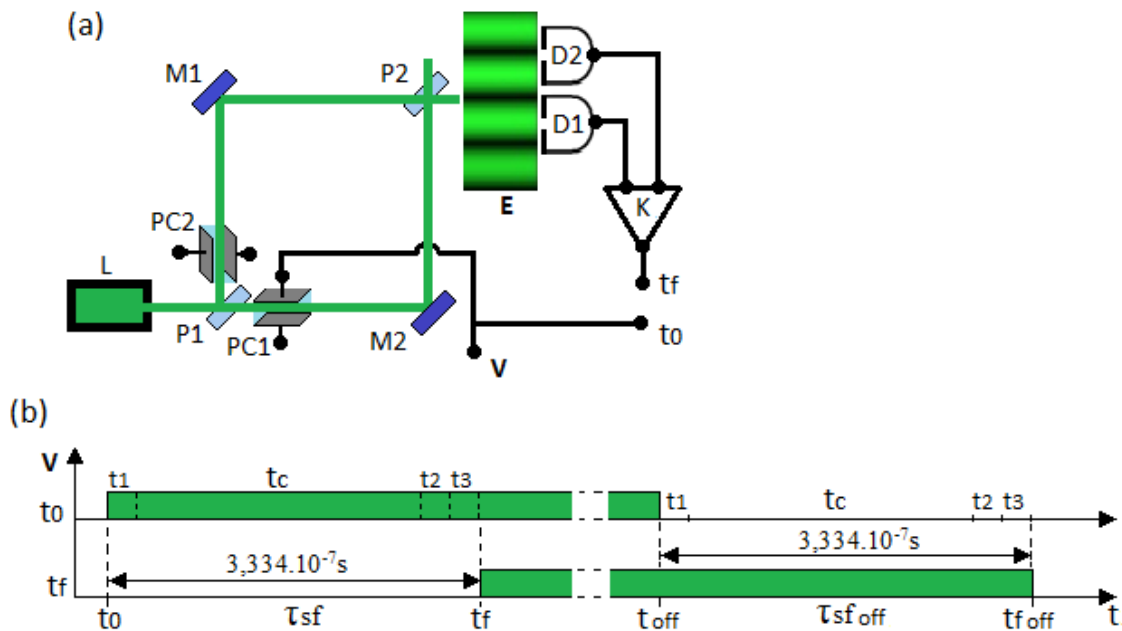
Но когато включим подходящо по стойност напрежение в точка  $V$  свързана към  $PC1$ , както е показано на **Фиг.1. (а)**, което разглеждаме като  $start$  на процеса манипулация, измерван в точка  $t_0$ . След времето за сработване на  $PC1$ , поредните ЕМВ на изхода на  $PC1$  с фазова задръжка  $\lambda/2$ , 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  $100\text{ m}$ . 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 оптическо устройство, както и фотодиодите, могат да работят с честота по-голяма от  $100\text{ GHz}$ , виж [4] 20 и 18 глави, т.е. период на сработване  $T = 1/\nu$  и имат стойност  $\leq 10^{-11}\text{ s}$ . Електронните схеми, като компаратори, работят също с честота над  $100\text{ GHz}$ , т.е. време за сработване също  $\leq 10^{-11}\text{ s}$ . 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  $10^{-10}\text{ s}$ .

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  $\tau_{sf} = t_s + t_c = 3,334 \cdot 10^{-7} s$ , а като хронология има следната последователност  $\tau_{sf} = t_1 + t_c + t_2 + t_3$ . Да отбележим, че тъй като  $t_c \gg t_s$ , то мащаба на разглежданите времена на чертежа не е спазен.



Фиг. 1. (a) 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  $t_f$ , както графично е показано на чертежа. (b) Време диаграма при включване на напрежението (лявата част по чертежа), започва от времето  $t_0$  и завършва с  $t_f$ , измереното време  $\tau_{sf} = t_1 + t_c + t_2 + t_3 = 3,334 \cdot 10^{-7} s$ . Време диаграма при изключване на напрежението (дясната част по чертежа), започва от времето  $t_{off}$  и завършва с  $t_{off}$ , измереното време  $\tau_{sfoff} = t_1 + t_c + t_2 + t_3 = 3,334 \cdot 10^{-7} s$ .

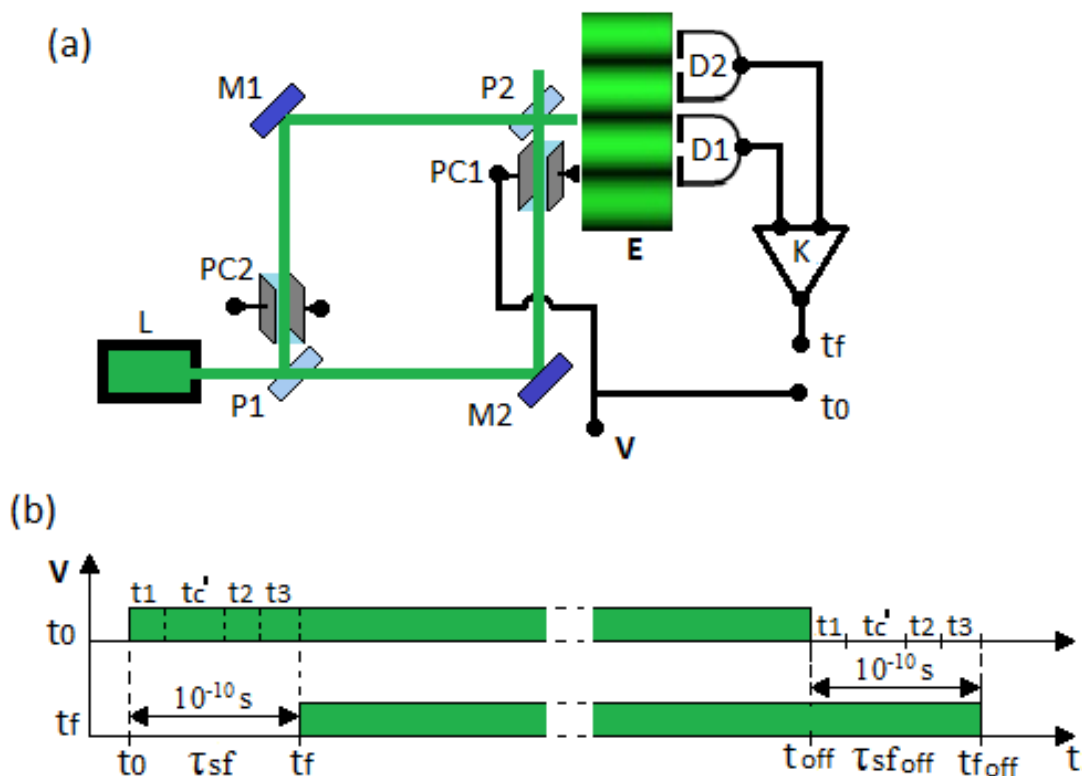
Да отбележим, че дължините на проводника от точка V до PC1 и  $t_0$  са равни, както и проводниците от изходите на D1 и D2 до компаратора, т.е. задължително е спазването на симетричност на пътя на сигналите за цялата постановка Фиг.1. (a). Да отбележим, че времето  $t_s$  е неотстранимо в експериментите, 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  $t_s$  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  $\tau_{sf}$  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  $t_{off}$ , 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  $t_{off}$ , разглеждан като start на процеса манипулация, след времето за

сработване  $t_1$ , на изхода на PC1, фазовата задръжка за текущите преминаващи ЕМВ ще бъде прекратена. Съответно, след времето  $t_c$ , 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  $t_2$  и  $t_3$  ще върне в основно състояние и изхода на К, измервано на входа на осцилоскопа  $t_f$ , и показно като времето  $t_{\text{off}}$ . Тогава измерения време период  $\tau_{\text{sfoff}}$ , ще има същата последователност и стойност както и  $\tau_{\text{sf}}$ , т.е.  $\tau_{\text{sfoff}} = t_1 + t_c + t_2 + t_3 = 3,334 \cdot 10^{-7} \text{ s}$  и също можем да наблюдаваме еднократно.

**Втори вариант** на експеримента. Разглеждаме на същата експериментална постановка, като единствената разлика е, че PC1 се намира непосредствено до P2, Фиг.2. (а). Като и в този случай сме позиционирали D1 да вижда само един от максимумите, а D2 да виждат само един от минимумите на ИК, съответно на изхода на компаратора имаме нулево напрежение, което разглеждаме като основно състояние на ИК и изхода  $t_f$ .



Фиг. 2. (а) Симетричен интерферометър на Mach-Zehnder, PC1 се намира непосредствено до P2, а 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  $t_f$ . (б) Време диаграма при включване на напрежението (лявата част по чертежа), започва от времето  $t_0$  и завършва с  $t_f$ , измереното време  $\tau_{\text{sf}} = t_1 + t_{c'} + t_2 + t_3 = 10 \cdot 10^{-10} \text{ s}$ . Време диаграма при изключване на напрежението (дясната част по чертежа), започва от времето  $t_{\text{off}}$  и завършва с  $t_{\text{foff}}$ , времето  $\tau_{\text{sfoff}} = t_1 + t_{c'} + t_2 + t_3 = 10 \cdot 10^{-10} \text{ s}$ .

Но когато включим напрежението в точка V, измервано на входа  $t_0$  (разглеждано като start на процеса манипулация), то след времената за сработване  $t_s = t_1 + t_{c'} + t_2 + t_3$ , на входа  $t_f$  (разглеждано като final на процеса промяна на ИК) вече ще измерим максимално работно напрежение, както е показано на време диаграмата Фиг.2. (б) (лявата част по чертежа).

Да отбележим, че времето  $t_c'$ , за което светлината ще измине разстоянието от РС1 до фотодиодите, което разстояние разглеждано теоретично, има минимален размер примерно 10 nm, то  $t_c'$  има стойност  $\approx 3,3 \cdot 10^{-11}$  s. Тъй като времето  $t_c' \ll t_c$  ( $t_c$  от първи вариант), то времето  $t_c'$  няма пряко отношение към крайните изводи, и за удобство в случая сме включили към усредненото време за сработване  $t_s = 10 \cdot 10^{-10}$  s. Като в този вариант, времето  $t_{sf} = t_s = 10^{-10}$  s, т.е. ще измерим само времената за сработване  $t_s$  (като за удобство игнорираме разглеждането на  $t_c'$ ).

Същата последователност и логика за времеви период  $t_{s\text{off}}$ , ще получим и когато изключим напрежението в точка V, така показания времеви момент  $t_{\text{off}}$  на време диаграмата **Фиг.2. (b)** (дясната част по чертежа). Като времеви момент  $t_{\text{off}}$  разглеждан, като start на процеса манипулация след времето за сработване  $t_s$ , ще доведе до нулево напрежение на изхода  $t_f$ , измерено като времето  $t_{\text{off}}$ , разглеждано като final на процеса промяна на ИК, т.е. имаме връщане към така нареченото основно състояние на ИК и изхода  $t_f$ . Съответно, времето  $t_{s\text{off}}$ , ще има същата последователност и стойност както и времето  $t_{sf}$ . т.е.  $t_{s\text{off}} = t_1 + t_c' + t_2 + t_3 = t_s = 10^{-10}$  s, което можем да измерим еднократно (като и в случая, времето  $t_c'$  сме включили към времето за сработване  $t_s$ ).

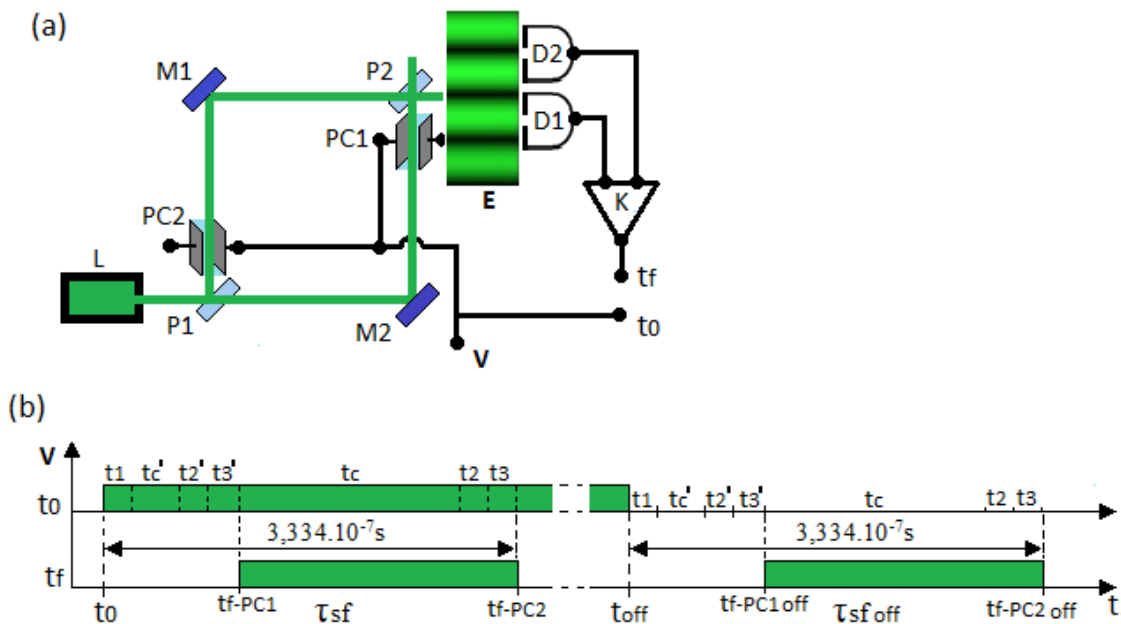
**Трети вариант** на експеримента. Разглеждаме на същата експериментална постановка спазвайки същата логика и условия, като единствената разликата между втори и трети вариант е, че проводника от точка V освен към РС1 е свързва и към РС2 **Фиг.3. (a)**. Като и в този вариант, преди включване на напрежение към точка V, имаме така нареченото, основно състояние на ИК и изхода  $t_f$ .

Но когато включим напрежението в точка V, измерено на входа на осцилоскопа  $t_0$ , показано като времето  $t_0$  на време диаграмата на **Фиг.3. (b)**, разглеждано като start на процеса манипулация. След времето за сработване  $t_s = t_1 + t_c' + t_2' + t_3'$ , на изхода  $t_f$  ще измерим максимално работно напрежение, което е времето за сработване вследствие на фазовата задръжка от РС1, обозначено като  $t_f\text{-PC1}$ , разглеждано като final на процеса промяна на ИК, но следствие на ЕМВ преминали след РС1. Като и в този случай, времето за сработване  $t_s = t_1 + t_c' + t_2' + t_3' = 10^{-10}$  s има същата стойност и последователност като при вече разгледания втори вариант. Съответно, когато до D1 и D2 достигнат ЕМВ за времето  $t_c$  (преминали по рамото P1, M1 и P2, по закона L/C), с фазова задръжка вследствие от РС2, то след времето за сработване  $t_2$  и  $t_3$ , изхода на компаратора  $t_f$ , който има текущо максимално работно напрежение, ще промени своето състояние на нулево напрежение, обозначено на чертежа като времето  $t_f\text{-PC2}$ .

Да отбележим, че времето  $t_{sf}$ , което започва от  $t_0$  и завършва с  $t_f\text{-PC2}$ , е еднакво по стойност и последователност с времето, разглеждано при първи вариант,  $t_{sf} = t_1 + t_c + t_2 + t_3 = 3,334 \cdot 10^{-7}$  s, но не включва времената  $t_c'$ ,  $t_2'$  и  $t_3'$ , защото времето  $t_c$  започва след  $t_1$  (времената  $t_c'$ ,  $t_2'$ ,  $t_3'$  и времето  $t_c$  протичат паралелно като хронология). Като в случая, независимо, че напрежението се включва едновременно към РС1 и РС2, то времената  $t_f\text{-PC1}$  и  $t_f\text{-PC2}$  не са едновременни на изхода  $t_f$ , съответно на входа на осцилоскопа  $t_f$  измерваме времеви импулс, както е показано на **Фиг.3. (b)**. Като времетраенето на импулса, започва след  $t_f\text{-PC1}$  ( $t_3'$ ) и завършва след  $t_f\text{-PC2}$  ( $t_3$ ), съответно има стойност  $t_{sf} - t_s \approx 3,333 \cdot 10^{-7}$  s, където  $t_s = t_1 + t_c' + t_2' + t_3' = 10^{-10}$  s.

Но когато изключим напрежение в точка V, независимо след колко време, както е показано на време диаграмата **Фиг.3. (b)** (дясната част по чертежа). Измервано на входа на осцилоскопа  $t_0$  и показано като времето  $t_{\text{off}}$ , разглеждано като start на процеса манипулация. Текущото нулево напрежение, което имаме на  $t_f$ , след времето за сработване  $t_1$ ,  $t_c'$ ,  $t_2'$  и  $t_3'$ , вследствие на прекратената фазова задръжка от РС1, на входа на осцилоскопа  $t_f$  ще измерим максимално работно напрежение, обозначено като времето  $t_f\text{-PC1off}$ . Съответно, когато до D1 и D2 достигнат ЕМВ с прекратената фазова задръжка вследствие от РС2 за времето  $t_c$ , то след времето за

сработване  $t_2$  и  $t_3$ , изхода  $t_f$ , който има текущо максимално работно напрежение, ще промени своето състояние на нулево напрежение, обозначено на чертежа като времето  $t_f\text{-PC2off}$ , разглеждано като final на процеса промяна на ИК. Като и в този случай, получаваме и измерваме времето  $\tau_{s\text{off}}$  и времеви импулс, аналогично на разглеждането при включване на напрежението. Съответно, времето  $\tau_{s\text{off}} = t_1 + t_c + t_2 + t_3 = 3,334 \cdot 10^{-7} \text{s}$ , не включва времената  $t_c'$ ,  $t_2'$  и  $t_3'$ , защото времето  $t_c$  започва след  $t_1$ . Както и времетраенето на импулса започва след  $t_f\text{-PC1off}$  ( $t_3'$ ), и завършва след  $t_f\text{-PC2off}$  ( $t_3$ ), съответно има стойност  $\tau_{s\text{off}} - \tau_s \approx 3,333 \cdot 10^{-7} \text{s}$ , където  $\tau_s = t_1 + t_c' + t_2' + t_3' = 10^{-10} \text{s}$ . Като и в случая, при изключване на напрежението, времето  $\tau_{s\text{off}}$  и импулса можем да измерим еднократно.



Фиг. 3. (a) Симетричен интерферометър на Mach-Zehnder, PC1 се намира непосредствено до P2, а PC2 се намира непосредствено до P1. При включване или изключване на напрежение към PC1 и PC2 в точка V, изместването на максимума на ИК се измерва на изхода  $t_f$ . (b) Време диаграма при включване на напрежението (лявата част по чертежа), измереното време  $\tau_{sf}$  започва от времето  $t_0$  и завършва с  $t_f - PC2$ , и има стойност  $\tau_{sf} = t_1 + t_c + t_2 + t_3 = 3,334 \cdot 10^{-7} \text{s}$  (времето  $t_c$  започва след  $t_1$ , така че времената  $t_c'$ ,  $t_2'$  и  $t_3'$  не участват във времеви интервал  $\tau_{sf}$ ). Време диаграма при изключване на напрежението (дясната част по чертежа), измереното време  $\tau_{s\text{off}}$  започва от времето  $t_{\text{off}}$  и завършва с  $t_f\text{-PC2off}$ , и има стойност  $\tau_{s\text{off}} = t_1 + t_c + t_2 + t_3 = 3,334 \cdot 10^{-7} \text{s}$ . Времето на така получените импулси, при включване (изключване) на напрежението, стартирани от  $t_f\text{-PC1}$  ( $t_f\text{-PC1off}$ ) и финализирани от  $t_f\text{-PC2}$  ( $t_f\text{-PC2off}$ ), е равно на  $\tau_{sf}$  ( $\tau_{s\text{off}}$ ) -  $\tau_s \approx 3,333 \cdot 10^{-7} \text{s}$ ,  $\tau_s = t_1 + t_c' + t_2' + t_3' = 10^{-10} \text{s}$ .

При разгледаните процеси от start до final, задължително трябва да се отчита фазовата разлика между двата интерфериращи снопа при достигането им до екрана (фотодиодите). Преди включване на напрежението, имаме нулева фазова разлика между двата интерфериращи снопа  $f_1 = f_2$  ( $f_1$  – снопа след PC1, а  $f_2$  – снопа след PC2), ИК има така нареченото основно състояние, а изхода  $t_f$  има нулево напрежение. Когато включим напрежението, вследствие на фазовата задръжка от PC1 с  $\lambda/2$ , след времето  $t_c'$ , вече имаме фазова разлика между сноповете  $f_1 \neq f_2$ , съответно ИК е променена, а след времето  $t_2'$  и  $t_3'$ , изхода на  $t_f$  вече има максимално работно напрежение. Но включването на напрежение е едновременен процес за PC1 и PC2, съответно



вследствие фазовата задръжка от PC2, след времето  $t_c$ , ЕМВ преминали по рамото P1, M1 и P2 са също с променена фаза, то вече, фазова разлика между двата интерфериращи снопа няма  $f_1=f_2$ , ИК има така разглежданото основно състояние, а след времето  $t_2$  и  $t_3$ , изхода  $t_f$  има нулево напрежение. Същата логика, на промяна между фазите на двата снопа, получаваме и когато изключим напрежението в точка V, **Фиг.3. (b)** (дясната част на чертежа). Съответно и в този случай, фазовата задръжка вследствие на изключеното напрежение се прекратява едновременно за PC1 и PC2, но ЕМВ с прекратена фазова задръжка достига до фотодиодите по различно време.

### 3. Обобщение

Разгледаните експерименти и получени резултати, виж **таблица - 1**, доказват, че ефекти вследствие на мигновен КВФ и нелокалност няма. Изискването съгласно КИ, всеки фотон, независимо по кое от рамената на интерферометъра преминава, да „отреагира“ мигновено, когато манипулираме едно от рамената, със съответната мигновена промяна и на ИК, не се наблюдава (измерва). Като всички резултати в **таблица - 1**, могат да се обяснят качествено и количествено единствено с детерминизма и константната скорост на светлината в рамената на интерферометъра, без да са необходими мигновен КВФ и нелокалност.

Таблица - 1. Резултати на експериментите от точка 2

№	Време диаграма	Местоположение на PC1и PC2 спрямо P1и P2	Включване и изключване на V към PC1,PC2	Време на $\tau_{sf}$	Време на $\tau_{sfoff}$	Ефекти на мигновен КВФ
1	<b>Фиг.1. (b)*</b>	PC2 – P1 – PC1	PC1	$3,334.10^{-7}$ s	$3,334.10^{-7}$ s	-
2	<b>Фиг.2. (b)**</b>	PC2 – P1, PC1 – P2	PC1	$10^{-10}$ s	$10^{-10}$ s	-
3	<b>Фиг.3. (b)***</b>	PC2 – P1, PC1 – P2	PC1, PC2	$3,334.10^{-7}$ s	$3,334.10^{-7}$ s	-

\* Времената;  $\tau_{sf}, \tau_{sfoff} = t_1 + t_c + t_2 + t_3 = 3,334.10^{-7}$  s. Времето  $t_c = 3,333.10^{-7}$  s.

\*\* Времената;  $\tau_{sf}, \tau_{sfoff} = t_s = t_1 + t_c' + t_2' + t_3' = 10^{-10}$ s. Времето  $t_c' \approx 3,3.10^{-11}$ s.

\*\*\* Времената;  $\tau_{sf}, \tau_{sfoff} = t_1 + t_c + t_2 + t_3 = 3,334.10^{-7}$  s. Времето  $t_c = 3,333.10^{-7}$  s и започва след  $t_1$ . Времето на импулса при включване (изключване) на напрежението, стартирано от  $t_f-PC1$  ( $t_f-PC1off$ ) и финализирано от  $t_f-PC2$  ( $t_f-PC2off$ ), има стойност  $\tau_{sf}$  ( $\tau_{sfoff}$ ) -  $t_s$ , където  $t_s = t_1 + t_c' + t_2' + t_3' = 10^{-10}$ s.

Единствения случай когато можем да допуснем ефекти на мигновен КВФ, е при втори вариант и време диаграмата **Фиг.2. (b)**, но само, ако разглеждаме случая изолирано от другите варианти. Където може да се допусне, че когато манипулираме PC1, след времето за сработване  $t_1$  (времето  $t_1$ , както и времената  $t_c'$ ,  $t_2$  и  $t_3$  са неотстраними в експерименталната постановка), то всички фотони в двете рамена по някакъв начин „са разбрали“ това, и съответно имаме изместване на максимума, разглеждан като  $f_{final}$  на процеса промяна на ИК. Но такъв извод не може да се съгласува с резултатите от първи и трети варианти. Освен това, за резултата на втория вариант, има нормално детерминистично обяснение тъй като, когато сработи PC1, то поредните ЕМВ (фотони) с фазова задръжка достигат до D1 и D2, без за това да е необходимо време, т.е. разстоянието L, както и закономерностите на L/C не участват (в случая за удобство при това теоретично разглеждане игнорираме времето  $t_c'$ ).

Да отбележим, че при разглеждания трети вариант, за времето след изключване на напрежението, най-ясно се вижда, че ефекти на мигновен КВФ и нелокалност няма и не се налага да разглеждаме. Защото, след изключване на напрежението, което е едновременно за PC1 и PC2, то тази манипулация върху интерферометъра е последната, съответно всички разгледани времена и продължителност на импулса, следват хронологично и строго детерминистично, със

задължително отчитане на константната скорост на светлината в рамената на интерферометъра по закона  $L/C$ . Съответно се вижда цялата несъстоятелност на КИ и твърдението, че фотона интерферира сам, все едно, че се намира едновременно в двете рамена на интерферометъра, каквато наивна представа се разглежда понякога, или по неизвестен начин „познава“ цялата експериментална постановка, за да отреагира и то мигновено, с промяна и на ИК. Като в случая се доказва, че мигновения КВФ и ефектите на нелокалност, нямат реално отношение към получените експериментални резултати, а са само математична представа наложена за вътрешно съгласуване на КИ. Освен това изместване на максимум, има само когато манипулираната фазова 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://www.youtube.com/channel/UCKRHTPajIyqMPUCWp\\_Ps-xA](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-корпускулярни 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, повторямост 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 разгледаните 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)