

# Experiments of interference with coincident or shifted in time laser pulses.

Lozko G. Georgiev, Daniel L. Georgiev  
e-mail: [lozko.daniel.georgiev@gmail.com](mailto:lozko.daniel.georgiev@gmail.com)  
(06 July 2019)

**Abstract.** This article explores experiments on interference with electromagnetic waves. Some of the problems of the Copenhagen interpretation of quantum mechanics are discussed. The laws of interference with symmetric and asymmetric interferometers are discussed. With a permanently emitting laser source and artificially obtained (cloned) laser pulses. Coincident or shifted in the time when they reach the viewing screen. Two possible models of interference and experimental demonstration of the working model are examined.

**Keywords:** quantum mechanics, interference, photon, coherent, wave train, laser pulses

---

## Експерименти на интерференция със съвпадащи и отместени по време лазерни импулси

Лозко Г. Георгиев, Даниел Л. Георгиев  
e-mail: [lozko.daniel.georgiev@gmail.com](mailto:lozko.daniel.georgiev@gmail.com)  
(06 July 2019)

**Резюме.** В тази статия се разглеждат експерименти на интерференция с електромагнитни вълни. Разглеждат се някои от проблемите на Копенхагенската интерпретация на Квантовата Механика. Разглеждат се закономерностите на интерференция, при симетричен и несиметричен интерферометър. При постоянно излъчващ лазерен източник и изкуствено получени (клонирани) лазерни импулси. Съвпадащи или изместени по време при достигането им до екрана на наблюдение. Разгледани са два възможни модела на интерференция и експериментално доказване на работещия модел.

**Ключови думи:** квантова механика, интерференция, фотон, кохерентност, цуг, лазерни импулси

### Съдържание

1. Увод.
  2. Копенхагенската интерпретация, проблеми и решения. 2.1 Основни проблеми на Копенхагенската интерпретация. 2.2. Интерференчна картина от два различни модела.
  3. Закономерности, свойства и задължителни условия при интерференция и модулация на интензитет с интерферометър на Mach-Zehnder. 3.1. Закономерности и условия при интерференция. 3.2. Закономерности и условия на интерферометър работещ в режим модулация на интензитет
  4. Реални експерименти при интерференция.
  5. Заключение.
- Литература

**абрeвиатура:**

КМ – квантова механика  
ЕМВ – електромагнитни вълни  
КИ – Копенхагенска интерпретация  
ВФ – вълнова функция  
КВФ – колапс на вълновата функция  
ИК – интерференчна картина  
МВФ – модел на вълновата функция  
МВ – модел на влияние  
PWM – широчинно импулсна модулация

## 1. Увод

Като рождена дата на квантовата механика (КМ) е приета 1900 година, когато М. Планк за да разреши проблема на така наречената ултравиолетова катастрофа разглежда излъчването на светлината като самостоятелни кванти с дискретна порция енергия. Той въвежда константата  $h$  и съответно енергията на всеки светлинен квант е пропорционална на честотата на електромагнитните вълни (ЕМВ),

$$E = h \nu \quad (1)$$

където  $E$  е енергията на фотона,  $\nu$  е честотата на ЕМВ, а  $h$  константа на Планк. По-късно светлинния квант е наречен фотон. През 1905г. А. Айнщайн доказва, че не само излъчването, но и взаимодействието на светлината става с дискретни порции енергия при външния фотоефект. Като енергията на всеки дискретен фотон, може да избие фотоелектрон само, ако енергията на фотона превишава така наречената червена граница. Следващите експерименти, на Коптан (A. Holly Compton), Боте (W. Georg Bothe) и др. еднозначно доказват, че фотона е неделим квант с енергия  $E = h \cdot \nu$  без маса в покой.

Но при така създамата се ситуация, неделим и електронеутрален фотон с точно определена енергия, се получава несъгласуване с вълновите представи на ЕМВ като дифракция и интерференция, които са били приети до началото на 20-ти век. За да се излезе от това положение една част от физиците, така наречената Копенхагенска интерпретация (КИ) и гравитиращите около нея, приемат вероятностния модел и дуалността на фотона със свойствата и на вълна и на частица. Но това води до нови проблеми за изискващите се свойства, колапс на фотона, над светлинни скорости, нелокалност, тайнствено „знание“ на един фотон за цялата експериментална постановка при образуване на дифракционна или интерференчна картина (ИК). Докато друга част от физиците, на основа разходимостите които следват от КИ, разглеждат вероятностния модел като непълен, което е резюмирано с така известното изречение на А. Айнщайн „Бог не играе на зарове“, по време на така известните Солвейски конгреси.

## 2. Копенхагенската интерпретация, проблеми и решения

Обобщена картина на КМ съгласно КИ дава М. Дирак, още с първите си работи през 30-те години на миналия век. В следствие в преиздадената и допълнена [1], той описва интерференцията на фотони със свойства и закономерности които трябва да са в сила при вярна и работеща КИ. Цялата същност на КИ и изискващите се свойства за интерференция, описана от Дирак, може да се види в цитирания по-долу абзац, който за удобство на коментарите сме разделили на две части.

## 2.1. Основни проблеми на Копенхагенската интерпретация

В [1] § 3. Интерференция на фотони, Дирак пише:

*„Да предположим, че имаме светлинен сноп, състоящ се от голям брой фотони, който се разделя на два компонента с еднакъв интензитет. Ако приемем, че интензитетът на снопа е свързан с вероятния брой фотони, ще получим, че половината от общия брой фотони ще попадне във всеки от компонентите. Ако по-нататък тези два компонента интерферират, тогава трябва да изискваме фотон от един компонент да взаимодейства с фотон в другия компонент. Понякога тези два фотона ще бъдат унищожени, понякога те ще се превърнат в четири фотона. Това би противоречало на закона за запазване на енергията.“*

В случая Дирак прави грешен извод, защото при реални експерименти на интерференция при ЕМВ не се наблюдава унищожение на фотон, а има преразпределение на фотоните от двата снопа, водещо до интерференчни ивици. Такова унищожение, наричано и гасене на вълни (деструктивна интерференция), има само при механични вълни примерно водни вълни, където вълна преминала през двоен процепа в точка където двете части са в противофаза се гасят, а там където са във фаза (суперпозиция) се сумират, но и в случая закона за запазване на енергията не се нарушава. Докато при ЕМВ няма гасене, а преразпределение на фотони от двата снопа така, че всички фотони попадат върху екрана, т.е. цялата енергия попада върху екрана и съответно наблюдаваме ИК без да се нарушава закона за запазване на енергията.

От което се налага да направим следния извод. Интерференцията на механични вълни и интерференцията на ЕМВ са различни процеси, въпреки някои общи визуални картини които се наблюдават върху екрана (брега). Автоматично прехвърляне на закономерности и модели със съответния математичен апарат от механични към ЕМВ не винаги е оправдано, а в определени случаи е грешно.

*„Новата теория, която свързва вълновата функция с вероятностите за един фотон, преодолява тази трудност, като приема, че всеки фотон е частично във всеки от двата компонента. Тогава всеки фотон интерферира само със себе си. Интерференция между два различни фотона никога не възниква. Горепосочената връзка между частици и вълни се отнася не само до светлината, но и според съвременната теория има универсален характер.“*

Разглежданата от Дирак и КИ дуалност на фотона със свойствата и на вълна и на частица, решава един проблем, но за сметка на това създава много други като:

1. И до сега няма физична яснота по това, какво е вълнова функция (ВФ) и съответно колапс на вълновата функция (КВФ), наричан още и редукция на вълновата функция. В [2] Клышко Д. Н. относно формализма на КМ пише:

*„За съжаление, ефективността на формализма се сблъсква с непреодолими до сега трудности за своята интерпретация. В случая, до сега не е образувана единна представа на смисъла на понятието вълнова функция (ВФ). Аналогична неопределеност съществува и за друго важно понятие – редукция ВФ.“*

В [9] Глава 2, Sudbery А. относно вероятностите на КМ пише:

*„Забележки за вероятностите. Понеже термина вероятност играе фундаментална роля в квантовата механика, може да ви изглежда удивително, че ние предполагахме, че читателя е запознат с него, и не даваме строго определение на този термин. Работата е в това, че пълно непротиворечиво определение на термина вероятност не може да се даде.“*

В [9] § 5.5. Интерпретации на квантовата механика, пише:

*„Девет Интерпретации на квантовата механика. Интерпретациите на КМ – това по същество е отговор на въпроса <<Какво е това вектор на състоянията?>>*

*Интерпретациите не могат да се различат по чисто научни съображения – те не водят до различни експериментални следствия;*

*Нито една от интерпретациите не е общоприета“*

2. Освен това, колапса на фотона трябва да става със скорост по-голяма от скоростта на светлината, по точно казано изискването е колапса на така разглеждания „разлят“ по цялата експериментална постановка фотон (намиращ се едновременно в двете рамена), да е мигновен процес (така разглежданите експериментите с отложен избор). В случая проблема се състои в следното. Ако приемем, че ВФ е само математичен апарат без физична реалност, то такъв математичен апарат с колкото и красиви формули да е описан, както се изразяват някои автори поддържащи КИ или гравитиращи около нея, няма силата да накара така разглеждания „разлят“ фотон да колапсира мигновено, както се изисква съгласно КИ. Ако приемем, че ВФ е физична реалност то такава физична реалност на ВФ се нуждае от реален преносител. Но такъв реален преносител просто няма и явно влиза в противоречие със СТО на А. Айнщайн за крайната скорост на светлината. (Всъщност никоя от познатите ни четири сили, взаимодействия: гравитационни, електромагнитни, електрослаби и ядрени не превишават скоростта на светлината, като тука е и основния проблем за ВФ и КВФ и съответните изисквания за нелокалност, т.е. за колапса на фотона е нужен преносител с мигновено действие, а такъв преносител няма.)

3. Съществуват експерименти когато при намален интензитет на фотоните, наблюдаваните картини на интерференцията и дифракция силно се влошават и изчезват когато се достигне до режим единични фотони. Такива експерименти са разгледани в [3], като освен авторския експеримент на Верховин, са разгледани и предшествващи по въпроса, а и някои от така наречените „по-забравени“ експерименти, като автора прави следния извод:

*„Експериментите на светлинни снопове със слаб интензитет показват, че за разлика от електроните, дифракцията на фотоните е колективен ефект, възникващи при прехода на колектива от огромно число фотони на ЕМВ. Затова да се преписват вълнови свойства на отделен фотон, възможно, няма смисъл.“*

4. Твърдението на Дирак за универсалност на новата теория за всички вълнови процеси, не се съгласува с наблюдаваните експерименти. Както беше разгледано по-горе, интерференция на механични вълни и ЕМВ са различни процеси с различни закономерности. Оказва се, че интерференция на електрони (частици с маса в покой) и интерференция на ЕМВ, са също различни процеси с различни закономерности, въпреки наблюдаваните в някои случаи визуално еднакви картини. Демьянов [4] извършва серия от експерименти на дифракция и интерференция на ЕМВ и електронни. Извършвани на една и съща експериментална постановка, едновременно и за ЕМВ и за електрони. Стандартната картина на дифракция и интерференция при ЕМВ която се наблюдава е съвсем различна от тази наблюдавана за електроните. Съществува температурна зависимост на прикриващата преграда (процепа) върху преминаващите електрони и липсва температурна зависимост за фотоните и т.н. Автора пише:

*„Получените данни показват, че приликите между поведението на електроните и ЕМВ са преувеличени. Целта на тази работа е да се изясни мащаба на това преувеличение.“*

Всъщност, различията между електрони и ЕМВ няма как да не съществуват. Фотоните, та били те единични или множество, са електронеутрални. Докато електроните са заредени частици и всеки електрон преминал до края на преграда, процепа или в кристална решетка, ще взаимодейства с електроните на материалната среда, тъй като Кулоновите сили не могат да се изключат по никакъв начин.

Да отбележим, че разглежданата от Дьо Бройл частица с маса в покой, като вълнов процес в началото на миналия век, решава проблема на ускорително движещия се електрон в атомна система и съответно липсващото излъчване на ускорения електрон. Но през 1965г. Дьо Бройл в [15] пише следното:

*„Съвременният начин на интерпретиране на квантовата механика не съвпада със замисъла на основната ми идея. Както вече споменах, тогава мислех, че има истинско съществуване на*

вълна и корпускула, тясно свързани помежду си, като вълната и частицата са физични реалности, дефинирани по обикновения начин“

„Излагайки идеите на копенхагенската школа, аз самият съм възпроизвеждал някои от тези твърдения, но днес моите продължителни разсъждения върху тази тема ме карат да мисля, че те са били погрешни.“

Факта, че закономерностите на интерференция и дифракция при ЕМВ са различни от закономерностите на механичните вълни и частици с маса, налага разглеждането на закономерностите на интерференция и дифракция при ЕМВ самостоятелно, като в тази статия ще разгледаме само свойствата и закономерностите на ЕМВ.

5. Твърдението на Дирак, че интерференция между два фотона никога не възниква е основен въпрос, който се разглежда в тази статия, затова ще разгледаме това твърдение по-подробно. В Нобеловата си лекция 2005г. Р. Дж. Глаубер [5] пише:

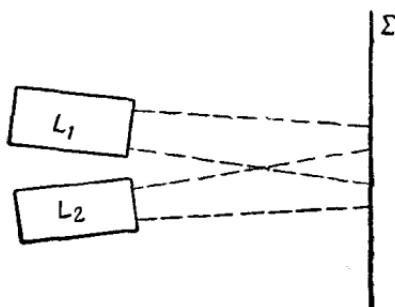
„Очевидно, Hanbury Brown и Twiss искали да проверят това твърдение и по този повод; те провели експеримент (Hanbury Brown and Twiss, 1956, 1957a, 1957b), за да определят наистина ли двойка фотони могат да интерферират.“

В [6] стр. 55 Глаубер пише:

„Да напомним, че интерферометъра на Hanbury Brown и Twiss регистрират падащата светлина на два различни приемника. Следователно, фотоните трябва да участват в интерференционния ефект по двойки, т.е. сигнала на изхода възниква само тогава, когато различни фотони попадат на всеки от двата детектора примерно в едно и също време. Именно тука възниква сериозна дилема: следва ли да се счита за правило твърдението на Дирак за това, че << интерференция между два различни фотона никога не се получава.>>“

В [6] Лекция 16, Интерференция от независими светлинни снопове. Глаубер разглежда експеримент, с който може да бъде решен въпроса за интерференция между фотоните от два независими лазера Фиг. 1. където пише:

„Елементарен тип на експерименталното устройства е показано на Фиг.17. Два независими лазерни източника (или, могат да бъдат източници от друг тип) L1 и L2 проектират своите снопове в направление близки до паралелност, но леко под ъгъл. Сноповете попадат на екрана  $\Sigma$  като площадките им се прекриват. Ако светлинния интензитет е достатъчно мощен или е възможна регистрация за продължителен период то може да се използва като детектор фотоплака в плоскостта на  $\Sigma$ . Ако условията не са благоприятни за фотография, то може да се използва мозайка от фото детектори в плоскостта на  $\Sigma$ . Във всички случаи в областите на припокриване на сноповете ще се наблюдават интерференчни ивици.“



Ф и г. 17

Фиг. 1. Експеримента на Roy J. Glauber от литература [6] - Фиг.17. Два независими лазерни източника L1 и L2, сключват малък ъгъл помежду си и проектират своите снопове в направление към екрана  $\Sigma$ . Сноповете попадат върху екрана като прекриват общи площадки на които се наблюдава интерференчна картина.

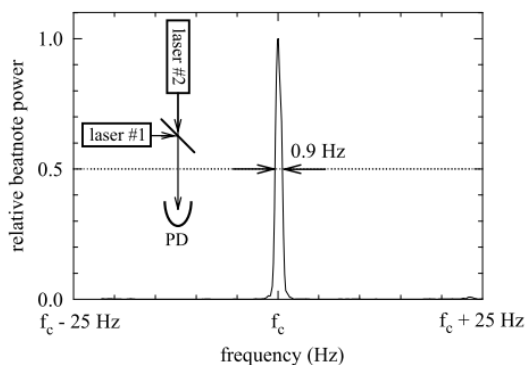
За съжаление предложения от Глаубер експеримент, не се анализира и извършва като цяло, а като неудобен за КИ се замита под килима, дори и съвременни автори, които разглеждат повдигнатия казус се ограничават само до това, да повторят техническите трудности които автора показва в [6]. През 60-те години на миналия век е нямало лазери с достатъчна времева кохерентност, което е основна техническа трудност за реализация на експеримента, но със съвременните лазери това вече не е проблем. Създаден през 1999 г. лазер [7] излъчва във видимия спектър с дължина на вълната  $\lambda = 563 \text{ nm}$ . Лазера, виж Фиг. 2, има ширина на спектъра на излъчване  $\Delta\nu = 0.9 \text{ Hz}$ . Така, че всеки цуг има съответно време на кохерентност  $\tau$ ,

$$\tau = 1 / \Delta\nu. \quad (2)$$

И дължина на цуга  $l$ ,

$$l = c \tau, \quad (3)$$

където  $c$  е скоростта на светлината. По въпроса за  $\tau$  и  $l$  виж литература [8] (Глава 7) и [16] (Глава 4). Реално лазера [7] (или [11] излъчващ в инфрачервения спектър), има времева кохерентност по-голяма от една секунда и дължина на кохерентност по-голяма от една светлинна секунда =  $3.10^8$  метъра. (По-долу за улеснение, при разглеждането на реалните експерименти ще използваме параметрите на лазера [7] и усреднените стойности за  $\tau = 1$  секунда времева кохерентност и дължина на цуг  $l = 3.10^8$  метъра.) Така, че два снопа от два независими съвременни лазера, примерно [7], ще имат понякога (само когато двата цуга съвпадат по време), времева кохерентност от една секунда, т.е. при предложения от Глаубер експеримент може да се наблюдава ИК дори с невъоръжено око. Или да направим множество снимки на екрана с време на експозиция  $\leq 1 \text{ ms}$  (което отговаря на 1000 кадъра в секунда, каквото време на експозиция за приемственост разглеждаме по-нататък в статията), при което по-голяма част от снимките ще са с лош контраст, но някои от снимките ще са с добър контраст на ИК.



Фиг. 2. Взета от [7]. Съвременен лазер излъчващ във видимия спектър с  $\lambda = 563 \text{ nm}$  и ширина на спектъра на излъчване  $\Delta\nu = 0.9 \text{ Hz}$ . Има времева кохерентност  $\tau$  на цуг повече от една секунда. И дължина на цуг  $l$  по-голяма от  $3.10^8$  метъра.

## 2.2. Интерференчна картина от два различни модела

Да направим кратък анализ на резултатите на експеримента разглеждан от Глаубер [6] Фиг.1 и Дирак (цитата по-горе от [1]), където разглеждат аналогична експериментална постановка. За да наблюдаваме (снимаем) върху екрана ИК и при двамата имаме еднакви условия за интерференция като: два снопа с равен брой фотони (еднакъв интензитет, доколкото това е възможно технологично), еднаква поляризация между двата снопа, кохерентност между двата снопа (при Глаубер тази кохерентност е случаен процес и за ограничено време) и задължително пресичане на двата снопа в пространството под малък ъгъл преди да попаднат върху екрана Фиг. 1. Ако не изпълним условието за пресичане на двата снопа в пространството, то няма да



наблюдаваме ИК, а върху екрана ще наблюдаваме Гаусово разпределение (за лазерен източник при сноп с напречен размер много по-голям от  $\lambda$ ).

Съгласно Дирак и КИ, фотона сам интерферира, защото при разделянето на основния сноп на два снопа с равни интензитети (примерно с полупрозрачно огледало), всеки фотон „придобива“ съответните свойства изисквани от ВФ, неопределеност на пътя и т.н., т.е. осигурени са всички условия (постулирани от КИ) за интерференция и наблюдаваме ИК. За удобство, нека наречем представата на КИ и Дирак, като модела на вълновата функция (МВФ).

Съгласно постановката на Глаубер **Фиг. 1**, двата лазера са независими и необвързани по никакъв начин, т.е. в случая няма условия за фотона (или множество фотони) независимо от кой лазер да „придобива“ съответните свойства изисквани от МВФ, но въпреки това наблюдаваме ИК (когато е изпълнено условието, временна кохерентност между сноповете). От изброените по-горе условия и при Дирак и при Глаубер водещи до краен резултат ИК, имаме задължителното условие пресичане на двата снопа в пространството под малък ъгъл. От което следва, че при това задължително пресичане на двата снопа, съществува възможността фотоните от единия сноп да влияят на фотоните от втория сноп така, че да получим крайния резултат ИК. За удобство, нека наречем представата за такова влияние между фотоните от двата снопа, като модела на влияние (МВ). Основна цел в тази статия е експерименталното доказване на МВ.

Предимството на МВ спрямо МВФ е, че преразпределението на фотоните със съответния краен резултат ИК, става в пространството където двата снопа се пресичат, т.е. влиянието има локален характер. Като по този начин, всички така да се изразим мистични свойства изисквани от КИ за получаване на ИК, като: „разлят“ в двата снопа фотон, мигновен колапс на фотона и съответните нелокалност, неопределеност на пътя на фотона и т.н. отпадат. Всъщност експеримента на Глаубер въпреки технологичните проблеми явно доказва МВ. (В случая се налага да направим уточнение: въпреки, че предложения от Глаубер в [6] експеримент доказва МВ, то обяснението и разглеждания от Глаубер резултат не е на основа влияние помежду сноповете съгласно МВ, а като основа се използва и разглежда времева корелация помежду фотоните, за нелазерна светлина. Която корелация със съответните свойства, търпи развитие за самия автор за лазерна светлина, както пише по-късно в [5].) Основната идея за решение на проблемите в КИ в тази статия е да се разгледа и извърши експеримент, където да имаме изискващите се условия за интерференция със съответния краен резултат ИК и за двата модела (и за МВФ и за МВ), но да се наблюдава ИК само при определени случаи даваща еднозначно доказателство кой от модела работи. Като при това контраста, видимостта -  $V$  на ИК да е максимално добра, което лесно може да се постигне със съвременен лазер.

Накратко за физичната същност на така нареченото влияние. Ако квантуваме физическия вакуум (пространството), то вакуума ще е изграден от най-малките клетки с размер съизмерим или по-малък от  $10^{-35}$  м, които за удобство можем да наречем планкеон на името на Планк. Всеки дискретен фотон пренася енергия и импулс с определен вектор, като образно казано фотона „прескача“ от планкеон на планкеон и „възбужда“ всеки планкеон през който е преминал така, че в случая не се изисква фотона да има размер, маса и може да съществува само в движение. Но освен надлъжен импулс (отговорен за т.н. праволинейно, стандартно „движение“ на фотоните-светлината във вакуума), всеки „възбуден“ планкеон като ответна реакция от „преминаващия“ фотон, създава във вакуума локална временна флукуация, кривини в пространството на разстояния по-малки от дължината на вълната. Които кривини в пространството, са отговорни за така нареченото влияние между фотоните, в собствения си сноп (при дифракция), а също влияние на фотоните от един сноп върху фотоните от втори сноп (при интерференция и осигурено условие на пресичане на двата снопа). Самата същност на влиянието е сложна, обемиста за разглеждане при пълен анализ на всички частни случаи за интерференция и дифракция и не е цел в тази статия. И в случая ще се ограничим само до експериментално доказване на ефектите от влиянието помежду два пресичащи се лазерни снопа или импулси.

### 3. Закономерности, свойства и задължителни условия при интерференция и модулация на интензитет с интерферометър на Mach-Zehnder

В тази точка ще разгледаме накратко основните свойства, уредите и задължителни условия при интерференция и модулация на интензитета, необходими за конкретно разглеждани експерименти в следващите точки.

Обикновено разглеждаме така наречените светлинен сноп състоящ се от фотони и ЕМВ, като за улеснение приемаме, че ЕМВ вълни са с плосък фронт и снопа има реален напречен размер много по-голям от  $\lambda$ . Под представата ЕМВ, разбираме периодично излъчвани и разпространяващи се във вакуума фотони, неделими и електронеутрални, със зададен вектор и поляризация. Примерно постоянно излъчващ идеализиран едномонов лазер с мощност 1W, дължина на вълната  $\lambda = 500 \text{ nm}$  и честота  $\nu = 6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ , излъчва фотони с енергия  $E_f = 2,481 \text{ eV}$ , съгласно (1). За единица време лазера ще излъчи  $\approx 2,515 \cdot 10^{18}$  фотона. Като във всяко едно периодично излъчване на ЕМВ се излъчват по  $\approx 4192$  фотона. В случая трябва да се отчита, че фотоните задължително трябва да бъдат цяло число, както и че, при реалните лазери има известна минимална флукуация на броя фотони. Под интензитет трябва да разбираме броя фотони, излъчени или детектирани за единица време или за времето на едно периодично излъчване на лазера, всяка друга представа за интензитета в определени случаи може да се окаже грешна. (За удобство и по-нататък ще пресмятаме и ползваме стойностите за  $\lambda = 500 \text{ nm}$ , тъй като и реалния лазер [7] излъчва също във видимия спектър  $\lambda = 563 \text{ nm}$ .)

#### 3.1. Закономерности и условия при интерференция

За наблюдаване на ИК на ЕМВ се използва интерферометрична система, която обикновено включва източник на ЕМВ, интерферометър и екран. Когато се нуждаем от пълен количествен анализ или ИК се реализира за кратко време, екрана можем да заменим с фото плака или CCD камера, като по този начин можем да запамятаваме, снимаем ИК, за по-късно сравняване, измерване и анализи към ново получени ИК, като използваме стандартна техника [17, 18, 19].

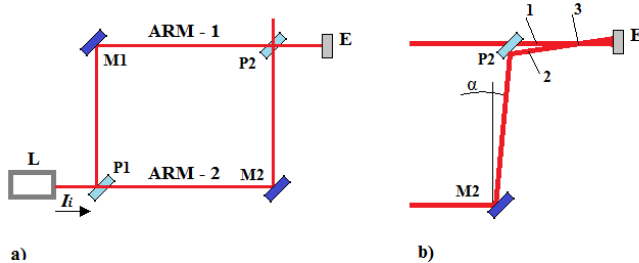
От различните видове интерферометри които съществуват, най-подходящ е интерферометъра на Mach-Zehnder, който има следните предимства: Може да работи в режим на интерферометър или в режим модулация на интензитет (оптичен превключвател), има два изхода, двете рамена могат да бъдат разделени на разстояния без ограничения, не формира отразени вълни към източника. (Последното предимство е особено важно, при работа с единични фотони или импулси, където отразените ЕМВ (фотони) не се отчитат правилно при експерименти на времева корелация между фотоните и в някои случаи се тълкуват като доказателство за верността на КИ.) Интерферометъра на Mach-Zehnder може да бъде конфигуриран по различни начини в зависимост от изискването за конкретна експерименталната постановка [8, 12].

На Фиг. 3.1. а) е показан симетричен интерферометър на Mach-Zehnder. Лазера-L излъчва ЕМВ с интензитет  $I_i$  към полупрозрачно огледало P1, което дели лазерния сноп по интензитет. Интерферометъра има равни рамената ARM-1 = ARM-2, огледалата M1 и M2 са отразяващи. Огледало P2 е също полупрозрачно и дели интензитета към два изхода, в случая използваме само хоризонталния по чертежа. Съответно върху екрана – E имаме специфичното разпределение на фотоните, т.е. ИК със съответните закономерности на интерференчни максимуми и минимуми (виж Фиг. 3.2. b) долу двете снимки от [13]).

Задължителни изисквания за наблюдаване на ИК, т.е. интерферометър да работи като интерферометър е двата лазерни снопа да сключват малък ъгъл преди да достигнат до екрана – E, в [8] (Глава 7) са разгледани различни конфигурации за постигане на нужния ъгъл. На Фиг. 3.1. b) е показан така наречения задължителен малък ъгъл -  $\alpha$  между огледала M1 и M2 за работа



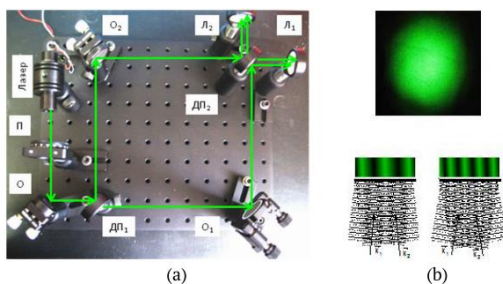
като интерферометър, за нагледност ъгъла -  $\alpha$  е увеличен. Известно е, че контрастна ИК се получава само при пресичане в пространството на два кохерентни лазерни снопа с равен интензитет и еднаква поляризация. Това условие е постигнато в точка-3 **Фиг. 3.1. b)**, където става преразпределението на фотоните и те достигат до екрана като ИК. Ако поставим в двете рамена



**Фиг. 3.1.** Симетричен интерферометър на Mach – Zehnder. а) Принципна схема на интерферометъра. б) Задължителен малък ъгъл- $\alpha$  между огледала M1 и M2, за нагледност ъгъла- $\alpha$  е увеличен. С цифри -1 и -2 са показани точки от лазерните снопове. С цифра -3 е показана точка-3 където става пресичането и преразпределение на фотоните.

на интерферометъра, примерно в точка-1 и точка-2, които са преди точка-3, по едно полупрозрачно огледало и насочим отразените снопове към втори екран. (Втория екран с цел да не усложняваме не е показан на чертежа.) Като, всеки от отразените снопове сам няма да дава ИК и съответно, ако за тези два снопа осигурим пресичане ще наблюдаваме ИК. Но, ако разположим едно полупрозрачно огледало след точка-3 и насочим отразения снопа към втори екран, то ще наблюдаваме ИК. Следователно, преразпределението на фотоните със съответния краен резултат ИК, се извършва в пространството на така показаната точка-3 от **Фиг. 3.1. b)**. (Доказване на преразпределението на фотоните в точка-3, което е следствие от влиянието между двата снопа или импулси, се разглежда в 4-та точка.) Така разглежданата точка-3 не трябва да се разглежда като математическа представа, тъй като тя има съвсем реални размери определени от напречния размер на лазерните снопове, ъгъла на пресичане на сноповете и параметрите за конкретна експериментална постановка.

Ако закрием един от сноповете (примерно в точка-1) с непрозрачен екран, т.е. не осигурим условието за пресичане на ЕМВ и до екрана - E достига само единия от сноповете, то ИК няма да се наблюдава, а ще наблюдаваме стандартно Гаусово разпределение на фотоните. Същото Гаусово разпределение на фотоните (т.н. нулева ивица), ще има, когато двата лазерни снопа са успоредни и в случая интерферометъра работи в режим модулация на интензитета. На **Фиг. 3.2. (b)** от [13] снимката горе показва такова разпределение, а долу двете снимки са на ИК за два различни ъгъла на пресичане на сноповете със съответните различни разстояния между максимумите.



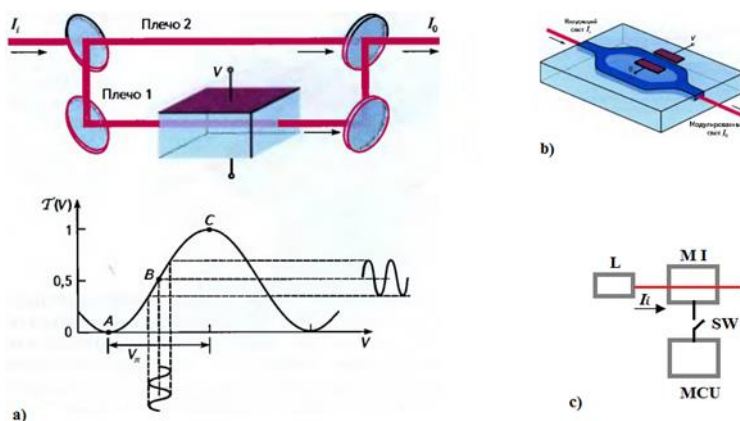
**Фиг. 3.** (а) Снимка на интерферометъра на Мах-Цендер: лазер; поляризатор - П; огледала - О, О<sub>1</sub>, О<sub>2</sub>; делителни пластинки - ДП<sub>1</sub> и <sub>2</sub>; лещи - Л<sub>1</sub> и Л<sub>2</sub>; (б) Горе - нулева ивица, съответстваща на равни оптични пътища в двете рамена на интерферометъра (проекциите на огледалата О<sub>1</sub> и О<sub>2</sub> на една линия са успоредни). Долю - с внасяне на малък ъгъл между О<sub>1</sub> и О<sub>2</sub> се появяват интерференчни ивици, чиято ширина намалява с увеличаване на ъгъла.

**Фиг.3.2.** Фигурата е взета от литература [13]. (а) Снимка на реален интерферометър на Mach – Zehnder. (б) Горе - нулева ивица, Гаусово разпределение на фотоните при режим модулация на интензитета (успоредни снопове). Долю - две интерференчни картини за два различни ъгъла на пресичане между сноповете, при работа в режим интерферометър.

### 3.2. Закономерности и условия при интерферометър работещ в режим модулация на интензитет

Ако е изпълнено условието двата снопа да са успоредни, то интерферометъра на Mach–Zehnder работи в режим модулация на интензитета. На Фиг. 3.3. а) (горе) е показан интерферометъра на Mach–Zehnder с успоредни снопове работещ в режим модулация на интензитета, в случая вертикалния изход не е показан на чертежа. Ако ЕМВ от двата снопа достигат до второто полупрозрачно огледало с еднаква фаза, то на двата изхода на интерферометъра ще има равен интензитет. Но, ако по някакъв начин променим фазата на единия сноп (променим оптичния път), интензитета примерно на хоризонталния изход ще се повиши и съответно със същата стойност интензитета на вертикалния изход ще намалее. Като при зададена фазова разлика целия интензитет от двете рамена ще получим само на единия изход, т.е. в случая интерферометъра на Mach–Zehnder работи в режим модулация на интензитета като оптичен превключвател. Промяна на фазата между двата снопа, може да стане с плавно удължаване или скъсяване на едно от рамената с помощта на микрометричен винт, който начин е подходящ за първоначална настройка, но процес е механичен и промяната на фаза е сравнително бавна. За бърза промяна на фазата може да се използва ефекта на Кер или Покелс [14] (Глава 20). На Фиг. 3.3. а) (горе) е показано интерферометъра на Mach–Zehnder работещ в режим модулация на интензитета, наричан още оптичен превключвател, в едното рамо на който е поставена клетка на Покелс. На Фиг. 3.3. а) (долу) графично е показано влиянето на приложеното напрежение върху фазовата разлика на снопа, съответно коефициента на пропускане на прибора за определен изход е функция на приложеното напрежение. На Фиг. 3.3. б) е показан интегрално – оптически модулатор на интензитета, който може да работи с честота над 25 Ghz. Фиг. 3.3. а) и б) са взети от [14].

На Фиг. 3.3. с) е показана блокова схема комбинация от: лазера – L, модулатор на интензитета работещ като оптичен превключвател – MI и микроконтролер – MCU управляващ MI чрез приложено напрежение. Предимствата на MCU е, че можем да задаваме времена и периодичност на импулси по така известния принцип в електрониката широчинно импулсна модулация (PWM). Когато ключа SW е изключен, то на изхода на MI имаме непрекъснат лазерен сноп, а когато ключа SW е включен имаме импулси с параметри задавани от MCU. Тази блокова схема Фиг. 3.3. с) с която можем да получим непрекъснат лазерен сноп или нужните ни импулси ще използваме във всички разглежданите по долу експерименти.



Фиг. 3.3. а) Горѐ – принцип на работа на интерферометър на Mach–Zehnder като модулатор на интензитета. Долу – промяна на фазовата разлика от приложеното напрежение. б) Интегрално изпълнение. с) Блокова схема за получаване на постоянни лазерни снопове. Както и лазерни импулси чрез PWM режим, когато ключа SW включен.

## 4. Реални експерименти при интерференция

В тази точка ще разгледаме експерименти при които може да се определи еднозначно, кой от модела МВФ или МВ е верен. Основната идея е да получим лазерни импулси с времева продължителност по-малка, от времето за което светлината преминава през интерферометъра. Като при определени варианти на експериментите, лазерните импулси минаващи по всяко от рамената на интерферометъра ще достигнат едновременно до така разгледаната точка-3 [Фиг. 3.1. б](#)) и върху екрана ще имаме крайния резултат ИК, т.е. в случая, този резултат може да се обясни и от двата модела. Но, ако единия импулс закъснее и не достига до точка-3 едновременно с другия, то и условието за влияние няма да бъде изпълнено и съответно върху екрана няма да се наблюдава ИК, т.е. в случая, такъв резултат може да се обясни само с работещ МВ. За удобство и логическа последователност разглеждаме експериментите като различни варианти, като за основа използваме класическия експеримент за интерференция, който надстройваме за конкретното разглеждане в следващите варианти.

Възможността за наблюдаване на контрастна интерференчна картина основно зависи от качеството на източника на светлина (в случая лазера). За оценка на контраста или видимостта на интерференчната картина, Майкелсон (A. Michelson) въвежда параметъра  $V$  за видимост на ИК.

$$V = I_{\max} - I_{\min} / I_{\max} + I_{\min}, \quad (4)$$

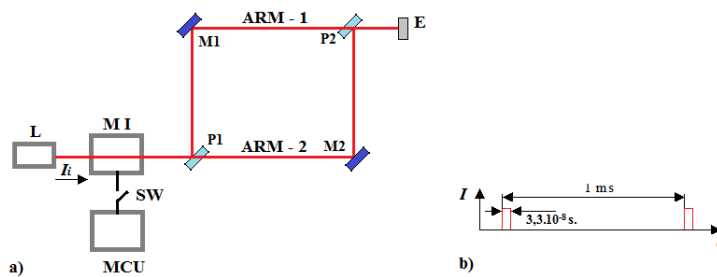
където  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  е максимална и минимална осветеност на интерференчните линии. Ако, източника е монохроматичен и имаме идеализирани качествени огледала и другите оптични пособия на интерферометъра [Фиг. 4.1. а](#)), то видимостта на ИК ще е  $V = 1$  съгласно (4). Но в случая използваме реален лазер, реални огледала и други оптични пособия така, че видимостта на ИК за симетричен интерферометър на Mach-Zehnder [Фиг. 4.1. а](#)), ще е близка, но по-малка от единица (виж [\[8\]](#) глава 10, [\[16\]](#) глава 4). Но в случая, със съвременния качествен лазер [\[7\]](#), ще имаме най-контрастната реална ИК с максимална видимост, която може да се наблюдава по принцип, която условно ще наречем и разглеждаме като  $V_{\max}$ .

В случая, тъй като по условие експериментите за различните варианти, които ще разгледаме се изпълняват на една и съща експериментална постановка (когато това е възможно), а времето за снимане - експозиция на ИК е еднакво, то имаме приемственост (пълна или частична), така че можем да използваме  $V_{\max}$  като еталон за сравняване получен (сниман) при един от вариантите на експеримента към друг вариант.

По горе, за по кратко, използваме термина наблюдение на ИК, което на практика не е съвсем коректно, тъй като, ако наблюдението се извършва с невъоръжено око, то пълна качествена и количествена оценка на две ИК които искаме да сравним, не може да се даде. Така, че под наблюдение на ИК, трябва да разбираме запаметена или казано снимана ИК, която вече по-късно можем да анализираме, сравняваме и т.н. Класическия начин да запомним разглеждана ИК е чрез фото плака, което е по-точния начин с повече предимства. Докато, съвременните CCD камери имат повече собствени шумове, нямат 100% успеваемост да детектират фотон, пикселите имат големи размери спрямо молекулите при фотографията. Но въпреки тези недостатъци, CCD камерите могат да се използват когато не се нуждаем от пълен количествен анализ на изследваните ИК, защото с тях се работи много по лесно, не са нужни консумативи, лесно се синхронизират и обработват по цифров начин [\[18, 19\]](#).

**Вариант-4.1.** На [Фиг. 4.1. а](#)) е показана експериментална постановка на симетричен интерферометър на Mach-Zehnder с възможност за PWM режим. При вариант-4.1 ключа SW не е включен и на входа на интерферометъра имаме постоянно постъпващ лазерен сноп, което по принцип е така да се каже стандартна работа на интерферометър. Интерферометъра има равни рамена ARM-1=ARM-2. Съответно върху екрана ще наблюдаваме ИК с видимост  $V_{\max}$ . По условие за да можем да сравним видимостта  $V$  на ИК към другите варианти снимаме ИК.

Друг ефект, който може да се наблюдава е изместване на максимум на ИК, спрямо предварително зададен маркер върху екрана при промяна фазата на ЕМВ на единия сноп. Кое то се състои в следното, ако променим плавно дължината примерно на рамо ARM-2 (оптичният път в рамото) на интерферометъра с разстояние равно на  $\lambda / 2$ . (Която промяна може да се извърши с микрометричен винт, въведен още от Майкелсон, не показан върху фигурата). То максимум от ИК, намиращ се върху определен маркер върху екрана ще се измести от маркера, а на неговото място ще се наблюдава минимум от ИК. Ефекта на изместване местоположението на максимум, ще следим и в следващите разглеждани варианти, тъй като фазовата разлика е фундаментална закономерност влияеща на ИК и задължително трябва винаги да се изпълнява съгласно МВФ, докато съгласно МВ изместване ще има само при определени варианти.



Фиг. 4.1. а) Симетричен интерферометър на Mach-Zehnder с възможност за работа в PWM режим. б) Време диаграма на лазерните импулси при включен ключ SW. Продължителност на импулса  $3,333 \cdot 10^{-8}$  s и периодичност на импулсите 1ms.

**Вариант-4.2.** И при този вариант на експеримента използваме същия симетричен интерферометър на Mach-Zehnder (Фиг. 4.1. а), но в този вариант ключа SW е включен. В случая, от MCU постъпват правоъгълни електрически импулси които управляват M1, т.е. M1 работи като оптичен превключвател и на изхода му имаме зададените от MCU лазерни импулси. Съответно, на входа на интерферометъра има постоянно постъпващи лазерни импулси с периодичност 1ms и времетраене на всеки импулс  $3,333 \cdot 10^{-8}$  s (Фиг. 4.1. б). Периодичността и времетраенето на лазерните импулсите са подбрани с цел да има приемственост със следващите варианти, както и да са удобни за анализ и пресмятане. Като единственото условие е времетраенето на импулса (или импулсите при другите варианти) да е по-малко, от времето за което светлината изминава разстоянието в рамото на интерферометъра.

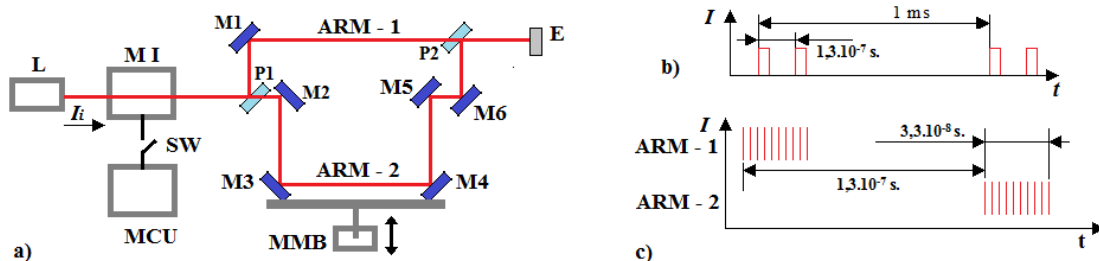
За да можем да сравним видимостта  $V$  на ИК към другите варианти, по условие снимаем ИК синхронизирано по PWM импулса с периодичност 1ms (1000 кадъра за секунда) и време на експониране  $t \leq 1$ ms. По този начин на синхронизация, на всяка снимка на ИК за времето на експозиция ще се заснеме само един от периодичните импулси от (Фиг. 4.1. б).

Това, че до екрана пристигат импулси, вместо постоянно излъчване от лазера не променя нищо и съответно видимостта на ИК е  $V_{max}$ . Ако променим дължината на рамо ARM-2 с  $\lambda/2$ , то максимума ще се измести.

**Вариант-4.3.** На (Фиг. 4.2. а) е показан несиметричен интерферометър на Mach-Zehnder, с възможност за работа с PWM режим. За разглеждания случай, а и с цел приемственост за всички варианти е подбрана несиметричност, като рамо ARM-1 има дължина 90 метра, а рамо ARM-2 е дълго 130 метра. На (Фиг. 4.2. а) е показан така наречения микрометричен винт-ММВ, с който можем да променяме дължината на рамо ARM-2 с  $\lambda/2$ , като изместваме едновременно отразяващите огледала M3 и M4, които са закрепени заедно на отделна стойка от останалата част на интерферометъра. Огледала M2, M5 и M6 са отразяващи и чрез тях постигаме нужната несиметричност, а останалите огледала са аналогични на предните варианти. (За удобство можем да си представим, че на един симетричен интерферометър, като увеличим ARM-2 чрез ММВ ще го превърнем в несиметричен. Такова удължаване на практика не е удачно, заради голямата несиметричност  $ARM-2 - ARM-1 = 40$  метра и в случая разглеждаме само логическата

свързаност на така разглежданите симетричен и несиметричен интерферометри.) Освен несиметричност на рамената, останалите параметри на експерименталната постановка са еднакви с досега разглежданите варианти.

Да разгледаме вариант-4.3 при, който ключа SW е изключен. Видимостта на ИК вследствие, че  $ARM-1 \neq ARM-2$  ще е по-лоша от  $V_{max}$ , която приехме за основа. Ако отбележим видимостта при несиметричния интерферометър с  $V_{nes}$ , то  $V_{max} > V_{nes}$ . И в случая с приближение можем да определим стойността на  $V_{nes}$ , като отношение на дължината на несиметричност на интерферометъра от 40м, към дължина на цуга  $l$  (2), (3) на лазера [7] и разминаване по-време на началата на два поредни цуга достигащи до екрана, вследствие на тази несиметричност. В литературата [8] глава 10, [16] глава 4 са разглеждани основните закономерности за видимост  $V$  на ИК при квази монохроматични източници и несиметричност на рамената, което е сложен процес, а и за случая не се нуждаем от пълно разглеждане. В случая ще се ограничим само до  $V_{max} > V_{nes}$  и възможността да сравняваме резултатите на снимка на ИК за вариант-4.3 към другите варианти които сме снимали. Съответно, ако променим дължината на ARM-2 на интерферометъра Фиг. 4.2. а) посредством ММВ с  $\lambda/2$ , то максимума ще се измести.



Фиг.4.2. а) Несиметричен интерферометър на Mach-Zehnder с възможност за PWM режим. б) Време диаграма с включен ключ SW. На изхода на интерферометъра двойка (клонирани) лазерни импулси с периодичност 1ms и закъснение между импулсите от  $1,333 \cdot 10^{-7}$  s . в) Графично показана една двойка „клонирани“ лазерни импулси на ЕМВ (вертикалните линии като плоски ЕМВ), преминали по-късо рамо АРМ-1 и дълго рамо АРМ-2. Като всеки от импулсите има времетраене  $3,333 \cdot 10^{-8}$  s и време на закъснение между двата импулса от  $1,333 \cdot 10^{-7}$  s.

**Вариант-4.4.** При вариант-4.4 използваме същия несиметричен интерферометър на Mach-Zehnder Фиг. 4.2. а), но с включен ключ SW. На входа на интерферометъра има постоянно постъпващи лазерни импулси с периодичност 1ms и времетраене на всеки импулс  $3,333 \cdot 10^{-8}$  s (както при вариант-4.2). Полупрозрачното огледало P1 дели интензитета (броя фотони) по равно и за двата снопа, минаващи по двете рамена на интерферометъра. Но вследствие на несиметричност от 40 м, всеки от лазерните импулси достига до екрана по различно време (съответно преминава през така разглежданата точк -3 виж Фиг. 3.1. б) по различно време), т.е. импулса преминал по ARM-2 ще закъснее спрямо импулса преминал по ARM-1 с  $1,333 \cdot 10^{-7}$  s, както нагледно е показано на Фиг. 4.2. б), в). Което може лесно да се докаже, като поставим допълнително (не показани на чертежа), по едно полупрозрачно огледало във всяко от рамената на интерферометъра, за да не нарушим равенството на интензитета на двата снопа достигащи до екрана. Съответно, отразените от допълнителните полупрозрачни огледала импулси и времето на закъснение, измерваме с фото детектори и осцилоскоп, като използваме за синхронизация импулси от PWM. Така, че на изхода на интерферометъра имаме два условно наречени „клонирани“ лазерни импулса, отместени по време при достигането им до екрана. При така нареченото клониране на импулси се получават два напълно еднакви като времетраене и интензитет импулси, но закъсняващи един спрямо друг при пристигането до екрана и съответно



преминаващи по различно време в така наречената точка-3 от Фиг. 3.1. б). Следователно, условието за влияние, съгласно МВ, няма да е в сила и съответно няма да наблюдаваме ИК.

В случая по удобно е да си представим динамиката и експерименталната постановка, като разглеждаме интерферометъра и лазерните импулси като разстояния в метри. Времетраене на лазерния импулс е  $3,333 \cdot 10^{-8}$  s което отговаря на 10 м дължина на импулса, ако си представим, че по някакъв начин можем да снимаме ЕМВ както графично е показано на Фиг. 4.2. с) (вертикални линии като плоски ЕМВ). Интерферометъра има несиметричност от 40 метра и съответно времето на закъснение между импулсите е  $1,3 \cdot 10^{-7}$ s, а късото рамо ARM-1 има дължина 90 метра. Следователно и двата клонирани импулса се намират едновременно в интерферометъра, което условие се изисква по принцип съгласно КИ за времево съгласуване на КВФ. По условие и при вариант-4.4, за да можем да сравним видимостта  $V$ , снимаме ИК синхронизирано по PWM импулс с периодичност 1ms и време на експониране  $t \leq 1$ ms (както при вариант-4.2).

И стигаме до основния казус, каква ще е видимостта  $V$  на ИК, която можем да запаметим, снимаме за вариант-4.4 ? При до сега разгледаните варианти, от крайните резултати където винаги имаме ИК не може да се определи кой от моделите МВ или МВФ е верен, защото в точката на пресичане (точка-3, Фиг. 3.1. б), винаги имаме едновременно съвпадащи снопове или импулси, преминали по двете рамена на интерферометъра. Но в случая вариант-4.4 вече не е така, лазерните импулси (по точно казано фотоните, ЕМВ съставлящи лазерните импулси) преминават по различно време през точка-3 и съответно няма условие за влияние между фотоните от двата снопа. Следователно, при верен МВ то ИК ще има видимост  $V=0$ , защото влияние не може да се осъществи. Съответно, ако променим дължината на ARM-2 с  $\lambda/2$ , то няма да настъпи промяна върху екрана – Е, защото максимуми липсват. Докато, ако е верен МВФ съгласно КИ и представата, че фотона интерферира сам със себе си, то ИК би трябвало да има видимост  $V_{nes}$ , т.е. еднакъв резултат с вариант-4.3.

В случая на експеримента вариант-4.4, двата модела дават различни и то напълно противоположни резултати за ИК. Съгласно МВ видимостта на ИК е  $V=0$ , докато съгласно МВФ видимостта на ИК е  $V_{nes}$ . Експеримента като логика и техническо изпълнение е елементарен и може да се проведе във всяка лаборатория по оптика, и само експеримента има силата да определи кой модел е верен.

**Вариант-4.5.** Целта на експеримента, във варианти-4.5 Фиг. 4.3 е да получим четири лазерни импулса, като два от импулсите съвпадат по време и за тях е в сила МВ. Докато другите два импулса не съвпадат по време, с двата съвпадащи, за които МВ няма да е в сила. Като и четирите лазерни импулса се намират едновременно в рамената на интерферометъра, т.е. времената на импулсите, плюс съответните закъснения помежду импулсите, да е по-малко от времето за което светлината преминава през късото рамо на Interferometry -2.

На Фиг. 4.3. а) са показани два последователно свързани несиметрични интерферометъра на Mach-Zehnder и включен ключ SW. Двата интерферометъра имат еднакви рамена и несиметричности, рамо ARM-1 е дълго 90 метра, а рамо ARM-2 е дълго 130 метра и несиметричност между рамената от 40 метъра. Първия Interferometry-1, работи в режим модулация на интензитета и настройка на фазовата разлика между сноповете, с помощта на ММВ, за 50% интензитет на двата изхода (тази настройка на интензитета използваме с цел приемственост и в случая използваме само хоризонталния изход).

**Кратко отклонение:** << Налага се малко отклонение от основното разглеждане. Освен чрез наблюдение на ИК, верността на МВ или МВФ може да се докаже, ако наблюдаваме (измерваме) промяна на интензитета между двата изхода на интерферометър на Mach-Zehnder работещ в режим като модулатор на интензитета. (За да наблюдаваме промяна на интензитета между двата изхода, трябва да използваме и вертикалния изход на Interferometry -1, който не е обозначен на чертежа Фиг. 4.3. а) . Същността на което е следната, вместо изместване на максимум, при промяна на дължината на ARM-2 с  $\lambda/2$ , ще наблюдаваме промяна на интензитета между двата



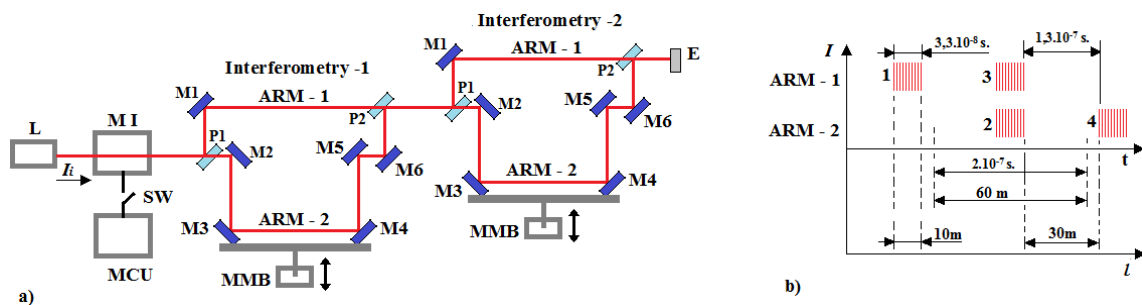
изхода на Interferometry-1. Като, когато лазерните импулси съвпадат по време (аналогично на разгледаните варианти-4.2, 4.5. а) промяна на интензитета между двата изхода ще има, а когато лазерните импулси не съвпадат по-време (аналогично на разгледаните варианти-4.4, 4.5.б) промяна на интензитета между двата изхода няма да има. За случая да отбележим, че към т.н. вертикален изход на Interferometry -1, можем да включим трети допълнителен интерферометър работещ също в режим модулация на интензитета, като по този начин ще имаме логическа приемственост на експерименталната постановка към разглеждания вариант-4.5 с четири импулса. (Да отбележим, че пълното разглеждане на вариант-4.5 за наблюдения на ИК, следва по-надолу в текста, затова е препоръчително, първо цялостно разглеждане на вариантите с интерференция, а после да се разглежда т.н. кратко отклонение относно промяната на интензитета между двата изхода, за което неудобство моля за извинение.)

Съответната промяна на интензитета между двата изхода, за Interferometry-1 или за така наречения трети допълнителен интерферометър, можем да измерваме с осцилоскоп на входовете на който има бързи фото диоди, което технологично е по-удобно отколкото снимане на ИК. По този начин, можем едновременно да наблюдаваме и ИК на изхода на Interferometry-2 [Фиг. 4.3](#) и да измерваме промяна на интензитета между двата изхода, в случай когато е поставен така наречения трети допълнителен интерферометър. Освен това, при измерване промяна на интензитета между два изхода имаме възможността да изследваме. Продължителността на конкретен цуг, промяна на фазата между два поредни цуга и процесите свързани с тази промяна, тъй като до сега, доколкото ми е известно, изследване на тези параметри експериментално няма. Но в случая се налага разглеждането на повече варианти и частните им случаи от което основната идея ще се усложни значително, затова и измерването на промяната на интензитета между двата изхода разглеждаме само информативно и накратко в тази статия.>>

Втория Interferometry -2 от [Фиг. 4.3](#), работи в режим на интерферометър и е напълно еднакъв с интерферометъра на [Фиг. 4.2. а\)](#), като в сила са съответните параметри и закономерности разглеждани за вариант-4.4. При така свързани два последователно несиметрични интерферометъра, то на изхода на Interferometry -2 ще имаме 4 клонирани импулса, както графично е показано на [Фиг. 4.3. б\)](#). Като целта на този вариант е два от клонирания импулси да съвпадат по време в точка-3 (в случая импулс-2 и импулс-3). Докато импулс-1 избързва, а импулс-4 съответно закъснява и не съвпадат по време в точка-3. На [Фиг. 4.3. б\)](#) като функция на времето горе- по абсциса  $t$  е дадено времето на всеки импулс =  $3,333 \cdot 10^{-8}$  s, както и времето на закъсняващия и избързващия импулси спрямо съвпадащите импулси-2,3 =  $1,333 \cdot 10^{-7}$  s. За удобство, долу по абсциса  $l$  е показано като разстояние в метри импулсите и закъснението, както и времето за експозиция при снимане на само съвпадащите по време импулси =  $2 \cdot 10^{-7}$  s, а също и времето за експозиция изразено като разстояние в метри = 60m.

Съвпаденията на двата от импулсите се получава по следния начин, логика. На изхода на първия интерферометър имаме два клонирани импулса (аналогично на вариант-4.4), които се клонират отново във втория интерферометър и съответно на изхода му вече имаме 4 импулса. Първия, така наречен избързващ импулс-1, минава по късите рамена и на двата интерферометъра. Втория импулс-2 е клонинг на импулс-1, но преминал по дългото рамо във втория интерферометър. Третия импулс-3 е преминал по дългото рамо на първия интерферометър и по-късото рамо на втория интерферометър. Така, че двата импулса (импулс-2 и импулс-3) пристигат на изхода на втория интерферометър едновременно. Четвъртия импулс-4, минава само по дългите рамена и на двата интерферометъра и съответно закъснява спрямо останалите. (Проверка на така разглежданата последователност и изместване по време на четирите импулса можем да извършим, аналогично на по-рано разглежданата, като слагаме двойка полупрозрачни огледала в двете рамена на интерферометрите и отразените импулси наблюдаваме с осцилоскоп.)

При така получените, избързващи, съвпадащи и закъсняващи лазерни импулси, ако направим снимка с време на експозиция  $t \leq 1\text{ms}$ , каквото време използваме за приемственост. ИК която ще заснемем ще има видимост по лоша от  $V_{\text{nes}}$ , защото интерференцията на двата съвпадащи по време импулса ще се насложи с равномерното разпределение на фотони от двата не съвпадащи импулса. Докато съгласно МВФ, видимост на ИК трябва да е  $V_{\text{nes}}$ , защото и четирите импулса достигащи последователно до екрана се намират едновременно в последния интерферометър. Но в случая, ако снимаме само съвпадащите лазерни импулси (където има условие за влияние и МВ ще е в сила) или само не съвпадащите (където няма условие за влияние МВ), ще имаме категоричен резултат относно работещ МВ, с тази цел и разглеждаме резултата отделно.



Фиг.4.3. а) Два последователно свързани несиметрични интерферометър на Mach-Zehnder с включен ключ SW. Първия Interferometry -1 работи в режим модулация на интензитета, а втория Interferometry -2 в режим интерферометър. б) Време диаграма на четирите клонирани импулси на изхода на интерферометър-2, графично показани като вертикални линии. Долу - по абсциса  $l$ , показано като разстояние в метри дължината на импулсите и закъснението им. Както и времето за експозиция  $= 2.10^{-7}\text{ s}$  изразено и като дължина в метри  $= 60\text{ m}$ .

**Вариант-4.5. а)** Както беше разгледано имаме два съвпадащи по време лазерни импулси (импулс-2 и импулс-3) Фиг. 4.3. б) достигащи едновременно до така разгледаната точка-3 Фиг. 3.1. б) и съответно до екрана- E. Да разгледаме вариант-4.5.а) при който правим снимка само на въпросните съвпадащи по време лазерни импулси. Съответно видимостта на ИК ще е  $V_{\text{max}}$ , защото имаме условието за влияние и всеки от съвпадащите импулси изминава оптичния път по едно от късите рамена на единия интерферометър и по едно от дългите рамена на другия интерферометър.

За да сме напълно коректни към твърдението, че  $V_{\text{max}}$  от вариант-4.2 (където също имаме съвпадащи импулси) приет като основа за сравняване, ще е напълно равно на  $V_{\text{max}}$  от вариант -4.5. а, т.е. снимки направени и при двата въпросни варианта да показват еднаква видимост  $V$  на ИК, то лазерните снопове трябва да изминат еднакви разстояния до екрана. Така, че дължината на раменете на интерферометъра Фиг. 4.1 а), за които не беше дадена стойност за размера му в метри до сега. Можем за случая да приемем, като равни на разстоянието на двата интерферометъра от Фиг. 4.3. а), плюс разстоянието между огледало P2 от първия интерферометър и огледало P1 от втория интерферометър. Това, че така показаните разстояния на интерферометъра изглеждат големи не е проблем за лазерните снопове, още на времето Майкелсон е използвал 60 метрови интерферометри с нелазерна светлина и е достигнал изместване от 500 000 дължини на вълната или около  $\sim 30\text{ cm}$  несиметричност на интерферометъра, като все още е наблюдавал ИК. Размерите на интерферометрите, времената на импулсите и закъсненията помежду импулсите, са подбрани с цел по лесен анализ и могат при релеен експеримент да бъдат променяни. Но остава задължителното условие, разгледаните

импулси да се намират едновременно в интерферометъра, т.е. времето на импулсите плюс закъсненията между импулсите, да е по-малко или равно, на времето за което светлината преминава през по-късото рамо на втория интерферометър.

С цел приемственост за всички варианти, размерите на интерферометрите и нужните ни времена които са подбрани, се определят основно, от възможността да съгласуваме времето за експозиция, когато снимаме само двата съвпадащи импулса. Разработените фото и CCD камери могат да работят с милиони кадъра в секунда. И в случая, сме подбрали време  $2 \cdot 10^{-7}$  s за експозиция при снимане на само съвпадащите импулси (изразено и като разстояние 60 m виж [Фиг. 4.3. b](#)) долу- по абсциса  $l$ ), отговарящо на  $5 \cdot 10^6$  кадра в секунда. Но с цел по-добро качество можем да снимаме и в по-облекчен режим, като правим само по една снимка на съвпадащите импулси при всяко периодично повторение от 1ms на задаваните импулси от PWM, т.е. снимаме с 1000 кадъра в секунда, но с време на експозиция  $2 \cdot 10^{-7}$  s .

Освен, че видимостта на ИК ще е  $V_{\max}$ , за съвпадащите импулс-2 и импулс-3, то ако променим дължината на рамо ARM-2 на втория интерферометър с  $\lambda / 2$ , аналогично на разглеждането в предишните варианти, то максимума ще се измести.

**Вариант-4.5. b)** Целта на вариант-4.5. b) е да се направи снимка само на импулс-1 или само на импулс-4, като в кадъра не попаднат така наречените едновременните импулси. Всички разглеждани времена и начално време за експозиция, аналогично на по-рано разглежданите варианти, са спрямо синхронизиращ импулс от PWM. Като се отчита, че импулс-1 избързва, а импулс-4 съответно закъснява (спрямо съвпадащите), не сме ограничени от така показаното време за експозиция  $2 \cdot 10^{-7}$ s [Фиг. 4.3. b](#)) изисквано при вариант-4.5. a), т.е. може да се снима при по облекчен режим.

Резултата на снимка, на само импулс-1 или само на импулс-4, ще е съгласно закономерностите разгледани при вариант-4.4 , т.е. съвпадение по време в точка-3 и условие за влияние между лазерните импулси няма, следователно видимостта на ИК ще е  $V=0$  съгласно МВ. Докато, съгласно МВФ видимостта на ИК задължително трябва да е  $V_{\text{nes}}$ .

## 5. Заключение

Целта на разгледаните експерименти в 4-та точка е експериментално да се провери, кой от така наречените два–модела МВФ или МВ е работещ, верен. Основния казус, на основа разгледаните експерименти, касае верността на принципа за локалност или нелокалност на физичните свойства (взаимодействия, влияние) при ЕМВ. Съгласно МВ е верен принципа за локалност, като влияние между ЕМВ (фотоните) може да се осъществи само когато имаме условието на пресичане в пространството (в така разглежданата точка-3 [Фиг. 3.1. b](#))), на два снопа или импулси, т.е. влиянието е локално и няма нужда от КВФ с над светлинни (мигновени) скорости. Съответно, краен резултат ИК, ще има само при съвпадащи по време лазерни импулси и няма да се наблюдава ИК когато лазерните импулси се разминават по време. Както и изместване на максимум, при промяна на оптичния път в едното рамо с  $\lambda/2$ , ще има само при съвпадащи по време лазерни импулси. Докато, съгласно МВФ е верен принципа за нелокалност, съответно краен резултат ИК ще има винаги, независимо от това дали лазерните импулси съвпадат или не съвпадат по време (в така разглежданата точка-3). Но със задължителното изискване, за над светлинни скорости на така разглеждания разлят в двете рамена на интерферометъра фотон и съответния КВФ, както и всички произтичащи от това проблеми за формализма на КИ.

За удобство резултатите и параметрите на отделните варианти са показани в [таблица-1](#), тъй като експериментите, някои технически решения и логика се налага да разглеждаме по нов начин. Със знака „X“ във всяка колона е отбелязано активната опция използвана за конкретен вариант. Важни в случая са последните 4 колони на които ще направим кратък коментар:

Колона-5 - Съвпадащи снопове (импулси) – едновременно в така разглежданата точка-3 от Фиг. 3.1. b), което съвпадение или несъвпадение на импулсите е показателно за верността на единия от моделите.

Колона-6 - Изместване на максимума - при промяна на оптичния път в едното рамо с  $\lambda/2$ . Което, съгласно МВФ винаги трябва да води до изместване на максимум. Докато, съгласно МВ изместване на максимум ще има само при съвпадащи снопове (импулси) в така разглежданата точка-3.

Колона-7 - Видимост V на ИК – в тази колона са дадени стойностите (запометени, снимани) за наблюдаваната видимост V на ИК, като за основа използваме вариант-4.1 (или вариант-4.2) за сравнение, анализ към другите варианти.

Колона-8 - Не се съгласува с МВФ – когато резултата за видимост V на ИК и изместване на максимума не отговаря на изискването на МВФ съгласно КИ.

Таблица-1. Варианти и резултати на експериментите от точка 4.

Вариант	Симетричен	Несиметричен	Включен ключ SW	Съвпадащи снопове (импулси)	Изместване на максимума	Видимост V на ИК	Не се съгласува с МВФ
4.1	X	-	-	X	X	V <sub>max</sub>	-
4.2	X	-	X	X	X	V <sub>max</sub>	-
4.3	-	X	-	X	X	V <sub>nes</sub>	-
4.4	-	X	X	-	-	V = 0	X
4.5. a)	-	X*	X	X	X	V <sub>max</sub>	-
4.5. b)	-	X*	X	-	-	V = 0	X

\* варианти с два последователно свързани несиметрични интерферометъра.

### Конкретно за отделните варианти:

**Вариант-4.1, 4.2 Фиг. 4.1** е стандартна експериментална постановка на симетричен интерферометър, даваща стандартна ИК с видимост V<sub>max</sub>. Да отбележим, че V<sub>max</sub> е най-контрастната ИК която може да се наблюдава при реален експеримент. В случая имаме съвпадащи снопове (или импулси) в точка-3, така, че крайния резултат на ИК може да се обясни и от двата модела. Разглеждането на тези варианти, освен въвеждането на основните закономерности на интерферометрите на която основа надстройваме следващите варианти, се налага основно за да имаме запометен резултат (снимка) на ИК с V<sub>max</sub>, която да използваме като основа за сравнение и анализ към снимки на други варианти.

**Вариант-4.3 Фиг. 4.2** е експериментална постановка на несиметричен интерферометър и в следствие на несиметричност на двете рамена, то видимостта на ИК е V<sub>nes</sub>, което е факт добре познат още от Майкелсон. При промяна на оптичния път в рамо ARM-2 с  $\lambda/2$ , за варианти-4.1, 4.2 и 4.3, ще наблюдаваме изместване на максимум.

**Вариант-4.4 Фиг.4.2. b), c)** е експериментална постановка на несиметричен интерферометър и включен ключ SW. Експеримента разгледан във вариант-4.4 е решаващ и с него може да се определи кой от двата модела е верен. В случая, лазерните импулси на изхода на интерферометъра и в така разглежданата точка-3 Фиг. 3.1. b), не съвпадат по време и нямаме условие за така нареченото влияние на пресичащи се лазерни импулси съгласно МВ, като съответно видимостта на ИК е V = 0. Докато, съгласно МВФ видимостта на ИК трябва да е V<sub>nes</sub>. Такъв резултат на ИК с видимост V = 0, не се съгласува с МВФ и твърдението на Дирак, че фотона интерферира само със себе си. Особено важно в случая е, че въпреки елементарността на вариант-4.4, той дават напълно противоположни и категорични резултати така, че еднозначно може да се отхвърли или потвърди кой модел е работещ.

Цялата същност на разгледаните експерименти и възможността да докажем кой от моделите е работещ се състои в следното. При вариант-4.3 имаме несиметричен интерферометър и непрекъснати лазерни снопове, съответно имаме условие за влияние между сноповете и върху екрана ще наблюдаваме ИК с видимост  $V_{nes}$ . При вариант-4.4 използваме същия несиметричен интерферометър, но вече с включен ключ SW и съответно получените лазерни импулси не съвпадат по време в точка-3, като в случая нямаме условие за влияние между лазерните импулси от което ще наблюдаваме ИК с видимост  $V=0$ . Освен това, при промяна на оптичния път в едното рамо с  $\lambda/2$ , тъй като максимуми липсват то съответно изместване няма да има, докато съгласно МВФ такова изместване е задължително.

Експериментите вариант-4.3 и вариант-4.4 се изпълняват на един и същ не симетричен интерферометър при еднакви условия и за двата варианта, като единствената разлика е, че при вариант-4.4 ключ SW е включен, съответно, вместо видимост на ИК  $V_{nes}$  за вариант-4.3, ще наблюдаваме ИК с видимост  $V=0$  за вариант-4.4. Което може да се наблюдава дори и с невъоръжено око, ако задържаем ключ SW във всяко положение (ръчно или автоматизирано) за по 10 секунди, то и наблюдаваната видимост на ИК за двата варианта ще се редува в такт със задържането на ключ SW, т.е. в случая наблюдаваме експерименталния резултат без нужда от периодични снимки на всяка 1ms.

Да отбележим, че съгласно МВФ (представата на Дирак и КИ) фотона е „разлят“ по двете рамена на интерферометъра, а това, че за вариант-4.4 ключ SW е включен не оказва влияние на резултата, тъй като и при вариант-4.2 ключ SW е включен и имаме лазерни импулси, но видимостта на ИК е  $V_{max}$ . Но докато при вариант-4.2 (симетричен интерферометър), имаме лазерни импулси които съвпадат по време при преминаване през точка-3, със съответното влияние и преразпределение на фотоните като ИК. То за вариант-4.4 следствие на несиметричността на интерферометъра, лазерни импулси не съвпадат по време при преминаване през точка-3 и съответно няма условия за влияние.

Както беше отбелязано по-рано с цел приемственост и по удобен анализ, за всички варианти на експериментите, беше прието определено времетраене на лазерните импулси, дължина на раменете на интерферометрите и периодичност на импулсите. Които не са задължителни, ако се фокусираме само върху вариант-4.3 и вариант-4.4, така, че могат да се подбират и използват най-подходящите технически параметри при реализация им. Т.е. можем да намалим с един порядък времетраенето на лазерните импулси, дължина на раменете на интерферометрите, като съответно и несиметричността намалее с един порядък (за случая става 4 м), а периодичността на импулсите от PWM остава същата, тъй като няма отношение към видимостта  $V$  на ИК и изводите. Експеримента вариант-4.4 е решаващ за верността на МВФ или МВ, логически елементарен и технически лесно изпълним или казано накратко експеримент като за студенти и може да се извърши във всяка лаборатория по оптика, като не се изискват сложни апаратури. Единствено изискване е лазера да има времева кохерентност и дължина на цуга близка на лазера от [7]. За да имаме достатъчно добра ИК за вариант-4.3, която да сравним към вариант-4.4 където ИК липсва.

Да допуснем, че експеримента вариант-4.4 даде резултат на ИК с видимост  $V_{nes}$ , каквото е изискването съгласно КИ и всички гравитиращи около нея представи. Такъв резултат, ще потвърди верността на КИ по категоричен начин, тъй като дори при най успешните експерименти описани в [10] (т.н. за кратко обобщени експерименти тип A. Aspect), „доказващи“ КИ, резултат с качество на ИК с видимост  $V_{nes}$ , със съответния интензитет (брой фотони) не е постигнат, т.е. още една причина експеримента да бъде извършен. Всъщност, при експериментите в [10] няма наблюдение на ИК, а на основа времева корелация на детектирани фотони за продължително време се „формира“ ИК. Но в случая, редица технически параметри са далече от желаното за да приемем експериментите за напълно коректни.

**Вариант-4.5** Фиг. 4.3 е експериментална постановка на два последователно свързани несиметрични интерферометри и включен ключа SW. На изхода на втория интерферометър имаме 4 клонирани импулса, като времената на импулсите плюс съответните закъснения помежду импулсите, е по-малко, от времето за което светлината преминава през късото рамо на



втория интерферометър. В случая с избраната несиметричност и продължителност на импулса от PWM, получаваме два съвпадащи по време лазерни импулси (импулс-2 и импулс-3), докато импулс-1 избързва, а импулс-4 съответно закъснява спрямо двата съвпадащи. Като в случая за двата съвпадащи импулса, имаме условието за влияние между ЕМВ в така разглежданата точка -3 и съответно ще наблюдаваме ИК с видимост  $V_{\max}$ . Докато, за импулс-1 и импулс-4, условието за влияние не е изпълнено и съответно ще наблюдаваме ИК с видимост  $V=0$ .

Експеримента разгледан във вариант-4.5 е решавания и с него може да се определи кой от двата модела е верен. Тъй като, от четирите клонирани лазерни импулса и избраната несиметричност, двата импулса съвпадат, а другите два не съвпадат в точка-3 (Фиг. 3.1. б). Но за случая е нужно да се направят снимки с подходящо време на експозиция така, че да се снима само съвпадащите или само не съвпадащите импулси. На практика това може да стане като бързо снимаща камера прави  $5 \cdot 10^6$  снимки за секунда, синхронизирана по импулс от PWM. Всъщност всички параметри като, периодичност и продължителност на лазерните импулси, размер на рамената на интерферометрите, несиметричност на интерферометрите и време за експозиция са избрани за да могат да се съгласуват към бързо снимаща камера, както и да са удобни за анализ и пресмятане. Но може да снимаме и при облекчен режим, като се направят само три последователни снимки на така показаните на (Фиг. 4.3. б), избързващ импулс-1, съвпадащи импулси-2,3 и закъсняващ импулс-4, за всеки импулс от PWM с периодичност 1ms. При направени три последователни снимки, то за съвпадащите импулси-2,3 ще наблюдаваме ИК с видимост  $V_{\max}$  и попаднал максимум върху определен маркер на екрана. Но ако променим дължината на рамо ARM-2, на втория интерферометър с  $\lambda/2$ , при следващ задаван от PWM лазерен импулс и направим нови три последователни снимки, то максимума за съвпадащите импулси-2,3 ще се измести. Докато, за импулс-1 и импулс-4 изместване на максимум няма да има. За улеснение, резултатите за вариант-4.5 са показани отделно в таблица-1, като за вариант - 4.5.a) разглеждаме само съвпадащи лазерни импулси, а за вариант-4.5.b) разглеждаме само не съвпадащи лазерни импулси.

## Литература

- [1] Dirac P. A. M, The Principles of Quantum Mechanics, 4th ed. (Oxford: Clarendon Press, 1958) (На руски преиздадена и допълнена, П. А. М. Дирак, ПРИНЦИПЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ, Вторым томом «Библиотеки теоретической физики» )
- [2] Клышко Д. Н, Основные понятия квантовой физики с операциональной точки зрения, УФН 168 975–1015 (1998)
- [3] А.Н. Верховин, ДИФРАКЦИЯ ФОТОНОВ ПРИ МАЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА, Вестник Псковского государственного университета, Серия Естественные и физико-математические науки – 2015г. №7
- [4] arXiv:1002.3880v1 [physics.gen-ph] 20 Feb 2010, (en) ; arXiv:1002.3880v1 (2010) (ru)
- [5] Glauber Roy J. 2006. “Nobel Lecture: One Hundred Years of Light Quanta.” Reviews of Modern Physics 78 (4) (November 17): 1267–1278. doi:10.1103/revmodphys.78.1267.
- [6] Глаубер Р. Оптическая когерентность и статистика фотонов – 1966, Издательство: М.: Мир Год издания: 1966
- [7] B. C. Young, F. C. Cruz,\* W. M. Itano, and J. C. Bergquist , Visible Lasers with Subhertz Linewidths, PACS numbers: 42.55.-f, 06.30.Ft, 07.10.Fq, 42.60.Da
- [8] Born M., Wolf E., Principles of Optics. 4th ed., "Pergamon Press", London, New York, Paris, 1968 (М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики, изд.2, "Наука" ФМЛ, Москва, 1973).
- [9] А.Садбери, КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА И ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, М.: Мир, 1989 (Sudbery A. 1985)
- [10] Aspect A. (2002) Bell's Theorem: The Naive View of an Experimentalist. In: Quantum [Un]speakables. Springer, Berlin, Heidelberg
- [11] Lifei Wu, Yanyi Jiang, Chaoqun Ma, Wen Qi, Hongfu Yu, Zhiyi Bi & Longsheng Ma, 0.26-Hz-linewidth ultrastable lasers at 1557 nm, Sci. Rep. 6, 24969; doi: 10.1038/srep24969 (2016).



- [12] Л. Б. Лиокумович, ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ, Санкт-Петербург Издательство Политехнического университета 2007
- [13] Тодорка Л. Димитрова, Учебни експерименти за природата на светлината\* Физика: Методология на обучението 3/4 (2015) 152–164
- [14] Б. САЛЕХ, М. ТЕЙХ, ОПТИКА И ФОТОНИКА ПРИНЦИПЫ И ПРИМЕНЕНИЯ, Том 2, Издательский Дом «Интеллект», 2012. ( В. Е. А. Saleh and М. С. Teich, [Fundamentals of Photonics](#), 2nd edition, Wiley, NewYork, February 2007, pp. 1177. Translated to German and published as *Grundlagen der Photonik*, Wiley-VCH, Berlin, March 2008. Translated to Russian, 2011. )
- [15] Луи дьо Броил, ИДЕИТЕ, КОИТО МЕ ВОДЯТ В МОИТЕ ИЗСЛЕДВАНИЯ\*, \* Експозе, написано през декември 1965 г. Препечатано в Annates de la Fondation Louis de Broglie, v. 17, n 3, 1992, pp. 239-255. Превод в списание, Светът на физиката - 3/98
- [16] LEONARD MANDEL, EMIL WOLF, OPTICAL COHERENCE AND QUANTUM OPTICS, Cambridge University Press 1995 (Леонард Мандел, Эмиль Вольф, ОПТИЧЕСКАЯ КОГЕРЕНТНОСТЬ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА МОСКВА ФИЗМАТЛИТ 2000)
- [17] М. С. Иесин, И. Л. Фабелинский, ПИКОСЕКУНДНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ И ИЗУЧЕНИЕ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ, УФН 1976 г/ 10
- [18] Brandaris 128: A digital 25 million frames per second camera with 128 highly sensitive frames, Chien Ting Chin, Charles Lance 'e, Jerome Borsboom, Frits Mastik, Martijn E. Frijlink, and Nico de Jong, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS VOLUME 74, NUMBER 12 DECEMBER 2003
- [19] CCD камери на компанията PHANTOM  
<https://www.phantomhighspeed.com/products/cameras/ultrahighspeed>