



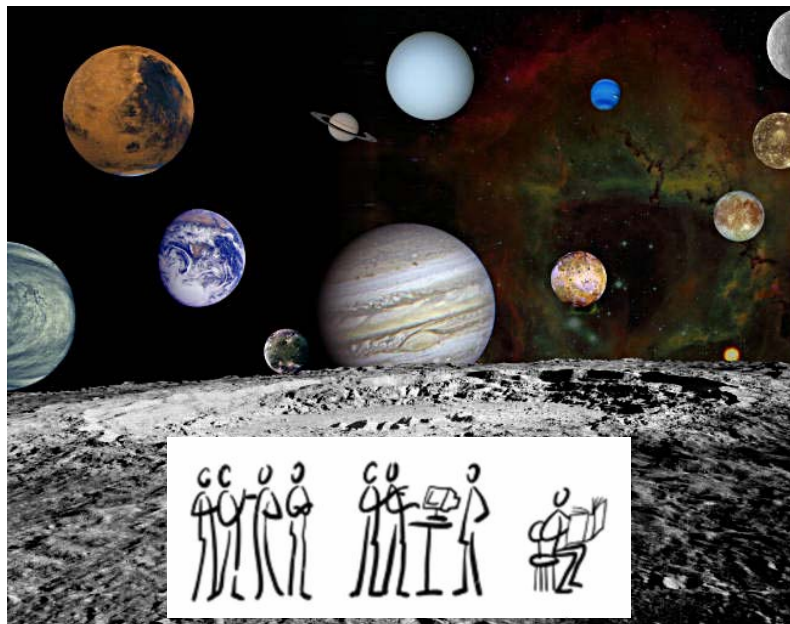
**Технически университет София**



**Департамент по приложна физика**

# **Дни на физиката 2009**

Сборник популярни и научни доклади



**София, 8 - 10 Април 2009 г.**

# Дни на физиката 2009

Сборник популярни и научни доклади

Редактори: С. Александрова и И. Копринков

МП ИЗДАТЕЛСТВО НА ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

## Предговор

Традиционните “Дни на физиката” в Техническия университет – София се състояха в периода 8-10 април, 2009г. Организатор на събитието беше Департаментът по приложна физика на ТУ-София. По време на трите сесии бяха изнесени 18 доклада на интересни и актуални теми от различни области на физиката. Докладите бяха представени от студенти от ТУ-София и преподаватели по физика от ТУ-София и Физическия факултет на СУ “Климент Охридски”. Радостен е фактът, че към проявите в областта на физиката има подчертан и траен интерес както от студентите първокурсници, изучаващи физика в момента, така и от студенти от по-горните курсове на ТУ-София. Не може да се подмине и обстоятелството, че студентските доклади бяха много добре оформени и представени. Дните на физиката са една добра възможност за студентите да придобият опит в излагането на научни проблеми и в участието в научни дискусии. Особеност на тазгодишната сесия беше представянето и на научни доклади. Надяваме се за в бъдеще тази тенденция да се развие и задълбочи и сборниците с доклади от Дните на физиката да се превърнат в регулярно издание на Департамента по приложна физика.

Благодарим на всички колеги, които представиха доклади на Дните на физиката и ги предоставиха за отпечатване в настоящото издание. Благодарим и на всички колеги, които проявиха ангажираност при подготовката и провеждането на Дните на физиката. Надяваме се, че успяваме да допринесем за повишаване на интереса на студентите към тази красива и интересна наука, физиката, чиито приложни аспекти са в основата на съвременната техника и технологии.

“Дни на физиката 2009“ се провеждат в рамките на “Дни на науката на ТУ-София – 2009”. Тази конференция е финансирана по вътрешния конкурс на ТУ-София 2009 със средства от субсидията за присъща научна дейност.

От Редакторите

# Съдържание

## Предговор

|                                                                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| С. Александрова, С. Тинчева, <b>Физиката през 1909 .... 1959.... 2009.... 2059 г. ....</b>                                                      | 1   |
| Lyubosvet Stoev, <b>Thermonuclear technology: history and perspectives</b> .....                                                                | 10  |
| Невена Кожухарова, <b>Глобални, регионални и локални екологични проблеми, свързани с промяна в състава на атмосферния въздух.....</b>           | 16  |
| Иван Т. Иванов, Валентина Т. Танева-Тончева, Борис Комитов, Радостина Ташева, <b>Механизъм на 160-мин. радиални пулсации на слънцето .....</b>  | 20  |
| Димитър Томов Димитров, <b>Черни дупки.....</b>                                                                                                 | 25  |
| Емил Маринчев, Михаил Михалев, Стоил Донеv, Петър Данев, Калоян Бойчев, <b>Цунами .....</b>                                                     | 32  |
| Т. Арабаджиев, <b>Моделиране на разпространението на лазерно излъчване във влакнесто оптични предавателни линии .....</b>                       | 36  |
| Г. Карастоянов, <b>Уравненията на Максвел .....</b>                                                                                             | 41  |
| Гаро А. Гарабедян, Сава Д. Донков, <b>Диференциалните уравнения и развитието на физиката .....</b>                                              | 46  |
| И. Г. Копринков, <b>Причинност на материалната фаза, или една възможна, динамично-статистическа, интерпретация на квантовата механика .....</b> | 61  |
| Мирослав Стайков и Виктор Стойнов, <b>Адронният ускорител –голямата загадка или експериментът на експериментите.....</b>                        | 70  |
| Диана В. Илиева, <b>Ускорители на елементарни частици .....</b>                                                                                 | 76  |
| Boyan Petrov, <b>Searching for repeating microlensing events.....</b>                                                                           | 83  |
| Стефан Дамянов, <b>За алгоритмичната формула за топлинна енергия отдадена от "сградна инсталация".....</b>                                      | 98  |
| Авторски указател.....                                                                                                                          | 106 |
| Програма на Дните на физиката .....                                                                                                             | 107 |
| Благодарности .....                                                                                                                             | 108 |

## Физиката през 1909 .... 1959.... 2009.... 2059 г.

С. Александрова<sup>1</sup>, С. Тинчева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Департамент по приложна физика, Технически Университет – София,  
бул. “Кл. Охридски” 8, 1756 София*

<sup>2</sup>*Биологически факултет, Софийски университет, бул. “Д. Цанков” 8, 1164 София*

Представен е преглед на развитието на физиката, като се започне 100 г. назад. Акцентът е върху интересни събития и открития, които имат определящо значение и които са се случили в годините, завършващи на 9. Разгледан е въпросът за възможността да се прогнозират интересни резултати през идващите 50 години.

Историята на развитието на дадена наука ни дава възможност на проследим появата и развитието на идеите и да се докоснем до творческия процес. В случая на една природна наука, каквато е физиката, имаме възможност да се почувстваме свидетели на взаимното влияние и обусловеност с техническите науки. От една страна изучаването на физиката и приложението на нейните закони е в основата на техническия прогрес. От друга страна развитието на техническите науки обуславя напредъка в разработването и усъвършенстването на експерименталните методи, необходими за изследователския процес. Пример за тези взаимна връзка и обусловеност са Нобеловите награди – за технически науки няма и те често се присъждат за съществен принос в развитието на техниката, както ще видим по-нататък.

В настоящия доклад ще се опитаме да се върнем 100 години назад и да проследим някои важни открития и събития, които бележат пътя на развитието на физиката до наши дни и да се опитаме да надникнем в бъдещето.

След сравнително бавното развитие на природните науки в продължение на столетия до епохата на Ренесанса в края на 19 век физичната картина за света добива завършен вид. Благодарение на Нютон е възможно да се описва движението на телата от планетите до атомите. Развива се термодинамиката. Формулирани са законите на електродинамиката, носещи името на Максвел. Изглежда като че ли няма какво повече да се изследва. Често тези знания се определят като класическа физика.

Изследвания на някои на пръв поглед незначителни проблеми в началото на 20 век бележат началото на редица епохални открития, които изменят представите ни за света. Неслучайно 20 век често се определя като “векът на физиката”. И досега развитите нови области на физиката се определят като модерна физика.

Нека да се пренесем 100 години назад в 1909 г. Вече 8 години за съществен принос в развитието на науките през съответната година се присъждат Нобеловите награди. За 1909 г. Нобеловата награда по физика получават Гулиелмо Маркони (Guglielmo Marconi) от английската компания Marconi Wireless Telegraph Co. Ltd. и Карл Браун (Karl Braun) от Университета в Страсбург, тогава Германия, “in recognition of their contributions to the development of wireless telegraphy”. Тогава не се прави разлика между чистата университетска наука и приложните науки.

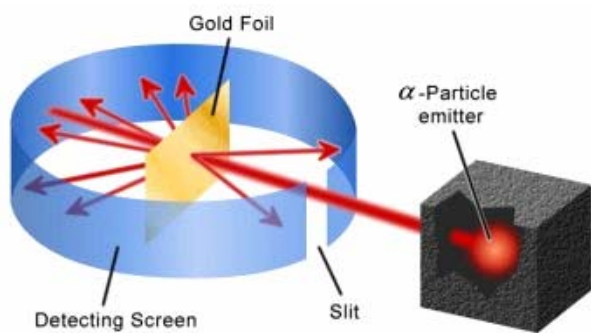


Гулиелмо Маркони



Карл Браун

През същата година Ернест Ръдърфорд (Ernest Rutherford) провежда своите експерименти, които доказват за пръв път експериментално, че атомът не е неделимата частица на древните гърци.



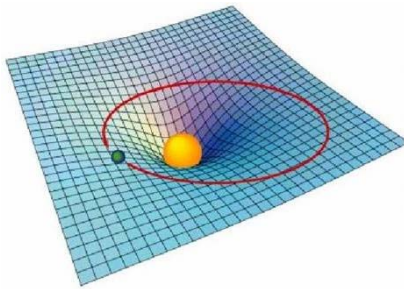
Фиг. 1. Опитът на Ръдърфорд

При тези опити Ръдърфорд насочва сноп от а-частици през тънко златно фолио. С помощта на детектираща система се следи посоката на разпространението на а-частиците. Оказва се, че повечето от а-частиците преминават през златната пластинка, без да променят посоката си на разпространение. Една част обаче се отклоняват на различни ъгли, и само много малък брой а-частици, около 1 на всеки 10 000, отскачат почти в обратна посока. Атомът

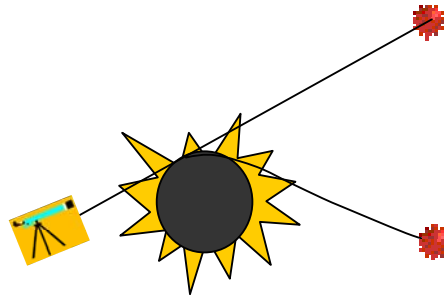
изглежда празен, цялата маса е концентрирана в едно ядро, което носи положителен електричен заряд. Малкият брой а-частици, които минават близо до атомните ядра, се отклоняват поради отблъскване на атомните заряди, и то толкова по-силно, колкото по-близо до атомните ядра минават. Отразяват се само тези частици, които са насочени към самите атомни ядра. От техния нищожен относителен брой, следва че атомните ядра заемат много малка част от общите обеми на съответните атоми.

Възниква предствата за атома, която напомня Слънчевата система. Подобно на планетите, които се въртят около Слънцето, електроните кръжат около атомното ядро. Променят се представите ни за строежа на веществото. Започва бурно развитие на атомната физика.

През 1919 г. е постигнат значителен успех в опитите за потвърждаване на общата теория на относителността (ОТО). Съгласно ОТО пространството около голяма маса се изкривява подобно на показаното на фиг. 2. Сър Артър Едингтън (Arthur Eddington) и ръководената от него експедиция заминават за остров Принсипал близо до Мадагаскар с цел да наблюдават очакваното на 29.05.1919 г. слънчево затъмнение. Техните наблюдения потвърждават предсказанието на ОТО на Алберт Айнщайн (Albert Einstein) за изкривяване на пространството около масивни обекти. Този ефект е илюстриран на фиг. 3. Светлинен лъч, идващ от далечна звезда, се изкривява, минавайки през гравитационното поле на Слънцето. Това позволява да се види звездата, намираща се зад него. Ефектът е известен като “гравитационна леща”.



**Фиг. 2.** Илюстрация на изкривяване на пространството около голяма маса.



**Фиг. 3.** Отклонение на светлинен лъч в гравитационно поле (Гравитационна леща).

Благодарение на резултатите на сър Артър Едингтън от този момент нататък А. Айнщайн се превръща в знаменитост.

През същата година Нобеловата награда за физика получава Йоханес Щарк (Johannes Stark) от Университета в Грайфсвалд, Германия, за “откритието на ефекта на Доплер в катодни лъчи и разцепването на спектралните линии в електрическо поле”. За съжаление неговото име се свързва с дейността му по-късно в подкрепа на режима на Третия райх.

През 1929 г. американският астроном Едуин Хъбъл (Edwin Hubble) открива, че галактиките се отдалечават от Земята със скорост пропорционална на разстоянията им до нас. Това е така нареченият закон на Хъбъл. За определяне на скоростите на галактиките Е. Хъбъл използва факта, че линиите в техните спектри са отместени към червения край на спектъра, така наречените червени отмествания.



*Едуин Хъбъл*



**Фиг. 4.** 2.5 м телескоп в Обсерваторията Mount Wilson, използван от Е. Хъбъл.

Според закона на Хъбъл галактиките се разбягват. Следователно може да се направи изводът, че в определен начален момент всички галактики са се намирали в една точка – “сингулярност”, т.е. стигаме до идеята за “Големия взрив”, от който се ражда нашата Вселена. Резултатите на Е. Хъбъл са в съгласие с решенията на уравненията на А. Айнщайн на ОТО за Вселената като хомогенно изотропно разширяващо се пространство.





Луи дьо Бройл

Нобеловата награда по физика през 1929 г. получава френският физик Луи дьо Бройл (Louis Victor Pierre Raymond duc de Broglie) „за откритието на вълновата природа на електроните“. Самият дьо Бройл описва развитието на своите представи в Нобеловата си лекция по следния начин: „..... обща идея, която ръководи моите изследвания ” ..... за материята, както и за радиацията, и в частност светлината, трябва да се въведе едновременно концепция за частица и за вълна. ....трябва да се приеме съществуването на частици, придружени от вълни. Но частиците и вълните не могат да бъдат независими ....“. Според хипотезата на дьо Бройл всички форми на материята имат свойства както на частици, така и на

вълни. Днес вълните, свързани с материалните частици, носят неговото име.

През 1929 г. започва да излиза научното списание *Reviews of Modern Physics*, издание на Американското физическо дружество. Списанието си поставя за цел да публикува обзорни статии на теми, които са в най-модерните области на физиката.

Първите две публикувани статии са "Probable Values of the General Physical Constants" на Raymond T. Birge (фиг. 5) и "The Corpuscular Properties of Light" на сър Arthur H. Compton. Самите заглавия показват насоките на развитие на физиката в първата половина на 20 в.

От изследванията в този период възникват и се оформят двете области на физиката, които се занимават със света на големите размери и скорости (теорията на относителността) и микросвета (квантовата механика). Интензивни изследвания се водят във всички големи университети в Европа. Особено значение по това време има обменът на информация между физиците, който се осъществява на семинари и конференции. На снимките, показани по-долу, могат да се видят повечето физици, които градят новата модерна физика. На първата фотография са участниците в Солвеевската конференция, състояла се през октомври 1927 г. в Брюксел. От присъстващите 29 учени, 17 стават носители на Нобелова награда, като Мария Кюри е получила тази награда два пъти в две различни научни области. Предмет на обсъждане на конференцията е

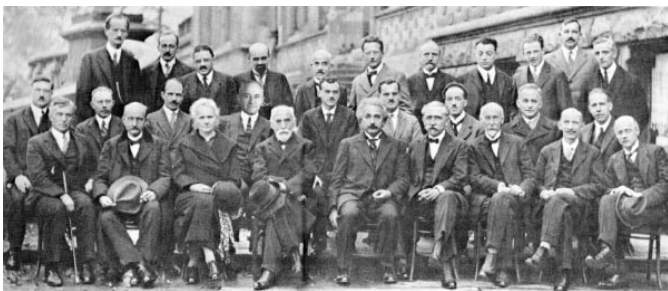
Фиг. 5. Първият брой на *Reviews of Modern Physics*

природата на електроните и фотоните. Водещи фигури са Алберт Айнщайн и Нилс Бор. Айнщайн не иска да приеме принципа на неопределеност на Хайзенберг. Прословутата става неговата фраза "Бог не хвърля зарове". Отговорът-шега на Бор е "Айнщайн, престани да казваш на Бог какво да прави".

На изток в Русия в Политехническият институт функционира известният "семинарът на Йоффе", по името на ръководителя на семинара А. Ф. Йоффе. Семинарът е посветен на съвременни въпроси на физиката. От участниците в този семинар на втората фотография са излезли голям брой видни учени, двама нобелови лауреати. От този малък семинар по-късно възниква Физико-техническият институт "Абрам Фьодорович Йоффе".

| Section                                          | Page |
|--------------------------------------------------|------|
| Introduction                                     | 1    |
| A. Velocity of light, $c$                        | 8    |
| B. Gravitation constant, $G$                     | 10   |
| C. Relation of liter to cm <sup>3</sup>          | 11   |
| D. Normal mole volume of ideal gas, $v_0$        | 11   |
| E. Relation of volt to the electrical unit       | 14   |
| F. Atomic weights, H, He, N, Ag, I, C, Ca        | 18   |
| G. Normal atmosphere, $P_0$                      | 20   |
| H. Absolute temperature of ice-point, $T_0$      | 28   |
| I. Mechanical and electrical equivalents of heat | 30   |
| J. Faraday, $F$                                  | 33   |
| K. Electronic charge, $e$                        | 36   |
| L. Specific charge of electron, $e/m$            | 43   |
| M. Planck constant, $h$                          | 48   |
| N. Tables                                        | 58   |
| Table 1. Principal constants and ratios          | 59   |
| Table 2. Additional quantities evaluated         | 60   |
| Table 3. Miscellaneous derived constants         | 62   |
| O. Conclusion                                    | 67   |





*Солвеевската конференция, 1927г., Брюксел.*



*Семинарът на А. Ф. Иоффе, 1916 г., Петербург.*

В следващото десетилетие теорията на относителността и квантовата механика, макар и предмет на спорове и дискусии, се утвърждават като нови области на физиката. Както при всички нови открития, се достига и до практически приложения на получените знания. За съжаление не винаги тези приложения служат за подобряване на живота на човечеството и за напредъка на цивилизацията. През 1939 г. Айнщайн отправя писмо до президента на САЩ Франклин Рузвелт, като обръща внимание на възможността Германия да построи ново унищожително оръжие - атомна бомба. Въпреки че в съставянето на писмото участват и няколко други физици, то е подписано само от Айнщайн. Това показва големия авторитет, който той вече е имал в обществото. Със сигурност това писмо подпомага решението САЩ да започнат работа по разработване на атомно оръжие – проектът Манхатън, като целта е противодействие на режима на Хитлер в Германия и очакването на военни действия в Европа.

През 1949 г. в списанието *Bell System Technical Journal Vol. 28 No. 3* (July 1949) pp. 435–89 е публикувано изследване със заглавие “The Theory of P-N Junctions in Semiconductors and P-N Junction Transistors”, като автор е Уилям Шокли (William Bradford Shockley). Това е теоретично описание на функционирането на открития две години по-рано от Джон Бардийн (John Bardeen) и Уолтър Братейн (Walter Brattain) транзисторен ефект, т.е. ефектът на усилване на електрични сигнали с използване на полупроводникови структури. Това откритие бележи нова ера в развитието на електрониката – полупроводниковата електроника и техника. Разбирането на транзисторния ефект се базира на познанията ни от квантовата механика.

В последните години често се говори вече не за микро-, а за наноелектроника. Първото предсказание за тази посока на развитие на електрониката се търси в думите на Ричард Файнман (Richard Feynman), направено още през 1959 г. Речта му пред конгреса на Американското физическо дружество е озаглавена “**There's Plenty of Room at the Bottom**”. Смисълът според самия Файнман е, че изследването и използването на явленията в микромащаб е отворено поле за действие. Става дума за проблемите на манипулиране и контрол на атомно ниво, когато ще можем да подреждаме атомите по определен от нас начин.

Тук ще се отклоним от годината, завършваща на 9, за да споменем едно изключително астрономическо откритие, тъй като 2009 г. е обявена за година на астрономията. През 1967 г. Джослин Бел (Jocelyn Bell) и Антъни Хюиш (Antony Hewish) откриват радиоимпулси (“малките зелени човечета”), идващи от Hewish and Okoye. Този пулсар е идентифициран като изолирана въртяща се неутронна звезда. Антъни Хюиш получава Нобеловата награда по физика за 1974 г. без Джослин Бел, “for his decisive role in the discovery of pulsars”. По време на откритието Jocelyn Bell е докторантка, а Antony Hewish е нейният ръководител. Получените от нея данни, които водят до откриването на

пулсарите, са част от нейната докторска работа. Jocelyn Bell е активно работещ физик, често сменя областта си на изследване и винаги има своите оригинални резултати.



Фиг.6. Вояджър 2.

През 1989 г. космическият кораб на НАСА *Вояджър 2* (фиг. 6) минава край Нептун, последната голяма планета, преди да напусне Слънчевата система. Вояджър 2 е единственият апарат посетил Уран и Нептун, възползвайки се от изгодното разположение на планетите, което се повтаря веднъж на 175 години. Космическият апарат е изстрелян от космодрума в *Кейп Канаверал*, Флорида на 20 август 1977 г. На борда си апаратите "Вояджър" също носят плочки със закодирана информация за Земята, която би могла да послужи евентуално на друга цивилизация да разбере откъде са тръгнали по своя път в пространството. Освен тях те носят специални грамофонни плочи, върху които са записани гласове и музикални произведения от Земята. Интересно е да се знае, че сред тези гласове е и една българска родопска песен.

И през други години, завършващи на 9 са се случили вълнуващи и интересни събития, които са оказали съществено влияние върху развитието на физичната наука. Ще споменем накратко някои от тях.

1589: Галилео Галилей (Galileo Galilei) установява, че свободното падане не зависи от масата на телата

1609: Галилео Галилей (Galileo Galilei) демонстрира своя първи телескоп пред венециански законодатели и започва системни астрономически наблюдения.

1609: Йохан Кеплер (Johannes Kepler) публикува първите два закона за движението на планетите - закони на Кеплер.

16 март 1789: Роден е Георг Ом (Georg Ohm), немски физик в Ерланген.

2 януари 1789: Луи Дагер (Louis Daguerre) прави първата снимка на Луната.

1879: Томас Едисон (Thomas Edison) изобретява електрическата крушка с нажежаема жичка.

14 март 1879: Роден е Алберт Айнщайн (Albert Einstein) в Улм.

Януари 1909: Ърнест Шекълтън (Ernest Shackleton) и експедицията му достигат Южния магнитен полюс.

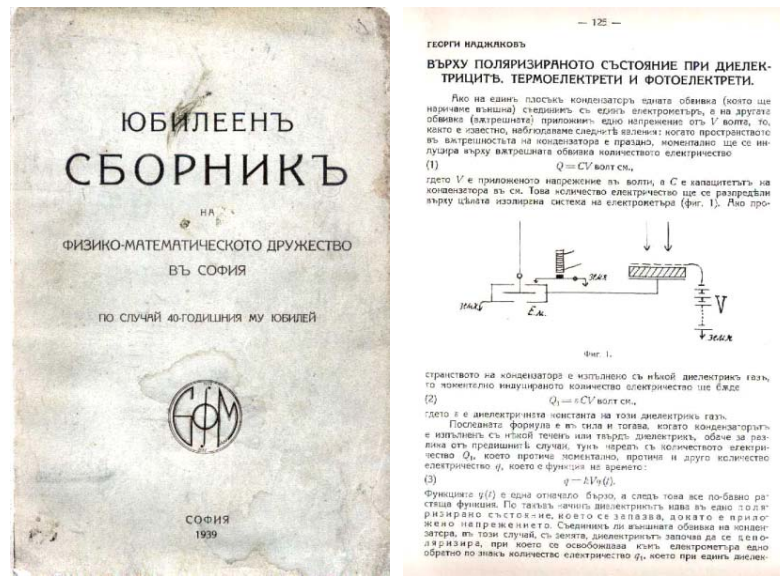
Април 1909: Роберт Пири (Robert Peary) достига Северния полюс.

1908: Мария Кюри (Marie Curie) е първата жена, избрана за професор в Сорбоната.

1 януари 1939: Създаване на компанията Хюлет-Пакард (Hewlett-Packard). Световният лидер, чийто персонални компютри и периферни устройства за кратко време завладяват света, е основан от двама състуденти и приятели- Уилям Хюлет и Дейвид Пакард. Двамата изучават хуманитарни науки в Станфорд, а след това електроинженерство. Първият офис на фирмата бил в малък гараж в градчето Пало Алто, Калифорния.

В България през 1889 г. в Софийския университет, тогава Висше училище, след историко-филологическото отделение е открито ново, второ отделение на ВУ- Физико-математическо, *"в което ще се преподават само чисто математически науки, физика и химия"*. Преподавателите са завършили в престижни университети в Европа. Физическата общност е в течение на новите идеи във физическата наука. Лекциите пред студентите съдържат последните постижения на науката, показват и връзките между общите физически закони и съответните технически постижения. Развива се и изследователска дейност. През 1939 г. в Юбилеен сборник на Физико-математическото

дружество в София, по случай 40-годишния му юбилей, София, с. 125 – 130 е публикувана статия на тема «Върху поляризираното състояние при диелектриците. Термоелектрети и фотоелектрети» с автор проф. Г. Наджаков. Две години по-рано, през юни 1937 г., във водещото по това време френско списание “Comptes rendus de l’Academie des Sciences à Paris” се появява съобщение от българския физик Георги Наджаков за откритите от него така наречени фотоелектрети. Това е и първото признато българско откритие в областта на физиката.



Фиг. 7. Страници от Юбилейния сборник на Физико-математическото дружество в София, 1939 г.

През 1889 г. е роден бележитият български физик проф. Саздо Иванов. Неговото научна кариера е тясно свързана с Техническия университет в София, където той е бил ръководител на Катедра "Физика", декан на Машинния факултет, зам. Ректор и Ректор.

На базата на ретроспекция на развитието на физиката до наши дни можем ли да прогнозираме какви открития или интересни и важни за физиката събития ни очакват през 2009 г. и напр. след 50 години през 2059 г.? Прогнозите често се разминават с действителните събития. Много трудно е да се предскажат новите открития, особено великите, които най-често идват неочаквано и предизвикват развитие в съвсем различна посока. Иначе навярно те не биха били велики, а просто предположения, които се явяват продължение на досегашния опит и в този смисъл не биха могли да ни изненадат.

В началото на 20 в. проф. Филип фон Жоли (Philipp von Jolly) дава следния съвет на младия Макс Планк (Max Planck) относно бъдещите му занимания с физика: "В тази област вече почти всичко е открито и малкото, което остава е да се запълнят някои липсващи празноти". Тъкмо от тези празноти възникват, както видяхме, теорията на относителността и квантовата физика, при това с активното участие тъкмо на Макс Планк.

По-горе се запознахме с една прогноза – тази на Р. Файнман за развитието на нанофизиката, което днес е реалност. Като алюзия на средновековния схоластичен спор, Файнман задава въпроса "Why cannot we write the entire 24 volumes of the Encyclopedia Brittanica on the head of a pin?" "И още "In the year 2000, when they look back at this age,

they will wonder why it was not until the year 1960 that anybody began seriously to move in this direction. “



Академик Ж. Алфьоров

свойства на ватериалите за развитието на нови технологии за приложение в електрониката.

А ето и някои други прогнози, направени в миналото, над които днес, от разстоянието на времето и придобитите вече знания, можем само да се усмихнем.



“I think there is a world market for maybe five computers”  
Thomas Watson, Chairman of IBM, 1943



“There is no reason for any individual to have computer their home”  
Ken Olson, Chairman of Digital Equipment Corp., 1977



“640 k should be enough for everyone”  
Bill Gates, Microsoft, 1981?

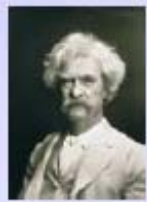
Една от основните идеи на съвременната физика е създаването на Единна теория, която да опише всичко – от елементарните частици до Вселената. В исторически план тази задача възниква в трудовете на Айнщайн. Той се опитал да обедини гравитацията и електромагнетизма, теорията на относителността и квантовата механика. Досега обаче не е постигнат качествен напредък.

Интересни прогнози за развитието на науките и технологиите през 21 в. прави Мичио Каку (Michio Kaku), професор по физика в City College of New York, след като интервюира 150 учени от различни области. До 2020 г. се очаква развитие на науката с темпове, непознати досега. Две са основните направления, развитието на мощни компютри и анализа на структурата на ДНК, които ще доведат до развитие на нови индустриални направления на базата на непредсказуеми научни открития. След 2020 г. Ще се появят нови технологии, които ще се развият във физичните лаборатории, от нови поколения лазери и холографска 3-мерна телевизия до термоядрен синтез. Материали, свръхпроводими при стайна температура, ще намерят практическо приложение и ще

станат база на нова индустриална революция. Използването на квантови явления ще даде възможност да се съвсем нов клас машини с размери на молекула с използване на нанотехнологии. Построяването на йонни ракети би позволило осъществяване на междупланетните пътувания.

Независимо от всичко сигурно е, че нашите знания за явленията в природата са несъвършени. Несъмнено е, че нови уживителни открития, които ще променят бъдещето, очакват своите откриватели.

Накрая да завършим със следната шеговита мисъл на Марк Твен:



"The art of prophecy is very difficult, especially with respect to the future"  
Mark Twain

## Литература

[http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/)

<http://www.twainquotes.com/index.html>

Michio Kaku, *Visions: How Science Will Revolutionize the 21st Century*, Anchor Books, Random House Inc., 1998

[http://en.wikipedia.org/wiki/Solvay\\_Conference](http://en.wikipedia.org/wiki/Solvay_Conference)

[http://www.absoluteastronomy.com/topics/Abram\\_Ioffe](http://www.absoluteastronomy.com/topics/Abram_Ioffe)

[http://www.knowledgerush.com/kr/encyclopedia/Arthur\\_Eddington/](http://www.knowledgerush.com/kr/encyclopedia/Arthur_Eddington/)

[www.crystalinks.com/physicsnews.html](http://www.crystalinks.com/physicsnews.html)

[www.ws5.com/spacetime/](http://www.ws5.com/spacetime/)

# Thermonuclear technology: history and perspectives

Lyubosvet Stoev

*Sofia University “St. Kliment Ohridski”, Faculty of Physics,  
5 James Bourchier Blvd, 1164 Sofia, Bulgaria*

The thermonuclear technology, initially developed as a product of the Cold war antagonism, now shows the way for the future development of the human kind. Both menace and blessing, it is the only practical way to deal the ever-growing energy hunger, as well as a path to the stars – if only we manage to harness the fusion power and restrain ourselves from abusing its might. This review follows the history of the fusion research from the Cold war to the present day and the perspectives for a future development.

## 1. Introduction

The possibility of exothermal fusion reaction of the light-element nuclei – as an exotic concept, alongside the idea of the fission – appeared in the 1930s [1], when it was clear that it is the sort of process that powers the Sun and the stars. In those early days the only conceivable use of the nuclear energy was to create a mighty weapon with unseen yet explosive power. As the simple calculations show, the potential fission or fusion fuels store million times more energy than the chemical fuels [1,2]. It was unclear, though, how to extract energy in usable form from the nuclear reactions. There was no necessity for sustained work in this direction until the Second World War loomed upon the horizon.

With the design of his Chicago nuclear pile [3], Enrico Fermi successfully solved this problem for the fission fuel. His works were a vital part of the Manhattan project – the US effort to create a nuclear weapon during WWII. A massive enterprise organized into the framework of the US Army Core of Engineers Manhattan Engineering District, the works were led by Robert Oppenheimer and supervised by Gen. Leslie R. Groves. It was impossible, though, this way to harness the fusion for work. Some of the brightest minds continued to speculate how to achieve such a feat [4-7], including Edward Teller, Hans Bethe and John von Neumann. They have to wait till after the end of the war when the fusion became a necessity. In the same time, in war-torn Soviet Union a massive effort was initiated in order to achieve parity with the west through obtaining a nuclear weapon. Watching closely each step of the American development, the Soviet PGU (Pervoe Glavnoe Upravlenie, First Main Directorate) of the GKO (Gosudarstvenny Komitet Oborony, State Defense Committee) led by the dreaded but impeccably efficient manager – the state security Marshal Lavrenty Beria – and aided by Igor Kurchatov and Yuly Khariton, draining all the vital resources it could scrap, was closing fast onto the Manhattan achievement [6,7]. The competing efforts of the two groups – on the two sides of the just casted iron curtain - prepared the stage for the development of the thermonuclear fusion technology.

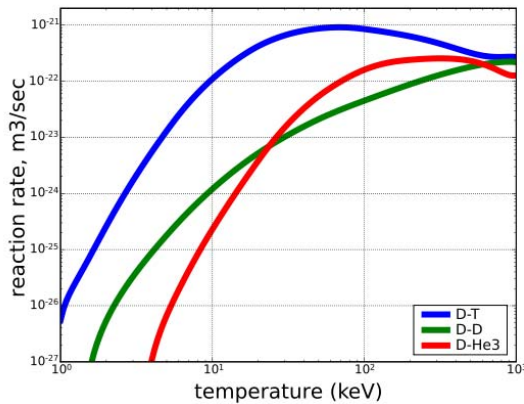


## 2. On the two sides of the Ocean

The event that triggered the official and authorized commission of thermonuclear research was the First Soviet nuclear test – the ‘First Lightning’ operation on August the 29<sup>th</sup>, 1949. It was a major history turn-point that clearly demonstrated several things: (i) in spite of the massive and widespread devastation of the WWII, USSR was capable of mobilizing all the resources needed for a follow-up nuclear weapons program; (ii) it happened much faster than any Western decision maker had expected; (iii) and last, but not least, the American monopoly over the nuclear weapons was broken. That is why the brightest minds within the US nuclear program had been given the green lights to pursue a fusion weapon. As early as 1942 it was suggested – in open discussions – that a fission device should be able to ignite the fusion reaction. The process, however, is not that straight-forward. Nevertheless, in the beginning of the 1950s Edward Teller and Stanislaw Ulam came with a potential solution – that was later to be known as the Teller-Ulam design [6,7].

### 2.1 US nuclear tests

There are many problems on the path of fusion machine design. Just a bunch of the major of these are like: to select the proper fusion fuel (or chain of reactions), to give the reaction media enough energy in order to ignite the fuel, to devise a means to contain the reaction for the longest possible time, to convert the output energy in a usable form and many more... The estimates of the reaction cross-sections and reaction rates (Fig. 1) show that the only practical reactions for weapon use were the DD and DT reaction, with the deuterium-tritium being the most efficient one. That stated new problems: the deuterium could be electrolyzed out of the



**Fig. 1.** *The fusion reaction rate increases rapidly with temperature until it maximizes and then gradually drops off. The DT rate peaks at a lower temperature (about 70 keV, or 800 million kelvins) and at a higher value than other reactions commonly considered for fusion energy.*

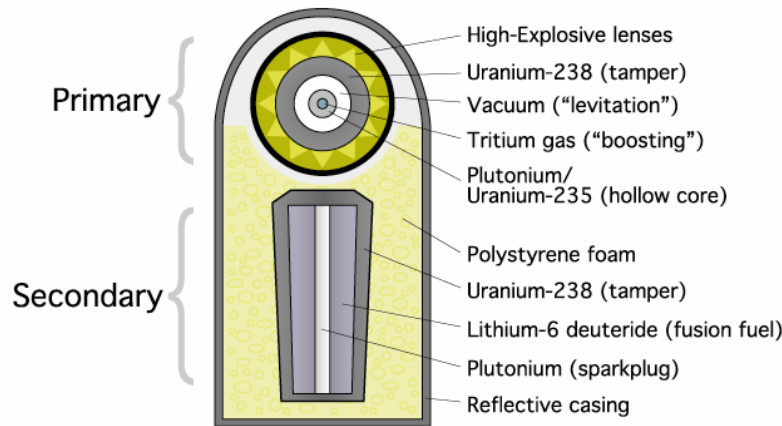
increase the fusion contribution into the explosion another solution was needed. The key of the Teller-Ulam idea was the concept of radiation implosion [5] – to use the fast X-ray radiation coming out of a boosted fission bomb in order to implode the fusion fuel (Fig. 2). It was a major

heavy water which was available enough but the tritium had to be produced in a nuclear reactor (through the neutron irradiation of lithium) which was a slow and costly process. Further on, if one just places a nuclear bomb into a large container of deuterium it will just blow the fusion fuel off with no effect. That is why it was conceived that an imploding shockwave could trigger the fusion reaction, although unclear to what extent. Such an experiment was tested in the operation Greenhouse, 1951. It successfully demonstrated that a drop of fusion fuel – a deuterium-tritium mixture – could successfully replace the bulky mechanically-triggered neutron source of the first nuclear weapons [5] and drastically increase the efficiency of the device. This was, however, only a boosted fission device.

The fusion reaction was only used to create a neutron burst to initiate the fission of the plutonium nuclear core. In order to



improvement of the previous design: the radiation pressure could contain the fusion reaction much longer producing large quantities of mono-energetic fast neutrons (14,2 MeV), yet still



**Fig. 2.** *Teller-Ulam design configuration with a 'dry' fusion fuel*

only a small fraction of the fusion fuel actually reacted. The significant neutron burst produced gave new opportunities – it could induce fission not only in fissile material but also in thorium, depleted uranium and a number of heavy metals. Thus, it is possible to induce fission in a non-fissile material. The Teller-Ulam design was successfully tested in operation Ivy Mike, 1952.

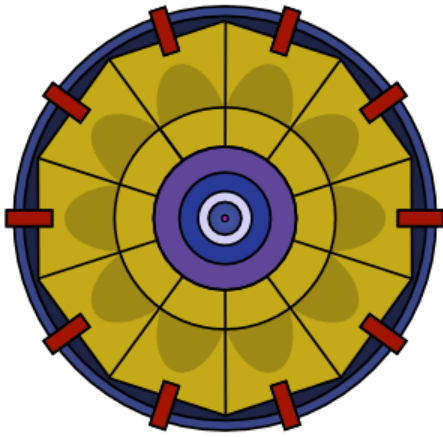
The 62-Ton Ivy Mike device was a huge three-stories-high thermonuclear installation [5]. Its core was a large container for the liquid D-T mixture with a long plutonium rod running through its center and the initiator was a fission bomb on the top. The device gave a huge 12 Megaton explosion. It had demonstrated that the concept was workable, though it was too large to be used as a weapon. It was to remain so, until in the USSR the solid thermonuclear fuel was developed.

## **2.2. Soviet fusion research**

The first Soviet nuclear weapon was an exact copy of the US Fat boy bomb thanks to the brilliant Russian intelligence operation that closely monitored the American nuclear development. It successfully broke the American nuclear monopoly but the Russians had been desperately struggling to achieve parity with the West. It was clear that in order to build more nuclear weapons their design had to be perfected: one of the major draw-backs of the first fission bombs was their core with a large cavity and a mechanically-controlled neutron source. The scientists involved in the Russian program – Yurri Khariton, Andrei Sakharov, Igor Tam, Vitally Ginzburg, Yakov Zel'dovich and Oleg Lavrentiev – as early as 1949 started to work on electronic neutron source for the bomb initiation [6]. Several concepts were designed, notably the magnetic confinement (tokamak) and the electrostatic confinement (known later as fusor, or neutron generator). The neutron generator was more suitable for a weapon use. It also allowed major improvement of the weapon design – reduced quantity of the fissile material and control of the explosion output. The Tokamak was found suitable for civil experiments.

Another major Russian break-through was the development – by Sakharov-Tam-Ginzburg trio – of the dry fusion fuel [6]. Widely known as 'the red mercury', as it was its Soviet code name, it was (and still basically is) mostly Lithium hydride enriched in Deuterium and 6-Lithium with colloidal Beryllium added. The solid fuel allowed the assembly of compact

thermonuclear devices and the first such a design was the Sakharov's 'Sloyka' or 'Layered cake', named after the popular form of pastry (Fig. 3). There, the fusion and fission components



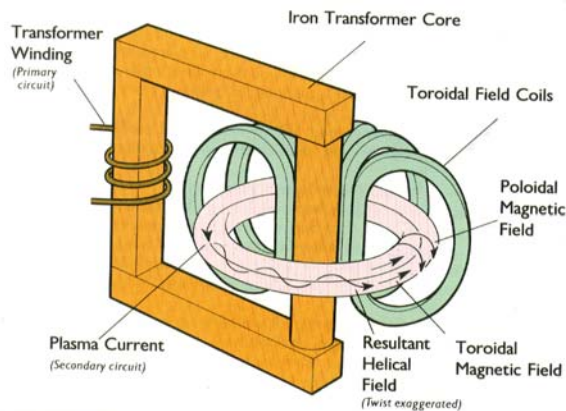
**Fig. 3.** Sakharov's 'sloyka': consecutive layers of fusion and fission fuels in the center are engulfed inside the explosive lense.

are layered sandwich-like in order to allow the consecutive capture of fast fusion neutrons in the multiple layers of fissile material. The design was successfully tested in 1953 in the form of a full-fledged nuclear bomb – RDS-6s, armed and dropped from a bomber [6,7]. Further on, the Russians tested a tube-like Teller-Ullam device in 1955. By that time the US had information on the solid fuel, so they have tested their own dry bomb in 1954.

### 3. Civil research

The civil thermonuclear research emerged from the military programs of the two Cold War superpowers in 1950s [2,8,9]. First, the magnetic confinement scheme (magnetic confinement fusion, MCF) was deemed unusable for an explosive device and was released for civil scientific pursuit in the form of z-pinch [9] and tokamak [10] machines. The tokamak designed by Andrei

Sakharov was the most promising fusion device (Fig 4). It basically is a transformer with a single secondary coil – the plasma torus. The poloidal coils induce the plasma heating current into the torus, while the toroidal coils confine the plasma to the minor axis of the torus. In order to achieve higher temperatures, additional heating may be implied – on the plasma – in the form of high-power microwaves or high-energy particle beams (the best are the neutral particles).

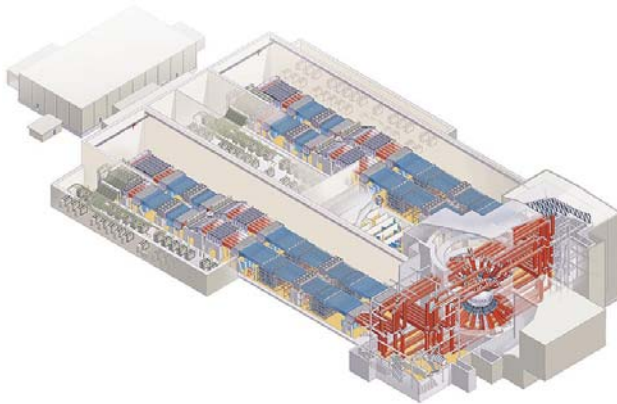


**Fig. 4.** Basic Tokamak design.

An alternative fusion scheme stands on the fringe of civil and defense research in the form of inertially confined fusion (or ICF) [2,6]. It basically is the same process that goes inside the nuclear weapons – the implosion of a converging shockwave confines the fusion – and it is still largely funded by the military and in many countries, never the less the laser confinement experiments in US LANL, in USSR Kurchatov Institute as well as in the French Commissariat à l'énergie atomique or (CEA, committee of atomic energy) were disclosed to the public since the 1960s. It is the only scheme theoretically capable of using other fuels than the D-T mixture.

The current state-of-the-art in the fusion technology – in the forms of inertial and magnetic confinement, respectively – has yet to be embodied in the form of NIF [11,12] and ITER [13] facilities. The National Ignition Facility, or NIF, is a laser-based inertial confinement fusion (ICF) research device located at the Lawrence Livermore National Laboratory in Livermore, California, United States (a lab funded by the U.S. Dept. of Energy). NIF (Fig.5)

uses powerful lasers to heat and compress a small amount of hydrogen fuel to the point where nuclear fusion reactions take place. NIF is the largest and most energetic ICF device built to



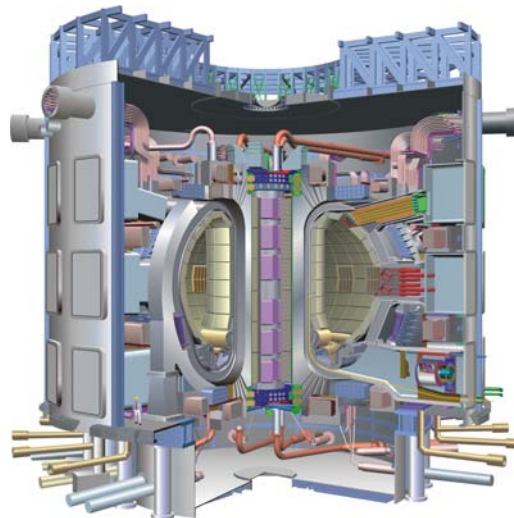
**Fig. 5.** *NIF's basic layout. The laser pulse is generated in the room just right of center, and is sent into the beamlines (blue) on either side. After several passes through the beamlines the light is sent into the "switchyard" (red) where it is aimed into the target chamber (silver). Three football fields could fit inside NIF*

date, and the first that is expected to reach the long-sought goal of "ignition" (more energy coming out than is put in).

Construction began in 1997 but was fraught with problems and ran into a series of delays that greatly slowed progress into the early 2000s. Progress since then has been much smoother, but compared to initial estimates, NIF is five years behind schedule and almost four times more expensive than budgeted. The construction of the National Ignition Facility was certified complete on 31 March 2009 by the U.S. Dept. of Energy. The first target experiments with all 192 lasers are expected in May 2009, and a dedication ceremony is scheduled for May 29. Ignition is

expected by 2010.

The International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) is an international tokamak (magnetic confinement fusion) research/engineering project (Fig. 6) that could help to



**Fig. 6.** *ITER conceptual overview: designed to produce approximately 500 MW (500,000,000 watts) of fusion power sustained for up to 1,000 seconds by the fusion of about 0.5 g of Deuterium/Tritium mixture in its approximately 840 m<sup>3</sup> reactor chamber. Although ITER is expected to produce (in the form of heat) 5-10 times more energy than the amount consumed to heat up the plasma to fusion temperatures, the generated heat will not be used to generate any electricity.*

make the transition from today's studies of plasma physics to future electricity-producing fusion power plants. On November 21, 2006, the seven participants formally agreed to fund the creation of a nuclear fusion reactor. The program is anticipated to last for 30 years — 10 for construction, and 20 of operation. ITER was originally expected to cost approximately €10bn (£9bn), but the rising price of raw materials and changes to the initial design may see that amount double. The reactor is expected to take nearly 10 years to build and is scheduled to be switched on in 2018. If completed, ITER would be one of the most expensive modern technoscientific megaprojects. Site preparation has begun in Cadarache, France and procurement of large components has started. About 90 hectares of land have been cleared since 2007 (40 hectares for the main platform), excavation of the tokamak pit is expected to begin before the end of 2009, and pouring of concrete should begin in 2010.

## Conclusion

Before the new economical crisis broke free, the fusion programs around the world were extensively marketed: they were put as a 'clean' alternative of the fission power in the face of ever growing thirst for fossil fuels. However, the crashing markets and the fall of the oil prices cast doubt of the extensive funding given to major fusion projects worldwide. This is only a superfluous perspective. For the human civilization must not just keep the status quo – when the time is right it must go to the next level of its development. The fusion technology, when it first appeared, had enormous political, economic and military importance for the whole world – it was the one thing that kept the Cold War from going hotter [5-7]. It has the potential to take the Mankind to the stars or to burn our world into ashes.

Throughout its history, people have always struggled for power and resources. The fuel of the pre-Industrial Age were the cereal foods while the coal was the choice of the Steam Age – all these resources had been intensively fought for [14]. The WWII was as much as a struggle for oil on every front – in Russia, North Africa, the Pacific and Atlantic [15]. In the year 1973, during another heavy struggle for oil, the Saudi Oil Minister Sheikh Yamani said: “The Stone Age had come to an end not because we ran out of stones”.

## References

1. H. A. Bethe (1939) *Phys Rev* **55** p 103.
2. J. Ongena and G. Van Oost (2002) *Trans Fusion Sci Technol* **41** p 3.
3. E. Fermi (1946) *Proc Am Phil Soc* **90** p 20.
4. Leslie Groves *Now it Can be Told: The Story of the Manhattan Project* (New York: Harper, 1962).
5. Greg Herken *Brotherhood of the bomb* (New York, Henry Holt & Co, 2002).
6. *Russian Nuclear Centre* ed. R. I. Yilkaev (FGUP, Sarov, 2001) [in Russian].
7. N. Ahababyan (2002) *UPBs WoP* **25** p 21 [in Bulgarian].
8. M. H. Key (2001) *Nature* **412** p 775.
9. I. V. Kurchatov (1957) *J Nucl Energy* **4** p 193.
10. C. M. Braams and P. E. Stott *Nuclear Fusion: Half a Century of Magnetic Confinement Research* (Institute of Physics Publishing, 2002).
11. John Lindl *NIF ignition physics program* (LLNL, 2005).
12. <https://laser.llnl.gov>
13. <http://www.iter.org>
14. Jared Diamond *Guns, Germs and Steel* (New York, W. W. Norton & Co)
15. Sir Basil Liddell-Hart *History of the Second World War* (New York, Putnum 1971).

## Глобални, регионални и локални екологични проблеми, свързани с промяна в състава на атмосферния въздух

Невена Кожухарова

*Департамент по приложна физика, Технически Университет – София,  
бул. “Кл. Охридски” 8, 1756 София*

Животът на нашата планета се е развил благодарение на фактът, че милиони години съставът на въздуха в долната част на атмосферата до височина 90 км. е останал с постоянен състав, което означава постоянство на основните газови компоненти (кислород  $O_2$ , азот  $N_2$  и аргон  $Ar$ , които съставляват 99.6% от състава на въздуха).

Химичният състав на атмосферата е следният:

1. Кислород  $O_2$ , азот  $N_2$  и аргон  $Ar$
2. Газове с много малка и променлива концентрация (метан, инертни газове – неон, криптон, хелий, ксенон)
3. Твърди и тежки аерозолни частици

В замърсената атмосфера имаме присъствие във въздуха на вещества в такава концентрация и в течение на такъв период от време, че могат да повлияят на здравето и дейностите на хората, на екосистемите или на климата на Земята като цяло.

По своя произход замърсяващите вещества са следните основни видове:

- Неприсъщи за естествената земна атмосфера примеси (инградиенти), внесени отвън или получени в резултат на химични реакции
- Газове, твърди или течни частици, които присъстват в естествената атмосфера, но имат безвредна концентрация. (Тя е по-малка в общия случай)

Понятието „незамърсен въздух” е условно и би било вярно при условие, че няма човешка дейност. Днес и в най-отдалечените райони, каквито са пустините, океаните и дори над полюсите) въздухът е замърсен от човешката дейност, като това замърсяване наричаме „антропогенно”.

Благоприятен факт, който спомага за почистването на атмосферния въздух е, че атмосферата „разсейва” внесените примеси като намалява концентрацията им, а може да се очисти и чрез отлагането им върху земната повърхност или чрез химични реакции.

Отлагането на земната повърхност бива следните два вида:

**А) „Мокро”:** Към него се причисляват всички видове валежи като например дъжд, снеговалеж, ниски валежи. Този вид отлагане е ефективен механизъм за почистване на атмосферата както от газове, така и от течни и твърди частици, защото падащите капки и кристали служат като уловител за тях, а освен това в процеса на образуване на капките и кристалите участват кондензационни ядра, които могат да съдържат и частици на замърсителите.

**Б) „Сухо”:** Процесът зависи силно от свойствата на подложната повърхност (почва, растителност, вода) и от свойствата на отлагащите се вещества.

За оценка на замърсяването на атмосферния въздух важна роля играе факторът „време на престой” на замърсяващите вещества. Една голяма част от замърсителите имат кратко време на престой в атмосферата, което предотвратява тяхното натрупване.

Времето на престой може да варира от по- малко от един час ( такъв е случаят за бързо изпаряващи се органични съединения , известни със съкращението VOC) до няколко десетилетия ( например за CFCs – хлоро-флуоро-въглеводородите)

Концентрацията на замърсителите се определя от три главни фактора:

**А) Параметрите на източниците**

**Б) Метеорологичните условия**

**В) Наличието на условия за химични реакции в атмосферата**

Видовете източници на замърсяване се класифицират според формата си – точкови, линейни или площни, според режима си на работа – моментни или непрекъснати, както и според височината си – ниски и високи.

Вторият фактор, определящ концентрацията на замърсителите, са метеорологичните условия, които включват турбулентността на атмосферата (тя е най-интензивна в близост до земната повърхност до височина от 1-2 км.) , както и хоризонталният пренос , т. е. ветровете, които могат да пренесат дори замърсители с кратко време на престой на големи разстояния за период от 1-2 денонощия.

Последният от трите главни фактора е наличието на условия за химични реакции в атмосферата, при което се превръщат първичните замърсители във вторични. Например газове като SO<sub>2</sub> или NO<sub>x</sub> се превръщат в киселини или частици от сулфати и нитрати. Може да се получат токсични вторични замърсители посредством силно реактивни молекули ОН или О<sub>3</sub> и други оксиданти. При всички превръщания в атмосферата е важно да се знае, че не се премахват вредните вещества, а се превръщат в други вредни вещества, които влияят по различен начин на климата, хората, животните и растенията.

Проблемите с атмосферното замърсяване се класифицират по различни признаци, но от гледна точка на устойчивото развитие на планетата най- използваната класификация е тази на Щерн от 1984 година:

| Категория на проблема         | Пространствен мащаб        | Времеви мащаб                                        | Организационен мащаб       |
|-------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------|
| Локален                       | хоризонтален<br>До 100 км. | вертикален<br>Височината на изт.(комините)<br>часове | общини<br>кметсктва        |
| Градски                       | До 100 км.                 | 1÷2 км.<br>дни                                       | градски<br>областен        |
| Регионален<br>(трансграничен) | 100÷1000 км.               | Ниска тропосфера<br>30÷50км.<br>седмици<br>месеци    | държавен<br>международен   |
| Континентален                 | Над 1000 км.               | Тропосфера и стратосфера                             | национален<br>международен |
| Глобален                      | Над 10000 км.              | атмосфера<br>десителития                             | международен               |

При локалния мащаб на замърсяванията винаги трябва да се отчита непосредствената близост на източниците и на приемниците (например улицата в голям град с множество сфетофари, интензивен автомобилен поток, образуван „уличен каньон” от високите сгради и т. н.).

Градското замърсяване се отделя от локалното, въпреки че по своята същност е такова. Причината е, че градовете са индустриални центрове с голяма концентрация на автомобилно движение и се явяват области на локални максимуми на



замърсяването. Градското замърсяване е един от най-важните съвременни проблеми на силно урбанизираните континенти като Европа и Северна Америка.

Разглеждайки в средногодишен аспект температурата в отделните градски части, ще установим, че централните райони са най-топли. Там и концентрацията на замърсителите е най-голяма. Нивото на концентрация на замърсителите намалява в крайните райони и най-ниски стойности има в извънградските местности където се достига до така нар. „регионална фоновая концентрация”. Трябва да се отбележи, че тази схема е доста опростена, тъй като не се взимат предвид доста важни фактори. В Европа в градските райони живее 70% от населението на континента (тя е най-гъсто населеният континент) и проблемите на градското замърсяване са най-много.

Концентрациите на замърсителите силно нарастват в градските райони при прекратяването на „вентилирането” на града, което в повечето дни от годината се осъществява чрез два основни механизма - на хоризонтални движения (ветровете) и на вертикални движения (турбулентност и термичната конвекция, при които замърсените въздушни маси се издигат на по-голяма височина в атмосферата, а в приземния слой се спускат чисти въздушни маси). При прекратяване на тези механизми за повече от 36 часа се получава „застой” и настъпват така наречените „епизоди”, в които се наблюдава силно увеличаване на концентрацията на замърсители. Градовете с неблагоприятно географско разположение (с вдлъбнат релеф и чести инверсии) и с мощни източници са от особен интерес, поради често достигане на опасни за здравето на хората концентрации на замърсителите. Такъв град е и София.

В студеното полугодие при мъгла се повишава концентрацията на  $\text{SO}_2$  и се образува сернокиселинен смог или както е известен още „Лондонски” смог. Това е характерно и за градове като Лайпциг, Берлин, Одеса, Донецк, Рига, Истанбул. В много от тези градове се използват твърди горива за отопление през зимата и това води до отделянето не само на серен диоксид, но и на  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$ , сулфати, нитрити, частици сяра и азотна киселини и др.

В горещи дни с нарушена циркулация на атмосферния въздух се образуват токсични фотохимични оксиданти под действието на UV радиацията, които могат да се индикират по един от тях – приземен  $\text{O}_3$ . Явлението е известно като „Фотохимичен летен смог”. Наблюдава се още повишена концентрация на  $\text{NO}$  от автотранспорта, който се превъща в  $\text{NO}_2$  в реакция с  $\text{O}_3$ . Процесите са сравнително бавни и може да се достигне до високи нива на замърсяването. Явлението е характерно за градове, намиращи се близо до бреговете на море или океан и имащи затворена циркулация – в случая бриз. Такива градове са Барселона, Атина и Солун.

Интересно е какво е положението в София:

На територията действат над 1000 предприятия, а над 200 от тях емитират значителни количества замърсители. Освен „Кремиковци” практически всички останали предприятия са в непосредствена близост до жилищни квартали, а дори и в тях. От промишлеността се отделят:

- Серни, азотни и въглеродни оксиди
- Токсична и нетоксична прах (в която има и метали: олово, мед, цинк и др.)
- Канцерогенни вещества (сажди, асфалт, различни смоли).

Концентрацията на прахови частици в атмосферата за района на София е голяма и това е свързано не само с промишлените източници, но и с лошата хигиена на уличните платна и при извършването на ремонтни работи. Като цяло замърсеността на въздуха за района на София е висока.

Проучвания и наблюдения на качеството на атмосферния въздух в София се правят от 1950 година насам, а от 1963 година се правят редовни измервания под контрола на МОСВ, които са за нуждите на Националната система за мониторинг.

За локалните мащаби на замърсяването е важно да се знае каква е директната вреда, а за регионалните замърсявания, където концентрациите на замърсителите са значително по-малки, е важно да бъде направена оценка на неблагоприятното въздействие върху природните екосистеми, включително и земеделските. Може да се даде пример с „подкиселяването” и замърсяването на почвите и повърхностните води, което се получава при мокро или сухо отлагане на азотен оксид, серен и азотен диоксид, сулфати и нитрати. Повишената киселинност се отразява пагубно на горските масиви и е силно изразено в северните райони и по-слабо изразено в районите до Екватора.

Основните глобални проблеми, които са резултат от изменения в състава на атмосферата са:

1. Допълнителен парников ефект
2. Изтощаването на озоновия слой.

Озонът се намира в атмосферата от височина 10÷15 км. до 50 км. и има максимум между 19 и 23 км. височина. На всеки 10 милиона молекули въздух само 3 са озон. Озонът има жизнено важна роля за живота, тъй като създава „радиационен щит”, а освен това има значение за топлинния режим на планетата, поглъщайки UV слънчева радиация, която е 15% от сумарната слънчева енергия. Озонът е в динамично равновесие от милиони години. Той се образува при фотодисоциацията на кислородната молекула, а се разрушава от вещества, съдържащи H, N, Cl, O. В близост до земната повърхност озонът се нарича „лош” и е вреден за здравето, тъй като причинява възпаления на очите и на белите дробове. Неговото съдържание в 40м. приземен слой е около 10% от общото съдържание на озон в атмосферата. През последните десетилетия се наблюдава увеличаване на съдържанието на озон в приземния слой с около 1.7%, но моментната му концентрация му силно зависи от няколко фактора, между които са гръмотевичните бури и интензивността на автомобилното движение.

Изследванията на съдържанието на озон във високите слоеве на атмосферата през последните 20 години показват стабилна тенденция на намаляване на съдържанието му за цялата планета с няколко процента – в различните източници данните варират между 3 и 7%. Намаляването на съдържанието на озон с 1% практически означава 1.3% повече UV лъчение, което достига до земната повърхност. В същото време се наблюдава тенденция на увеличаване на съдържанието на „лош” озон в ниските слоеве на атмосферата – в следствие на антропогенните фактори за последните 100 години съдържанието му се е увеличило два пъти. За съжаление нарастването на концентрацията на тропосферния „лош” озон не може да компенсира изтъняването на озоновия слой в стратосферата.

#### Литература:

1. Stern et al., Fundamentals of Air Pollution, Acad. Press Inc., 1984
2. European Energy and Climate Policy, Long-Term Objectives and Medium-Term Means, 2007
3. Urban Air Pollution Monitoring and Control Strategies, NATO ASI, 1999
4. Сборник материали от XXX Нац. Конф. по въпросите на обуч. по физика, Пловдив, 2002

## Механизъм на 160-мин. радиални пулсации на слънцето

Иван Т. Иванов<sup>1</sup>, Валентина Т. Танева-Тончева<sup>2</sup>, Борис Комитов<sup>3</sup>, Радостина Ташева<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Катедра Физика и Биофизика, Медицински факултет на Тракийски университет,  
Стара Загора*

<sup>2</sup>*Департамент по приложна физика, Технически Университет – София,  
бул. “Кл. Охридски” 8, 1756 София.*

<sup>3</sup>*Институт за космични изследвания, ЦЛКИ към БАН, Стара Загора*

Видимият диаметър на Слънцето трепти с период 160 минути. Същата периодичност е установена в много параметри на слънчевото излъчване. За обяснение на тези надлъжни радиални пулсации, използвахме уравнението за състояние на слънчевите недра, което след линеаризиране се превръща в уравнение на хармоничния осцилатор. Това уравнение позволява радиални пулсации, чийто период на трептене и дължина на вълната бяха пресметнати, използвайки регресионни изрази за газовото налягане и плътност за различните слоеве. Пулсациите започват от повърхността на активната зона и се разпространяват до литосферата, където търпят пълно вътрешно отражение, образувайки стоящи вълни под слънчевата повърхност с период около 150 мин.

### I. Увод

След откриването на 160-мин. радиални колебания на Слънцето до днес са установени многочислени данни за тяхното влияние върху слънчевата физика [1,2]. 160 - мин. пулсации се наблюдават в амплитудата на радио- и инфрачервеното излъчване от спокойните участъци на Слънцето, а също и в излъчването в оптичната област [3]. Наблюдаваните колебания в радиояркостта на Слънцето с период 160 мин закъсняват спрямо 160 - мин радиални движения с около 12 мин [3]. В [4] се съобщава за наблюдение на 160-мин вариации в диференциалната интензивност на ИЧ - лъчението при 1.65 nm с амплитуда около 0.02 % от средната интензивност. Установени са и 160 -мин вариации в кръговополяризираното радиоизлъчване на Слънцето при 13.5 mm с амплитуда 0.003 % от средната, които закъсняват с около 34 мин спрямо колебанията на лъчевата скорост [5].

Тези наблюдения не могат да се обяснят с ефекти, свързани със земната атмосфера [6]. Все още липсва общоприета теория за произхода на радиалните колебания на Слънцето. Правени са опити те да се обяснят чрез особеностите на радиалния пренос на енергия [7], на основата на нелинейни ефекти - резонансна връзка между слънчевите гравитационни модове [8] и даже чрез допускане съществуването на специална у-планета, обикаляща на 20 000 km под Слънчевата повърхност [9]. По-долу ние предлагаме модел, основан на линеаризиране на уравненията за състоянието на Слънцето и представящ радиалните колебания като стоящи вълни, генерирани от повърхността на активната зона и отразяващи се от слънчевата повърхност, където те имат период 160 - мин.

### II. Описание на механизма.

Равновестното състояние на звездните недра се намира като решение на система от основни уравнения, описващи физичните процеси и състоянието на звездната плазма. Известни са няколко решения на тази система, които дават равновестните стойности на налягането  $P$ , плътността  $\rho$ , температурата  $T$  и др., като функция на отстоянието от центъра на Слънцето  $r$ . Тези решения са осреднени в обобщения модел [10], който ще използваме по-нататък.

Състоянието на недрата на Слънцето представлява устойчиво равновесие. Ако тънък сферичен слой, намиращ се на разстояние  $r$  от центъра на Слънцето бъде изместен

от своето равновесно положение, ще възникне затихващо трептене. Нека пресметнем честотата на този колебателен процес. Уравнението за движение на този слой ще бъде

$$-\rho \cdot (\partial^2 r / \partial t^2) = \partial P / \partial r + \rho \cdot G \cdot m / r^2 \quad (1)$$

където  $m$  е масата на веществото, намиращо се под слоя. Нека този слой е изместен адиабатно от равновесното си положение  $r$ . Ако отместването  $\Delta r$  е пренебрежимо малко спрямо  $r$ , изменението на градиента на налягането ще бъде

$$\partial P / \partial r = (\partial P / \partial r)_{r=r_0} + (\partial^2 P / \partial r^2)_{r=r_0} \cdot \Delta r + o(\Delta r^2) \quad (2)$$

Поради промяната на отстоянието от центъра, силата на тежестта също ще се измени съгласно уравнението

$$1 / r^2 = 1 / r_0^2 \cdot (1 - 2 \Delta r / r_0) + o[(\Delta r / r_0)^2] \quad (3)$$

Заместваме уравненията (2) и (3) в (1) и след въвеждане на нова променлива  $x = \Delta r / r_0$  получаваме:

$$\partial^2 x / \partial t^2 + (1 / \rho_0 \cdot \partial^2 P / \partial r^2 - 2 \cdot G \cdot m / r_0^3) \cdot x = 1 / r_0 \cdot \rho_0 \cdot (\partial P / \partial r) - G \cdot m / r_0^3 \quad (4)$$

Дясната страна на това уравнение е равна на нула поради наличието на хидростатично равновесие при  $r_0$  и приравнявайки на нула лявата страна, получаваме известното уравнение на хармоничния осцилатор. За честотата на радиалните адиабатични пулсации получаваме израза

$$f^2 = 1 / \rho \cdot (\partial^2 P / \partial r^2) - 2 \cdot G \cdot m / r^3 \quad (5)$$

а периодът на пулсациите ще бъде  $T = 2\pi / f$ . Несъмнено, тези пулсации ще бъдат затихващи, ако липсва източник на енергия за тяхното непрекъснато подновяване.

Подобна теория е развита за пулсирането на променливите звезди. При тях, амплитудата на трептене и скоростта на трептене са изключително големи [11], поради което е абсолютно задължително трептенията да имат еднаква амплитуда, честота и фаза в целия обем на звездата. При Слънцето, амплитудата на колебание на слънчевия диаметър е само няколко километра, а измененията на лъчевата скорост - няколко m/s, което е с около три порядъка по-малко спрямо пулсиращите звезди. Това позволява колебанията на отделните слоеве във вътрешността на Слънцето да се извършват с различна амплитуда, честота и фаза, както се дава от формула (5).

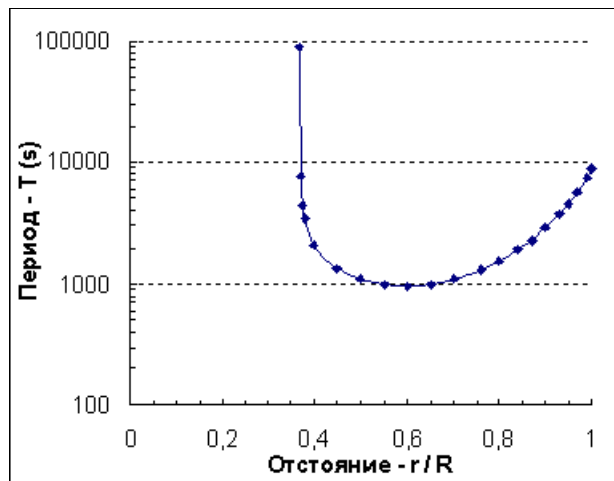
### III. Резултати

Периодът  $T$  на радиалните пулсации за отделните слоеве на Слънцето може да се изчисли по формула (5). За целта предварително трябва да се намерят  $P$ ,  $\rho$  и  $m$  като функция на относителното разстояние  $y = r / R$  от центъра на Слънцето. Използвайки обобщения модел [10] и на основата на 16 цитирани стойности, за всяка една от тези величини намерихме регресионни изрази, представени в Таблица 1. Точността на тези изрази е добра, което се оценява по получените стойности на коефициента на корелация  $K_r$ , фактора на достоверност  $F$  и вероятностното тегло  $P_w$ .

**Табл.1. Регресионни формули за плътността  $\rho$  и газовото налягане  $P$  във вътрешността на Слънцето като функции на относителното отстояние  $y = r / R_0$  от центъра на Слънцето. С  $m$  е означена масата**

на тази част от Слънцето, която се намира под концентричен слой с радиус  $r$ . С  $R_0$  и  $M_0$  са означени радиусът и общата маса на Слънцето. Точността на регресионните формули се потвърждава от стойностите на коефициента на корелация  $Kr$ , фактора на достоверност  $F$  и вероятностното тегло  $Pw$ .

| Регресионна формула                    | $Kr$  | $F$  | $Pw$    |
|----------------------------------------|-------|------|---------|
| $m = M \cdot (2.84 y - 1.70 y - 0.06)$ | 0.991 | 52.1 | 4.10    |
| $P = \exp(38.94 - 24.68 y)$            | 0.92  | 6.08 | 0.0008  |
| $\rho = \exp(3.85 - 17.36 y)$          | 0.942 | 8.28 | 0.00015 |



Фиг. 1. Период  $T$  на радиалните пулсации във вътрешността на Слънцето като функция на относителното отстояние  $r/R_0$  от центъра.  $R_0$  е радиусът на Слънцето.

Периодът на радиалните пулсации  $T$  е показан на Фиг. 1 като функция на отстоянието от центъра на Слънцето. Както е известно, вътрешността на Слънцето се разделя на три зони; активно ядро, междинна зона и конвективна зона, съобразно характера на процесите протичащи в тях. Тези три зони ясно се открояват и на показаната фигура. Навсякъде в обширната междинна зона могат да възникнат пулсации с почти еднакъв период от около 1000 s. На границата между активната и междинната зони периодът на пулсациите разте и клони към безкрайност. Вътре в активната зона ( $y \leq 0.32$ ) пулсации не могат да възникнат, тъй като се получава, че  $f^2 < 0$ . Може да се приеме, че вътре в активната зона пулсациите ще имат период равен на безкрайност. На границата между активната зона и междинната зона се получават пулсации, при това с рязко нарастваща честота при слабо отдалечаване от междинната граница. Това може би показва, че пулсациите се пораждат, т.е., енергийният източник на пулсациите се намира на границата между активната и междинната зона. Физически това е допустимо, тъй като повърхността на активната зона трябва да се характеризира с висока нестабилност. В зоната на конвективен пренос, периодът на пулсациите бавно разте и на самата повърхност на Слънцето достига до 8900 s. Тази стойност се отличава с около 8 % от експериментално установения период от 160 мин, което подкрепя справедливостта на представения модел.

#### IV. Обсъждане на резултатите

Според този модел, радиалните пулсации на Слънцето възникват като хармонични колебания на вътрешните слоеве, дължащи се на нарушаване на динамичното равновесие на силите. Енергийният източник на тези нарушения вероятно се намира на повърхността на активната зона, откъдето те се разпространяват навън със скоростта на звука. Скоростта на разпространение на звука  $C$  във вътрешните слоеве може да се пресметне по формулата  $C = (P/\rho)^{1/2}$ , използвайки получените регресионни зависимости за налягането  $P$  и плътността  $\rho$  на плазмата в отделните слоеве от Табл. 1 (не е дадено). Очевидно, произведението  $T \cdot C = \lambda$  ще бъде дължината на получената механична вълна  $\lambda$ . Замествайки получените стойности на  $T$  и  $C$  се получава неочакваният и много интересен резултат, че дължината на вълната на тези механични пулсации ще бъде практически една и съща от мястото, където те възникват (повърхността на активната зона) до крайната точка на своето разпространение (повърхността на Слънцето), т.е.,  $\lambda = T \cdot C \cong \text{const}$ .

Достигайки до повърхността на Слънцето, механичните пулсации със сигурност търпят пълно отражение от слънчевата атмосфера (хромосферата) без смяна на фазата и образуват стоящи вълни, тъй като условието за отражение и образуване на стоящи вълни ( $\lambda > 4\pi H$ ) при тези условия се изпълнява извънредно силно. В тази формула  $H$  е височината на еднородния слой (хромосферата), от който настъпва отражението. Тъй като  $\lambda$  е практически една и съща за отделните слоеве, стоящата вълна може да се образува не само непосредствено под хромосферата, но и на значителна дълбочина във вътрешните слоеве на Слънцето. Следователно, отразените от повърхността механични вълни няма да гасят идващите отдолу, а ще ги усилват. Образованата по този начин стояща вълна може да засегне в силна степен всички физични процеси в близост до повърхността на Слънцето и да индуцира появата на една променлива компонента с период около 130 мин във техните параметри. Това може да обясни и посочената по-горе променлива компонента в параметрите на голям брой наблюдавани процеси, както и на самото пулсиране на видимия диаметър на Слънцето.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Severny A. B., V. A. Kotov, T. T. Tsap. Nature (1976) Observations of solar pulsations. № 5539, v. 259, pp. 87-89
2. Scherrer P. H., J. M. Wilson (1983) Structure of the solar oscillations with period near 160 - minutes. Solar Phys., v.82, pp. 37-42
3. Kotov V. A., A. B. Severny, T. T. Tsap, I. G. Moiseev, V. A. Efanov, H. S. Nesterov. (1983) Manifestation of the 160-min solar oscillations in velocity and brightness (optical and radio observations). Solar Physics, v. 82 pp. 9-19
4. Kotov V.A., S. Kouchmy, G. Kouchmy (1983) Observation of global 160 -min infrared (differential) intensity variation of the Sun. Solar Physics, v. 82, pp. 21-35
5. **The most resonant pulsation frequency of  $\delta$ Scuti stars**  
Astronomische Nachrichten: A Journal on all Fields of Astronomy Volume 318, Issue 2,  
Date: 1997, Pages: 121-128  
S. V. Kotov Jr., V. A. Kotov
6. **The origin of long-period Alfvén waves in the solar wind**  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters Volume 362, Issue 1,  
Date: September 2005, Pages: L35-L39  
T. V. Zaqarashvili, G. Belvedere



7. Efanov V. A., V. A. Kotov, I. G. Moiseev, N. S. Nesterov, A. B. Severny (1983) Reports of Krim astrophysical observatory, v. 67, pp. 111-118
8. Hill H. A., T. J. Boss, T. P. Candel (1983) On the origin of oscillations in a solar diameter observed through the Barth's atmosphere: a terrestrial atmospheric or a solar phenomenon. Solar Physics, v. 82, pp. 129 - 138
9. Christensen - Dalsgaard J., S. Frandsen (1983) Radiative transfer and oscillations of the Sun. Solar Physics, v. 82, pp. 165-204
10. Dsiombovsky W. (1983) Resonant coupling between solar gravity modes. Solar Physics, v. 82, pp. 253-266
11. Blinnikov S. I., M. Yu. Khlopov (1983) Excitation of the solar oscillations by objects consisting of  $\gamma$ -matter. Solar Physics, v. 82, pp. 383-385
12. Allen C. W. (1973) Astrophysical Quantities. University of London. The Athlon Press.
13. Cox J. P. In: Theory of stellar pulsations. Princeton, New Jersey, Princeton University Press, 1980

## Черни дупки

Димитър Томов Димитров

*Факултет за германско инженерно обучение и промишлен мениджмънт (ФаГИОПМ)  
Технически Университет – София, бул. “Кл. Охридски” 8, 1756 София*

Черните дупки се смятаха за чудовищата на Вселената, поглъщащи всичко около тях в един яростен пир. Но сега астрономите мислят, че те не са толкова космическа заплаха, колкото един фундаментален фактор за образуването и еволюцията на галактиките.

**Черната дупка** е струпване на огромна маса в малък обем с толкова силно гравитационно поле, че втора космическа скорост е по-голяма от тази на светлината. Поради това дори и светлината не е в състояние да преодолее тази скорост, оттам и името „черна“ дупка. В рускоезичната литература се нарича още „колапсар“, понеже на руски придобива неприлично звучене. Наименованието е широко разпространено, въпреки че не става дума за „дупка“ в обичайния смисъл, а по-скоро за област в пространството, която поглъща всичко в непосредствена близост и нищо не може да я напусне след това.

***Втора космическа скорост** е физическа величина, която при дадено гравитационно поле и определено положение в него представлява **минималната скорост**, която трябва да има обект без допълнителна **тяга**, намиращ се в това положение, за да преодолее полето и да се отдалечи до **безкрайност**.*

Съществуването на черни дупки се допуска в общата теория на относителността. Според нея никаква материя или информация не може да проникне от вътрешността на черна дупка до външен наблюдател, т.е. оттам не може да се извлече никаква маса или да се получи образ или друга информация за материята вътре в черната дупка. Квантовата механика допуска някои отклонения от това правило.

Ние можем да видим нещата, които тези грамадни космически прахосмукачки всмукват. Всичко, което доближи черна дупка, първо бива разкъсано на парчета от огромната гравитация, а после става част от плосък въртящ се диск и завършва пътя си по спирала към самата дупка.

Когато останките доближат средата на черната дупка тяхната скорост се увеличава и те започват да се блъскат една о друга. Поради триенето материалът се загарява и се отделят рентгенови лъчи, които ние можем да засечем. Ако черната дупка е наистина голяма и в диска ѝ има много останки, тогава тя може да излезе на показ като един от най-ярките обекти във Вселената — **квазар**.

Има два основни типа черни дупки — звездни и свръхмасивни. **Звездните черни дупки** са останки от масивни умряли звезди, които са загинали с имплозия. Най-близката до нас такава е част от бинарна система, наречена Cygnus X-1, открита през 1971 г. Намира се в съзвездие Лебед. По приблизителна оценка в нашата галактика има милиони такива черни дупки. От друга страна, **свръхмасивните черни дупки** могат да имат първоначални маси милиони пъти по-големи от тази на Слънцето. Днес учените мислят, че е вероятно по една такава черна дупка да се спотайва в сърцето на всяка една галактика и да е неделима част от еволюцията ѝ. Освен това може да съществуват и други видове като **мини черни дупки**, с обем по-малък от този на атом, но с маса колкото цяла планина. Или

пък средни по размер черни дупки (някъде между звездните и свръхмасивните). Не е изключено да има и *бели дупки* — обратното на черните — които изхвърлят материя и енергия във Вселената. Това е още една от загадките на космоса, които очакват да бъдат разкрити.

Тъй като нищо не може да напусне черната дупка, то не е възможно наблюдател извън нея да добие информация за процеси, ставащи във вътрешността ѝ. Черните дупки нямат наблюдаеми външни свойства, които да могат да бъдат използвани, за да се определи какво става във вътрешността им. Според класическата *обща теория на относителността*, черните дупки могат да бъдат характеризирани изцяло с три параметъра — **маса, момент на импулса и електрически заряд**.

*Обичайното разбиране за черните дупки се базира на идеята за **пространство-време от общата теория на относителността**, тъй като най-важните им свойства са свързани с изкривяване на геометрията на окръжаващото ги време-пространство. Идеята за липса на индивидуални отличителни белези на черните дупки се заражда първоначално като предположение направено от **Бакенищайн**, по-късно потвърдено от **Картър, Вернер Израел, Робинсън и Хокинг** и придобива известност като „**теорема за липса на коса**“. Нейно следствие е може би безвъзвратното загубване на информация зад непреодолимата граница на хоризонта на събитията. Запазването на изобщо никакви характеристики се обяснява с определянето им чрез далекодействащи полета, а именно — гравитационно (маса, момент на импулса) и електромагнитно (електричен заряд).*

### **Хоризонт на събитията**

Въображаемата сферична повърхнина, ограждаща цялата маса на черната дупка се нарича **хоризонт на събитията**. На хоризонта на събитията втора космическа скорост е равна на скоростта на светлината. По този начин нищо от вътрешната страна на хоризонта на събитията, включително фотоните, не може да преодолее хоризонта на събитията поради извънредно силното гравитационно поле. Частици извън тази област могат да падат вътре, пресичайки хоризонта на събитията, без да могат отново да го напуснат.

Изкривяването на време-пространството в силни гравитационни полета води до **забавяне на времето**. Това явление е установено експериментално през **1976**. В близост до черна дупка, забавянето на времето се увеличава силно. От гледна точка на външен наблюдател изглежда, че е необходимо безкрайно дълго време за приближаване на обект до хоризонта на събитията, в който момент светлината, идваща от него е безкрайно **червено-отместена**. За отдалечен наблюдател изглежда, че обектът, падайки все по-бавно, доближава, но никога не достига, хоризонта на събитията. От гледна точка на самия падащ обект, обаче, времето за достигане на хоризонта на събитията и достигане на сингулярността е крайно.

Широко разпространена заблуда е, че обекти извън хоризонта на събитията се „засмукват“. Тяло, извън хоризонта на събитията, ще изпитва същото гравитационно въздействие от черната дупка, като от кое да е тяло с такава маса (съществуват звезди, по-масивни от някои черни дупки). При превръщането си в черна дупка, звездата не печели маса - т.е. масата на черната дупка е равна на тази на прогенитора ѝ.

## Сингулярност

Сингулярност - точка, в която пространство, време и всички физични закони се разпадат. В центъра на хоризонта на събитията съществува **сингулярност**, място, където според общата теория на относителността, пространство-времето има безкрайна кривина (т.е. гравитацията става безкрайно силна). Пространството във вътрешността на хоризонта на времето е особено с това, че сингулярността е буквално единственото възможно бъдеще, така че всички частици трябва да се движат към нея. Това означава, че има концептуална неточност в нерелативистичната идея за черна дупка, предложена първоначално от Джон Мичъл през 1783. Според него втора космическа скорост е равна на скоростта на светлината, но все пак е теоретично възможно от черната дупка да бъде изваден обект (например като се изтегли с въже). Общата теория на относителността елиминира тази възможност, защото след влизането му отвъд хоризонта на събитията, времевата линия на обекта съдържа крайна точка на самото време и никоя възможна мирова линия не пресича хоризонта на събитията.

## Падане в черна дупка

Да си представим, че злощастен космонавт пада радиално към центъра на проста шварцшилдова (невъртяща се) черна дупка. Колкото повече се приближава към хоризонта на събитията, толкова по-дълго е нужно на излъчваните от него фотони да излязат от гравитационното поле на черната дупка. Далечен наблюдател би видял как спускането на космонавта се забавя, докато приближава хоризонта на събитията, като че ли без никога да го достига.

Въпреки това в собствената си **отправна система** космонавтът ще пресече хоризонта на събитията и ще достигне сингулярността в краен период от време. След пресичането на хоризонта, той вече няма да може да бъде наблюдаван от външната вселена. Докато пада, той ще забележи как краката му постепенно стават все повече червено-отместени, докато станат невидими. При доближаване до сингулярността, **градиентът** на гравитационното поле от главата до краката му ще стане значителен и той ще се чувства разтегнат и, в крайна сметка, разкъсан. Този процес е известен като спагетизация. В близост до сингулярността градиентът става достатъчно голям, за да разкъсва атоми. Точката, в която тези приливни сили стават фатални, зависи от размера на черната дупка. За много голяма черна дупка, като предполагаемо намиращите се в **центъра на галактиките**, точката се намира доста навътре от хоризонта на събитията, така че космонавтът може да го премине безболезнено. Обратно, при малка черна дупка тези приливни ефекти могат да станат фатални дълго преди достигането на хоризонта на събитията.

## Въртящи се черни дупки

Според теорията хоризонтът на събитията на черна дупка, която не се върти, е **сферичен**, а сингулярността и (казано неформално) е **точка**. Въртящите се черни дупки имат 2 хоризонта на събитията. Прието е външният да се нарича **граница на стационарност**, а вътрешният **хоризонт на събитията** е този, който обгражда идеалната сфера, ако черната дупка не се върти. При полюсите те се припокриват.

Областта между границата на стационарност и хоризонта на събитията се нарича **ергосфера**. Тъй като ергосферата се намира извън хоризонта на събитията, е възможно съществуването на обекти в нея, без задължително да падат в дупката. Въпреки това,

поради движението на самото пространство-време в ергосферата, за тези обекти е невъзможно да остават на постоянно място. Обектите в ергосферата могат при определени обстоятелства да бъдат изхвърлени навън с голяма скорост, извличайки **енергия** (и ъглов момент) от дупката, откъдето идва и наименованието ергосфера („сфера на работа“).

### Ентропия и лъчение на Хокинг

През **1971 Стивън Хокинг** показва, че **общата площ** на хоризонта на събитията на произволна група класически черни дупки не може да намалява. През 1974 Хокинг прилага **квантовата теория на полето** към полукласическо изкривено пространство-време и установява, че черните дупки могат да излъчват топлинни лъчи, известни като **лъчение на Хокинг**. По-късно е установено, че черните дупки са обекти с максимална ентропия, което означава, че максималната ентропия на част от пространството е ентропията на най-голямата черна дупка, която може да се събере в него. Лъчението на Хокинг се генерира точно извън хоризонта на събитията и не носи информация за вътрешността ѝ. Все пак това означава, че черните дупки не са напълно черни. Нещо повече, от ефекта следва, че черните дупки бавно се изпаряват с времето. Въпреки че тези ефекти са пренебрежими за обекти с астрономически размери, те са значителни за хипотетично много **малки черни дупки**, където преобладават квантовите ефекти. Очаква се малките черни дупки да претърпят бързо изпарение и да изчезнат в експлозия на радиация. Следователно всяка черна дупка, която не може да консумира нова маса, има крайно време на живот, което е функция от масата ѝ.

### История

Идеята за тяло, толкова масивно, че дори светлината да не може да го напусне, е предложена за пръв път от **английския геолог Джон Мичъл** през **1783**. По това време Нютоновата теория за гравитацията и идеята за втора космическа скорост са добре известни. Мичъл изчислява, че тяло с радиус 500 пъти по-голям от този на Слънцето, и със същата плътност, би имало на повърхността си втора космическа скорост, равна на скоростта на светлината и, следователно, би било невидимо. Както казва той:

*Ако кълбо със същата плътност като Слънцето има 500 пъти по-голям радиус, и ако светлината се привлича по начина, по който се привличат и другите тела, то цялата излъчена от такова тяло светлина би се върнала обратно върху него под действието на собствената му гравитация.*

През **1796** френският математик **Пиер-Симон Лаплас** предлага същата идея в първото и второто издание на книгата си *Exposition du Système du Monde*. Тя изчезва в следващите издания на книгата. Идеята за черни дупки не привлича голямо внимание през 19 век, тъй като светлината се счита за безмасова вълна, която не се влияе от гравитацията.

През **1915** **Алберт Айнщайн** излага общата теория на относителността. В нея той излага хипотезата, че нормалното пространство и, като следствие, пътят на светлинните лъчи се изкривява в близост до големи гравитационни обекти.

През 1920-те **Субраманиан Чандрасекар** твърди, че според **специалната теория на относителността** неизлъчващо тяло над определена маса, известна днес като **граница на Чандрасекар**, би колапсирало. Известният по това време астроном **Артър Едингтън** се противопоставя на това твърдение, смятайки, че нещо неизбежно би предотвратило такъв колапс. През **1939 Робърт Опенхаймер** и Снайдер предвиждат, че масивни **звезди** могат

да претърпят драматичен **гравитационен колапс**. Известно време тези обекти са наричани **замръзнали звезди**. Интересът към обекти, претърпели гравитационен колапс, оживява през **1967** с откритието на **пулсарите**. За пръв път изразът "черна дупка" се употребява от физика-теоретик **Джон Уилър**. До този момент понякога се използва термина **черна звезда**.

През 1939 Робърт Опенхаймер и Снайдер предвиждат, че масивни звезди могат да претърпят драматичен гравитационен колапс. Известно време тези обекти са наричани **замръзнали звезди**, тъй като колапсът би се наблюдавал като бързо забавяне и силно почервяване около радиуса на Шварцшилд. Въпреки това тези хипотетични обекти не са предмет на голям теоретичен интерес до края на 60-те години на XX век.

Интересът към обекти, претърпели гравитационен колапс, оживява през **1967** с откритието на пулсарите. За пръв път изразът "черна дупка" се употребява от физика-теоретик Джон Уилър. До този момент понякога се използва термина **черна звезда**. Черна звезда се появява и в първите епизоди на Стар Трек.

### **Съществуват ли черни дупки?**

**Общата теория на относителността**, както и повечето други метрични теории за гравитацията, не само твърди, че черни дупки могат да съществуват, но всъщност предвижда, че те ще се образуват в природата, стига достатъчно **маса** да се натрупа в дадена област от **пространството**, чрез процес, наречен **гравитационен колапс**. С натрупването на маса в определена област от време-пространството, **гравитацията** ѝ става все по-силна. Когато втора космическа скорост на дадено разстояние от центъра достигне скоростта на светлината, там се образува **хоризонт на събитията**, вътре в който масата неизбежно пада към една точка, образувайки сингулярност.

### **Могат ли да бъдат открити?**

Според теорията черните дупки не могат да бъдат открити по светлината, която се излъчва или отразява от материята вътре в тях. Те все пак могат да се забележат чрез явленията около тях, като **гравитационните лещи** или звезди, които изглежда, че се въртят около пространство, където няма видима материя. Смята се, че най-очевидните ефекти са при падането на материя в черна дупка, която (подобно на вода, изтичаща в канализацията) се очаква да се събира в извънредно горещ и бързо въртящ се **акреционен диск** около обекта преди да бъде погълнат от него. Триенето между съседните зони на диска го нагорещява извънредно и той излъчва големи количества **рентгенови лъчи**. От друга страна акреционни дискове, струи и орбитиращи обекти се наблюдават не само около черните дупки, но и около други обекти, например **неутронни звезди**. Динамиката на телата около тези обекти е до голяма степен, макар и не напълно, идентична с динамиката на телата около черните дупки. Затова обикновено наблюденията на акреционни дискове и орбитални движения просто показват мястото на компактен обект с определена маса и не говорят много за природата на този обект. Идентификацията на даден обект като черна дупка изисква допускането, че никой друг обект или свързана система обекти не може да бъде толкова масивен и компактен. Повечето астрофизици приемат това, тъй като според общата теория на относителността всяка концентрация на маса с достатъчна плътност трябва да колабира в черна дупка.

Важна наблюдаема разлика между черните дупки и други компактни масивни обекти е, че всяка падаща върху вторите материя би се сблъскала с тях при релативна скорост,

предизвиквайки неравномерни избухвания от рентгенови лъчи и друга силна радиация. Така липсата на такива избухвания около компактна концентрация на маса свидетелства, че обектът е черна дупка.

### Открити ли са черни дупки?

Днес има голямо количество непреки астрономически наблюдения на черни дупки в два обхвата на масите:

- звездна черна дупка с маси на типична звезда (4 до 15 пъти тази на Слънцето)
- свръхмасивни черни дупки с маси може би 1% от масата на типична галактика

Освен това има известни свидетелства за черни дупки с междинни маси, с няколко хиляди слънчеви маси. Те може би са в основата на образуването на свръхмасивните черни дупки.

Първите кандидати за масивни черни дупки са **активните галактични ядра** и **квазарите**, открити от **радиоастрономите** през 1960-те. Ефективното преобразуване на маса в енергия при триенето в акреционния диск на черна дупка изглежда е единственото обяснение за изобилната енергия, генерирана от такива обекти. След наблюдения на движенията на звезди около центъра на галактиките през 1980-те се предполага, че свръхмасивни черни дупки съществуват в центъра на повечето галактики, включително **Млечния път**. **Sagittarius A\*** днес се приема за най-правдоподобният кандидат за място на свръхмасивна черна дупка в центъра на Млечния път.

Днес се счита, че всички галактики могат да имат свръхмасивни черни дупки в своя център и че тази черна дупка поглъща газ и прах, генерирайки огромни количества електромагнитно лъчение, докато цялата близка маса бъде погълната и процесът спре. Това обяснява и защо в близост до тях няма квазари.

Има някои предпазливи сведения за образуването на **малки черни дупки** на Земята в **ускорители за частици**, но това все още не е потвърдено. До момента няма наблюдавани кандидати за **първични черни дупки**.

### Скорошни открития

През **2004** е открито предполагаемо струпване на черни дупки, което разширява разбирането ни за разпределението на черните дупки във **Вселената**.

През юли 2004 астрономи откриват обект, за който предполагат, че е гигантската черна дупка Q0906+6930 в центъра на **галактика** в съзвездието **Голяма мечка**. Размерът и оценките за възрастта на черната дупка могат да помогнат за определянето на възрастта на Вселената.

През ноември 2004 група астрономи съобщава за откритието на първата черна дупка с междинна маса в нашата Галактика, движеща се по орбита на разстояние три светлинни години от **Sagittarius A\***.

*Наскоро обаче изследователи от университета Case Western Reserve в Кливланд, Охайо, обявиха смайващо откритие: **Черни дупки може въобще да не съществуват!***



Според теорията черните дупки са компактни обекти с толкова силна гравитация, че поглъщат всичко, преминало *хоризонта на събитията* и по този начин всякаква информация е безвъзвратно изгубена. Хоризонт на събитията се нарича мислената линия, отвъд която дори светлината не може да премине. Уравнения от квантовата механика обаче показват, че в пространството спонтанно се образуват двойки *виртуални частици-античастици*, които съществуват за кратко, след което анихилират (унищожават се взаимно) и отделят енергия. Когато това стане до хоризонта на събитията виртуалната античастица може да го премине и да бъде погълната от мощната гравитация, докато съответната ѝ частица да остане извън този хоризонт и да стане *реална*. Чрез новопоявилите се частици (т.нар. *лъчение на Хокинг*) черната дупка бавно се „изпарява”. Излиза, че тя хем поглъща абсолютно всичко, хем от нея „изтича” информация.

Един нов поглед върху нещата може да реши този парадокс. Физикът **Лорънс Краус** и негови колеги са извели сложна формула, с която доказват, че на практика черни дупки въобще не могат да се образуват. Смисълът на работата им се крие в ***Общата теория на относителността***, с която Айнщайн показва, че ако човек в космически кораб се приближава към черна дупка той ще усеща ускорение, докато страничен наблюдател ще вижда как корабът се забавя. Когато корабът достигне хоризонта на събитията той ще изглежда сякаш спира и остава там завинаги. На практика, казва Краус, той ще „пада” вечно, т.е. времето за черните дупки е безкрайно. Ако обаче дупките наистина губят от масата си, както е доказал **Стивън Хокинг** през 1974 г., то те би трябвало да се изпарят още преди да са се образували!

На въпроса защо все пак изглежда, че Вселената е пълна с черни дупки Краус отговаря „От къде знаете, че това са черни дупки?” Никой не е наблюдавал черна дупка досега и всяко тяло с огромна гравитация (като свръхмасивни звезди) може да предизвиква ефекти като наблюдаваните.

Не всички споделят откритието на Краус и колегите му обаче. Кимбърли Уивър, астроном от НАСА, твърди, че досега не сме наблюдавали нещо, което да подкрепи тази теория. Дори напротив, казва тя, в сърцето на Млечния път често се вижда как свръхмасивната черна дупка там поглъща междузвездна материя и тя изчезва без следа.

Теорията на учените от Case Western Reserve може да бъде тествана в новия ускорител на Европейската организация за ядрени изследвания (**ЦЕРН**) в Швейцария. В дългите 27 км подземни тръби физиците ще се опитат да създадат и изследват миниатюрни черни дупки, като се надяват така да могат да проверят дали действително около тях се образува хоризонт на събитията.

#### Литература

<http://bg.wikipedia.org>  
<http://vselenata.net>  
<http://www.capital.bg>  
<http://www.blackhole.hit.bg>  
<http://google.bg>  
<http://bg.wikipedia.org>  
<http://chernidupki3.hit.bg>

# Цунами

Емил Маринчев, Михаил Михалев, Стоил Донев\*, Петър Данев, Калоян Бойчев

*Департамент по приложна физика, ТУ-София, София 1000, България*

*\*Институт по ядрени изследвания и ядрена енергетика, БАН, България*

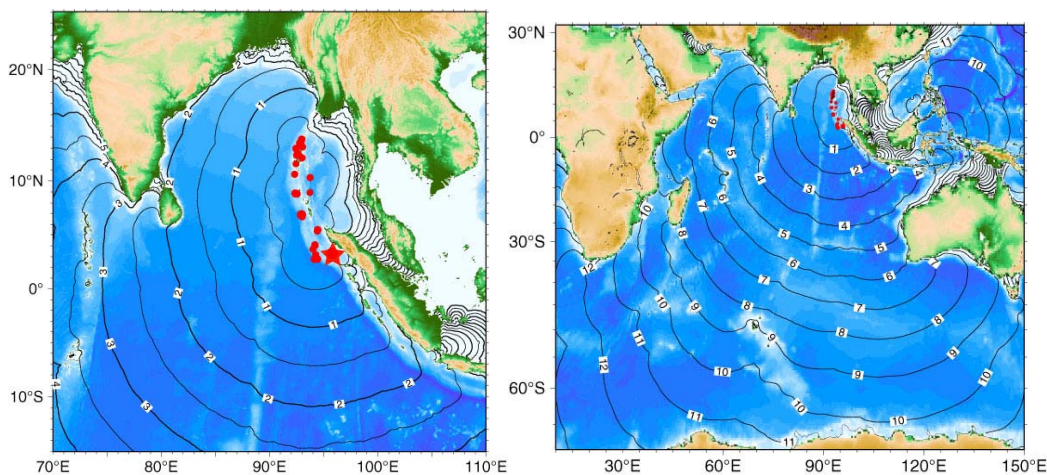
Разгледан е механизмът на възникване на вълните цунами и особеностите на тяхното разпространение. Представени са прости факти и правила за оцеляване при цунами.

## 1. Увод

Вълните цунами все повече фокусират интереса на специалистите и на широката публика поради значителните поражения, които могат да причинят. При цунамито от 26 декември 2004 година в индийския океан, броят на загиналите е около 280 000, останали без покрив са 1 130 000, но има малко жертви сред животните. Прогноза на Руската академия на науките е за голямо цунами в следващите 10 години. Основна цел на тази работа е да представи някои факти и прости правила за оцеляване при цунами.



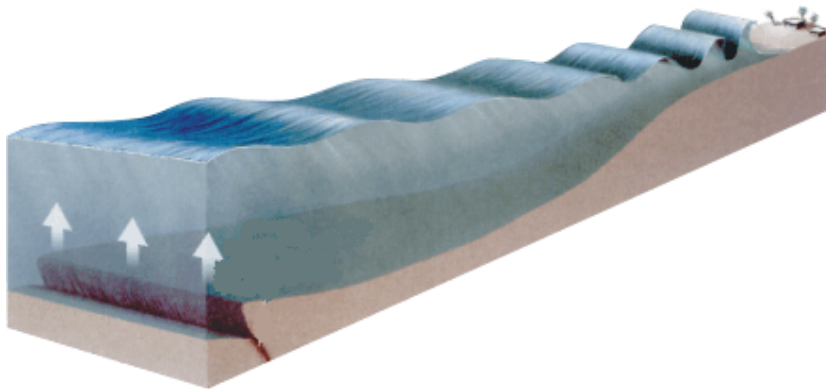
Фигура 1. Цунами в индийския океан, 26 декември 2004 година.



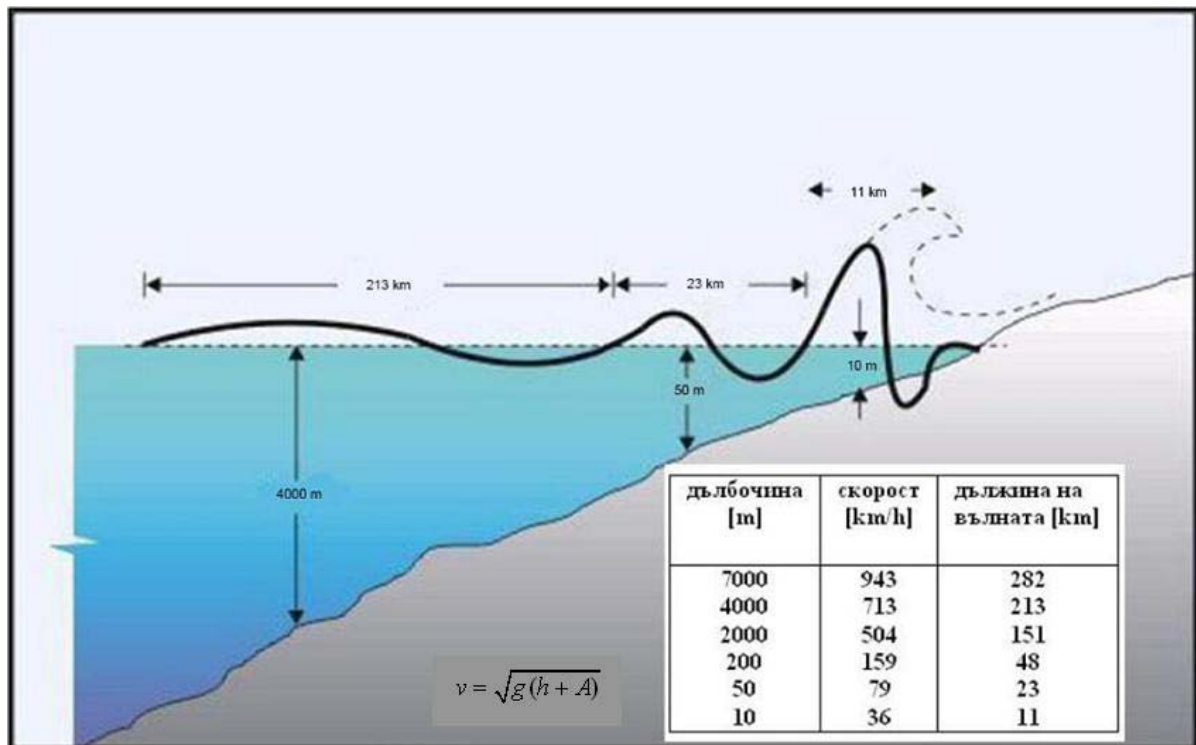
Фигура 2. Времево разпространение на цунамните вълни в индийския океан в часове.

## 2. Начин на възникване на цунамните вълни?

Подводно земетресение внезапно раздрусва целият воден стълб над дъното, Фигура 3, 4. Цунамни вълни се втурват със скорост до 1000 km/h през океана. При достигане на плитчините преди брега вълната се забавя и компресира нагоре. Вълни прииждат като водна стена и навлизат дълбоко навътре в крайбрежието предизвиквайки огромни разрушения.



Фигура 3. Илюстрация на механизма на възникване на цунамни вълни.



Фигура 4. Еволюция на цунамна вълна с приближаването ѝ към брега.

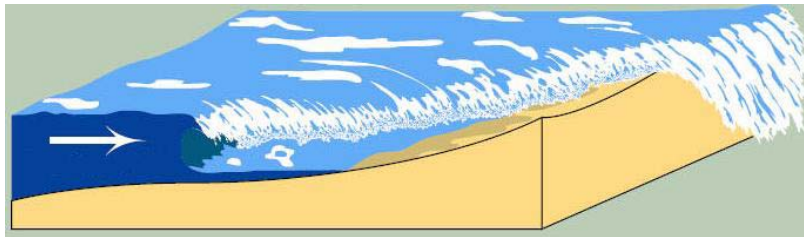
### 3. Основни разлики между ветровите и цунамните вълни

Ветровите вълни не заливат крайбрежието и се движат по кръг. Илюстрация на движението на водата при ветровите вълни е дадена на фигура 5.



Фигура 5 . Илюстрация на разпространение на ветровите вълни.

Цунамните вълни макар малки в океана са големи по брега и са много опасни. Идват бързо като водна стена и навлизат дълбоко навътре в крайбрежието. Илюстрация на движението на водата при цунамните вълни е дадена на фигура 6.



Фигура 6 . Илюстрация на разпространение на цунамни вълни.

### 4. Основни характеристики на цунамните вълни

1. Важни факти: 99% от цунамните вълни с височина 5-10 м и повече се предизвикват от подводни земетресения. Образуват се вертикални цепнатини, част от дъното пропада (се издига) заедно с водния стълб над него. Възниква вертикално колебателно движение на водата пораждащо серия от цунамни вълни.
2. Не всяко подводно земетресение предизвиква цунами. Ако източникът на земетресението е на неголяма дълбочина под дъното на океана (10-60 км) и земетресението е с мощност над 6 степен\* по скалата на Рихтер съществува вероятност за възникване на цунами . Над 8 степен възникването на цунами е почти неизбежно. Под 6 степен вероятността за цунами е почти нула.
3. Първата вълна може да пристигне след 15-20 минути след земетресението\*\* и повече в зависимост от отдалечеността на епицентъра. Обикновено това може да не е най-мощната вълна. По-разрушителна може да бъде някоя от следващите вълни. Опасността от цунами продължава няколко часа.
4. Преди пристигането на цунамната вълна обикновено се наблюдава бързо отдръпване (издигане) на водата от (към) брега, затихва шумът от прибоя.

*\* 6 степен - мебелите се местят, чува се звън от стъклария, ходенето върху пода и земята е затруднено, наблюдава се разцепване по сградите.*

*\*\*Скоростта на разпространение на сеизмичните вълни е от 5 до 8 km/s  
(от 18 000 до 28 800 km/h).*

### **Животоспасяваща информация относно цунами !**

**Ако сме на брега:**

**Ще бъдем в безопасност на възвишение 30-40 м над брега или на 2-3 км далече от крайбрежието.**

**Покрай езерата е достатъчно възвишение над 5 м.**

**При изкачване на възвишенията да се избягват долините на реки и ручей.**

**Ако сме на кораб:**

**Да се придвижим в дълбоки води, повече от 50-60 м.**

**Да се държи курс перпендикулярен на брега.**

### **Литература**

1. <http://en.wikipedia.org/wiki/Tsunami>
2. <http://www.ess.washington.edu/tsunami/index.html>
3. [http://tsun.sccc.ru/tsulab/H\\_School/titul.htm](http://tsun.sccc.ru/tsulab/H_School/titul.htm)
4. <http://www.3mfuture.com/investment/tsunami-alarm-system.htm>
5. <http://news.bbc.co.uk/1/hi/world/4136289.stm>
6. <http://tsun.sccc.ru>

# Моделиране на разпространението на лазерно излъчване във влакнесто оптични предавателни линии

Т. Арабаджиев, ТУ-София, ДПФ

*Департамент по приложна физика, Технически Университет – София,  
бул. “Кл. Охридски” 8, 1756 София*

## I. Въведение в оптичните комуникации

В настоящата информационна ера, напълно оптическите методи и среди за обработка и предаване на информация, предоставят уникалната възможност за практически пълното удовлетворяване на нарастващите потребности от все по-бърз обмен на информация. Показателен пример за това, представлява все по-широкото използване на влакнесто-оптичната връзка като основа на съвременните съобщителни системи. Всички континенти са свързани помежду си с влакнесто оптични кабели. В края на 90-те години разработката на широколентови оптически усилватели позволи да бъдат създадени експериментални, а вече и комерсиални влакнестооптични комуникационни системи (ВОКС) със спектрално уплътнение на 100 и повече канала, при което бяха достигнати скорости на предаване на информация от над един Терабит в секунда. Тези високи скорости на предаване, напълно определят и изискванията към елементите съдържащи се във ВОКС и преди всичко към източниците на светлина, оптичните усилватели и влакнестите световоди. Преди да обсъдим по подробно тези елементи ще се спрем на някои параметри на тези системи като цяло.

Пълната скорост на предаване на информация  $B$  се изчислява по формулата:  $B = Nb$ , където  $N$  е броя канали, а  $b$  скоростта на предаване на информация по един канал. При прилагане на вълново (WDM) и времево (TDM) уплътняване понастоящем са достигнати скорости на предаване от над 1 Tbit/s.

Основно ограничение на броя на предаваните канали, се явява ширината на лентата на усилване на оптичните усилватели, която може да бъде 30-80nm. Друга основна характеристика е разстоянието между каналите  $\Delta\lambda$ , което обикновено е 0.2-0.8nm.

Поради това, че излъчването им покрива областите с най-малки загуби във влакната, поради тяхната компактност и висок КПД, полупроводниковите лазери са най-широко използваните източници на светлина за ВОКС. Но тъй като  $\Delta\lambda$  в спектрално уплътнените системи може да достигне части от нанометъра, принципен недостатък на тези лазери е чувствителността им към температурни промени.

От този недостатък са освободени влакнестите лазери, в частност ербиевите, напомпвани с лазерни диоди и излъчващи в областта 1530-1620nm.

При предаване на информация на големи разстояния се налага периодичното регенериране на оптичния сигнал. За тази цел, във ВОКС се най-широко се използват няколко основни вида оптични усилватели - полупроводникови, ербиеви (EDFA) и раманови влакнести усилватели. Полупроводниковите оптични усилватели се използват широко в честотния прозорец на най-малки загуби във влакната-около 1300 nm, и имат предимства като изключително широк контур на усилване (над 60 nm), ефективното електрическо напомпване, компактност и лесна интегрируемост с други компоненти.

Основен техен недостатък е относително високият шум от спонтанната емисия (около 5db). Този тип усилватели са подходящи за усилване на свръхкъси импулси, а изключително бързата динамика на усилването и нелинейният ефект четиривънново смесване, могат да се използват за реализиране на функцията честотна конверсия във ВОКС.

В областта около 1550 nm най-широко се използват ербиево-легираните влакнести усилватели (EDFA), спектъра на усилване на които надвишава 10 nm. Ефективността на оптично напompване на тези усилватели с полупроводникови GaAs лазери работещи на 1480nm или 980nm достига до 11dB/mW. Относително ниският шум от спонтанната емисия (4.1db при напompване 24 mW на 1480nm и 60m дължина на EDFA, но обикновено е под 3.5db при напompване на 1460nm) прави този тип усилватели идеален избор за ВОКС с голяма дължина.

Друг тип влакнести усилватели с перспективи за приложение във ВОКС са рамановите усилватели. Рамановите усилватели имат преимуществата, че могат да усилват на произволна дължина на вълната, а в качеството на активна среда може да се използва влакнестият световод, спектъра им на усилване зависи от спектъра на оптичното напompване (внимателният подбор на напompващ източник може да осигури широка линия на усилване), нисък шум. Основен техен недостатък е ниската им ефективност, което означава че за получаване на усилване от 30db (типично за ВОКС) е необходима мощност (около 1W) непрекъснато напompване в необходимия честотен диапазон. Перспективите на този вид усилватели обаче, са свързани с разработването през последните години на високоефективни напompващи източници за тях, в областта 1300-1500nm и подходящи за ВОКС. Интересна възможност се явява използването на хибриден влакнест усилвател състоящ се от разпределени ербиев и раманов влакнести усилватели.

Развитието на високоскоростните ВОКС и използването им като гръбнак в глобалните информационни мрежи налага разработката на нови методи и идеи за обработка на информацията в тях. В тази връзка, изключително значение придобива изследването на естественят процес на организация на светлината в нелинейни среди, водещ до формирането на т.нар. оптични солитони. Тяхното главно преимущество по отношение на линейните импулси е устойчивостта им в присъствие на различни по своята физическа природа пертурбации на дистанции много по къси от дисперсионната дължина. Най-важното свойство на солитоните е, че дори и в процесите на взаимодействие между тях, те запазват своите характеристики, като например амплитуда (ширина, форма) или скорост. Във влакната (при пренебрегване на загубите) в областта на отрицателна дисперсия на груповите скорости могат да бъдат генерирани оптични солитони със форма на амплитудата *sech*. Тяхната генерация е възможна благодарение на баланса на фазовата самомодулация (ФСМ) и дисперсията на груповите скорости (ДГС). Този вид оптични солитони за първи път са предсказани, а стабилността им демонстрирана чрез числени симулации от Хасегава и Таперт през 1973 г.

Оптични солитони за първи път са наблюдавани експериментално в оптични влакна от Моленauer, Столен и Гордън през 1980 г. Те открили че импулс с ширина 7ps, 1.2W пикова мощност и  $\lambda=1550\text{nm}$  в едномодово влакно с отрицателна ДГС на основата на кварц се разпространява на разстояние 700m без да променя формата си. Тогава за първи път възниква идеята за приложение на солитоните за предаване на информация.

Понастоящем се реализират множество проекти целящи разработката на напълно оптични глобални (WAN) и градски (MAN) информационни мрежи базирани на оптични солитони работещи със скорости от порядъка на терабитове в секунда. Съпътстващи цели осигуряващи изпълнението на тези проекти са оптимизиране качествата на оптичните солитони и влакна, терабитовите оптични източници и компоненти, напълно оптично превключване и честотна конверсия.

## II. Моделиране на влакнесто-оптични предавателни линии

Нелинейно уравнение на Шрьодингер (НУШ), което описва разпространението на лазерното излъчване в оптични влакна, представлява нелинейно частно диференциално уравнение и в общия случай няма аналитично решение. Изключение правят някои частни случаи на НУШ за които посредством метода на обратната задача на разсейване или вариационен анализ аналитично могат да бъдат намерени стационарни (солитонни) решения. Много често, единственият начин да се прогнозира поведението на импулсите/сноповете в нелинейна среда е численото моделиране. Голям брой числени методи могат да се използват за тази цел. Те могат да бъдат класифицирани в две групи:

- (а) методи на крайните разлики;
- (б) псевдоспектрални методи.

Последните по принцип са на порядък и повече по-бързи при същата точност. Поради бързината си Фурие методът на разделяне по физични фактори (SSFM) е един от най-прилаганите в момента числени методи. Бързината му се дължи главно на използването на Бързото Фурие преобразование. За да се разбере принципа на този метод е удобно НУШ да се запише в операторен вид:

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})\psi \quad (1)$$

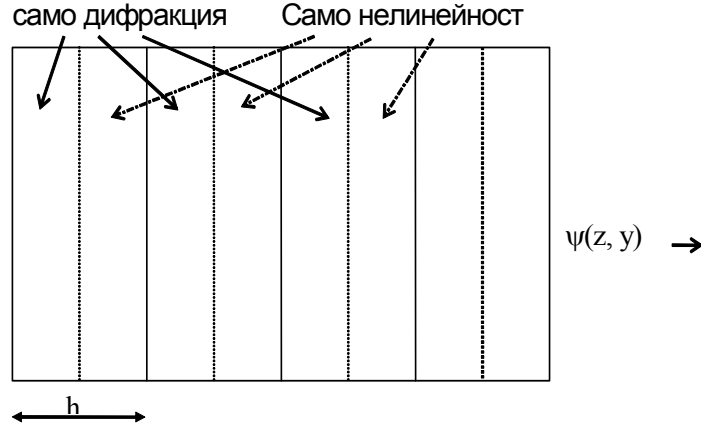
където  $\hat{D}$  е диференциален оператор, описващ дисперсионните, а  $\hat{N}$  нелинейните ефекти.

$$\hat{D} = -\frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2}{\partial T^2} - \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

$$\hat{N} = i\gamma(|\psi|^2) \quad (3)$$

По принцип дисперсията и нелинейността действат едновременно по дължината на нелинейната среда. Но SSFM се основава на приближението, че дисперсионните и нелинейните ефекти действат независимо един от друг на достатъчно малки разстояния. За целта разпространението на електромагнитната вълна се разглежда на малки стъпки с дължина  $h/2$ , като в първата половина на стъпката се приема, че действа само дисперсия, а във втората - само нелинейност (фиг.1). Това позволява задачата да се разбие на две отделни подзадачи, за всяка от които има добре известни числени методи.





Фиг. 1

Математически еволюцията на бавноменящата се амплитуда се записва във вида:

$$\psi(T, z + h) \cong \exp(h\hat{D}) \exp(h\hat{N}) \psi(T, z) \quad (4)$$

Изпълнението на оператора  $\exp(h\hat{D})$  се осъществява във Фурие-пространството по следния начин:

$$\exp(h\hat{D}) = \left\{ F^{-1} \exp[h\hat{D}(i\omega)] F \right\} \quad (5)$$

където  $F^{-1}$  и  $F$  са съответно обратно и право Фурие-преобразование,  $\hat{D}(i\omega)$  се получава чрез замяна на диференциалните оператори  $\frac{\partial}{\partial T}$  с  $i\omega$ , където  $\omega$  са честотите във Фурие областта. Тъй като  $\hat{D}(i\omega)$  във фурие областта е число, пресмятането на (5) е безпроблемно. Използването на БФП прави численото пресмятане на (5) относително бързо, и това е причината за по-бързия на два порядъка SSFM в сравнение с повечето схеми с крайни разлики.

За да се оцени точността на SSFM, решението на (1) формално се записва във вида:

$$\psi(T, z + h) = \exp[h(\hat{D} + \hat{N})] \psi(T, z) \quad (6)$$

където операторът  $\hat{N}$  е приет за независещ от  $z$ . Удобно е да се използва формулата на Бейкър-Хаусдорф за два некомутиращи оператора  $\hat{a}$  и  $\hat{b}$ :

$$\exp(\hat{a}) \exp(\hat{b}) = \exp\left(\hat{a} + \hat{b} + \frac{1}{2}[\hat{a}, \hat{b}] + \frac{1}{12}[\hat{a} - \hat{b}, [\hat{a}, \hat{b}]] + \dots\right) \quad (7)$$

където  $[\hat{a}, \hat{b}] = \hat{a}\hat{b} - \hat{b}\hat{a}$ . Сравнението на (4) и (6) показва, че SSFM игнорира некомутиращия характер на операторите  $\hat{D}$  и  $\hat{N}$ . Чрез заместване в (7) на  $\hat{a} = h\hat{D}$  и  $\hat{b} = h\hat{N}$ , основната част от натрупващата се грешка идва от единичния комутатор

$\frac{1}{2}h^2[\hat{D}, \hat{N}]$ . Така SSFM е точен до втора степен на стъпката  $h$ . Точността на SSFM може да бъде подобрена чрез изпълняване на по-сложна процедура при пресмятане на разпространението на вълната от  $z$  до  $h+z$ . В тази нова процедура (4) се замества от:

$$\psi(T, z+h) \cong \exp\left[\frac{h}{2}\hat{D}\right] \exp\left[\int_z^{z+h} \hat{N}(z')dz'\right] \exp\left[\frac{h}{2}\hat{D}\right] \psi(T, z) \quad (8)$$

Основната разлика е, че нелинейността се включва в средата на стъпката вместо на границата. Интегралът във втората експонента е удобен за включване на зависимостта на нелинейния оператор  $\hat{N}$  от  $z$ . Ако стъпката  $h$  е достатъчно малка, той може да бъде апроксимиран с  $\exp(h\hat{N})$ , подобно на (4). Най-важното предимство от използването на симетричната форма на (8) е, че доминиращия член за грешката идва от двойния комутатор в (7) и е от трети порядък по стъпката  $h$ .

По-нататък точността може да бъде подобрена чрез пресмятане на интеграла в (8) точно от апроксимацията му с  $h\hat{N}$ . Най-просто е пресмятането да стане чрез добре известните методи на Рунге-Кута. В този случай макар и итерационната процедура да е по-бавна, общото време за пресмятания може да се намали чрез увеличаване на стъпката  $h$  поради повишената точност на числения алгоритъм.

При числените пресмятания трябва да се отдели голямо внимание на големината на стъпката по  $z$  и на честотата на дискретизация. Един от критериите за точност при пресмятанията е запазването на енергията на импулса, която трябва задължително да се следи на всяка стъпка. Друг задължителен параметър е отклонението от нула на стойностите на амплитудата в краищата на интервала на дискретизация. БФП е еднозначно само когато стойността на функцията в краищата на числения прозорец е нула.

## Литература

1. G.P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", Academic Press, 2001
2. G.P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems", Wiley, 1992
3. T. Arabadzhiev, I. Uzunov, Optical and Quantum Electronics, 39, p. 169-180, 2007

## Уравненията на Максвел

Г. Карастоянов

*Департамент по приложна физика, Технически Университет – София,  
бул. “Кл. Охридски” 8, 1756 София*

“Теорията на Максвел – това са максвеловите уравнения”, писа някога откривателят на електромагнитните вълни Хаинрих Херц. В тази система от 4 диференциални уравнения

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \partial \vec{D} / \partial t \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (4)$$

е съсредоточена цялата мощ и красота на съвременната електродинамика.

Тези уравнения позволяват по принцип, ако знаем началното разпределение на електромагнитното поле и електричните заряди, както и първите производни на характеристиките на полето (интензитета на електричното поле и магнитната индукция) по координатите и времето, да намерим стойностите им в пространството във всеки следващ момент от време. Разбира се, практическото решаване на тези уравнения в общия случай е много сложно и досега не е известно.

Уравненията на Максвел са резултат както на задълбочен теоретичен анализ на натрупани опитни данни и закономерности (като например закона на Фарадей за електромагнитната индукция), така и на силна физическа интуиция. Последното се проявява при второто уравнение. Максвеловата прибавка  $\partial \vec{D} / \partial t$  се оправдава най-добре, ако вземем дивергенция от това уравнение

$$\operatorname{div} \vec{j} = + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

Получава се уравнението на непрекъснатостта, което би придобило абсурдно осакатен вид, отговорящ на електростатиката, ако липсва максвеловият член в уравнение (2).

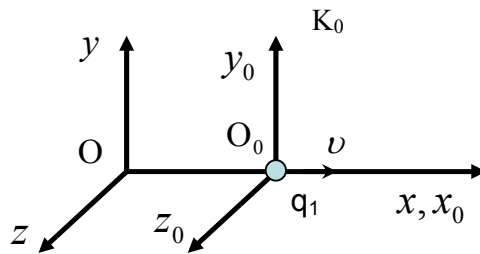
Максвел е под силното влияние на идеите на Фарадей за електромагнитното поле. Търсенето на условия, при които магнитното поле да породи електрично поле, е цяла епопея. Тази основна мисъл на Фарадей слага силен отпечатък и върху разсъжденията на Максвел. Формално уравненията показват, че променливото поле е свързано с вихрово електрично поле, както и че променливото електрично поле е свързано с наличието на вихрово магнитно поле. Дали тези уравнения са взаимно свързани и взаимно пораждащи се или имат обща причина, общ източник? Очевидно е, че евристичната идея на Фарадей

довежда до утвърждаване на първото мнение – промеливото магнитно поле поражда променливо електрично поле и обратно. Тази интерпретация е запазена и до наши дни.

В авторитетния учебник по физика на Зисман и Тодес (в изданието от 1969 г.) е написано: “Промеливото магнитно поле поражда електрично поле ..... Промеливото електрично поле поражда магнитно поле”. Още по-ясно тази концепция е изразена в известния наш учебник по опитна физика на акад. Г. Наджаков: “Промениливото електрично поле предизвиква появата на променливо магнитно поле пред себе си в перпендикулярно направление на своето, което от своя страна индуцира пред себе си електрично поле и т.н., като тая взаимна индукция се разпространява във вакуум със скорост  $c$ ”

За съжаление тази концепция не е вярна! След Втората световна война (главно в периода около 60-те години на 20 в.) беше направен задълбочен релативистичен анализ на електродинамиката и показана възможността за достигане до Максвеловите уравнения, като се използва законът на Кулон и законите на релативната механика. Появиха се солидни учебни монографии (на Елиот – 1966 г., на Росър – 1968 г., на Лорен и Корсън – 1970г.), които задълбочено разгледаха релативистичния произход на магнитните явления. Оказа се, че магнетизмът е релативистично следствие, че той е допълнителна сила, която възниква между движещи се електрични заряди. Източникът на електричните и магнитните сили е един и същ – покоящият се или движещия се електричен заряд. Поточно източник на електромагнитното поле са заредените частици. Електричният заряд е само една характеристика на елементарните частици и сам по себе си, откъснат от тях, не съществува.

Нашата цел днес е да се запознаем с основните релативистични пътища, които водят до уравненията на Максвел.



Фиг. 1. Инерциални отправни системи  $K$  и  $K_0$

Да разгледаме две лоренцови инерциални отправни системи, както е показано на фиг. 1, които означаваме съответно с  $K$  и  $K_0$ .

В началото  $O_0$  на системата  $K_0$ , която се движи със скорост  $v$  спрямо системата  $K$ , се намира източникът на полето  $q_1$ . Законите за трансформация на енергията и импулса са

$$E = \gamma(E + \vec{v} \cdot \vec{p}_o) \quad (6)$$

$$\vec{p} = \vec{p}_o + (\gamma - 1)(\vec{v} \cdot \vec{p}_o) \vec{v} / v^2 + \gamma E_o \vec{v} / c^2 \quad (7)$$

Ако диференцираме ур-ние (7) по времето, след някои трансформации намераме силата в системата  $K$  като функция на силата в системата  $K_0$ .

$$\vec{F} = \frac{\vec{v} \cdot \vec{F}_o}{v^2} \vec{v} + \gamma \left[ \frac{\vec{v} \times (\vec{F}_o \times \vec{v})}{v^2} - \frac{\vec{v} \times (\vec{F}_o \times \vec{v})}{c^2} \right] \quad (8)$$

Това е релативистичният закон за трансформиране на силата в една от неговите форми.

Този закон веднага може да се представи във вида на Лоренцова сила

$$\vec{F} = q_2 \vec{E} + q_2 \vec{v} \times \vec{B} \quad (9)$$

Веднага се вижда, че ролята на електричното поле се изпълнява от първите два члена в израза за силата (8). Третият член описва магнитната сила.

Известно е, че съществуването на магнитно поле води до векторен потенциал. Затова е достатъчно  $\text{div } \vec{B} = 0$ , което се проверява непосредствено, независимо от вида на силата  $\vec{F}_o$  (достатъчно е да бъде само централна). Тъй като  $\text{div } \text{rot } \vec{A} = 0$  тъждествено,  $\vec{B}$  може да се представи като ротация на подходяща векторна величина  $\vec{A}$ , наречена векторен потенциал:  $\vec{B} = \text{rot } \vec{A} / c$ .

Използването на Кулоновата сила за  $\vec{F}_o$  води непосредствено до Максвеловите уравнения. За целта е достатъчно да изчислим ротациите, дивергенциите и времевите производни на  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$ .

Законът за трансформация на силата (8) показва, че магнитната компонента е следствие от Кулоновата сила  $\vec{F}_o$ , която има за източник заредената частица. Следователно електричното и магнитното полета имат един и същ източник и съществуват, изменяйки се съвместно по Максвеловите уравнения в зависимост от поведението на заредената частица, създаваща полето. Независимо от това, че  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  могат да съществуват в област далеч от източника на полето, например в електромагнитна вълна, те се изменят свързано, като винаги  $\vec{B}$  е перпендикулярна на  $\vec{E}$ . Това става особено ясно, ако вземем предвид, че  $\vec{F}_o$  е централна сила  $\vec{F}_o = F_o(r_o) \vec{r}_o / r_o$ . Тогава получаваме

$$\vec{F} = \gamma \frac{F_o(r_o)}{r_o} \left[ \vec{r} + \vec{r} \times \left( \frac{\vec{v}}{c^2} \times \vec{r} \right) \right] \quad (10)$$

Друга възможност е  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  да се изразят чрез подходящо избрани скаларен и векторен потенциали  $\phi$  и  $\vec{A}$ . Без да се позоваваме дори на  $\text{div } \vec{B} = 0$ , с непосредствено изчисление може да се провери, че изразът за силата (8) може да се представи чрез величините

$$\vec{E} = \text{grad } \phi - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (11)$$

$$\vec{B} = \frac{1}{c} \text{rot } \vec{A} \quad (12)$$

където  $\phi$  и  $\vec{A}$  се получават по правилата за трансформиране на четири вектори от четири вектора  $(\phi_o, 0)$  в системата  $K_0$ , където  $\vec{F}_o = -q_1 \text{grad } \phi$ .

Чрез непосредствено диференциране от (11) и (12) се получават Максвеловите уравнения във вида

$$\text{rot } \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t \quad (13)$$

$$\text{rot } \vec{B} = (1/c^2) \partial \vec{E} / \partial t - \nabla \vec{A} / c \quad (14)$$

$$\text{div } \vec{E} = -\nabla \varphi \quad (15)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (16)$$

Като се вземе предвид закона на Кулон, се достига до

$$\nabla \varphi = -\rho / \varepsilon_0 \quad (17)$$

$$\nabla \vec{A} / c = -\rho \vec{v} / c^2 \varepsilon_0 = -\mu_0 \vec{j} \quad (18)$$

Връзките (11) и (12) позволяват да се изчисляват полетата и на ускорени заряди.

Независимо от това, срещу съществуването на векторен потенциал и прилагането на последния метод могат да се срещнат възражения. Например Файнман в своите знаменити лекции казва: “Понякога някой безотговорно заявява, че цялата електродинамика може да бъде получена само от Лоренцовите трансформации и закона на Кулон. Това разбира се е съвършено невярно. Преди всичко трябва да предположим, че имаме скаларен и векторен потенциали, които в съвкупността си образуват четиривектор. Това ни показва, как се преобразуват потенциалите. После откъде знаем, че трябва да отчитаме ефекта само в закъсняващия момент? Или още по-добре, защо потенциалът зависи само от положението и скоростта и не зависи например от ускорението? Та нали полетата  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  зависят все пак от ускорението? Ако се опитате да приложите същите разсъждения към тях, ще бадете принудени да признаете, че те зависят само от положението и скоростта в закъсняващия момент. Но тогава полето на ускоряващия се заряд би било същото, както и полето на заряд в проекционното положение, а това не е вярно. Полетата зависят не само от положението и скоростта по траекторията, но и от ускорението. Така че във “великото” твърдение, че всичко може да се получи от лоренцовите трансформации, се съдържат още няколко неявни допълнителни предположения “

Бележките на Файнман всъщност ми дадоха идея как да получа аналог на магнитното поле в общия случай, както и прост начин да се получи електродинамиката от закона на Кулон и релативната теория. Трябва просто да се докажат положенията, оспорени от Файнман и наречени неявни допълнителни предположения.

Най-напред се оказа, че използването на така нареченото закъсняващо време, т.е. изразяването на характеристиките на електромагнитното поле в момента на излъчването на полето или настоящето време, намалено с времето, необходимо на светлината да измине разстоянието от източника до точката на полето е само един възможен начин за

изразяване на тези характеристики. Това е по-скоро въпрос на удобство, свързан и с убеждението, че взаимодействието се разпространява със скоростта на светлината.

По-нататък съществуването на скаларен и векторен потенциали беше изяснено в предишни мои лекции. Ако силата е централна, съществува потенциална енергия и съответен потенциал. По силата на релативистичните закони за трансформиране на енергията и импулса следва, че трябва да съществува потенциален импулс  $\vec{P}$  и съответния векторен потенциал  $\vec{A} = \phi \vec{v}/c$ , така че  $\vec{P} = q_2 \vec{A}/c$ . Тъй като  $\phi$  зависи само от координатите, то в общия случай  $\phi$  и  $\vec{A}$  ще зависят пак само от координатите и скоростта. С това се отговаря на въпросите на Файнман и по-нататък по стандартния начин се достига до Максвеловите уравнения.

# Диференциалните уравнения и развитието на физиката

Гаро А. Гарабедян, Сава Д. Донков

*Департамент по приложна физика, Технически Университет – София,  
бул. “Кл. Охридски” 8, 1756 София*

Представен е кратък преглед на някои от най-важните диференциални уравнения във физиката. Обхванати са основните уравнения на класическата механика (Нютонова, Лагранжовата и Хамилтоновата формулировка, уравнението на Хамилтон-Якоби и взаимовръзката между тях), уравнението на Шрьодингер, уравненията на Фарадей и Максвел, уравнението на Лаплас (общия случай). Коментирани са необходимите и достатъчни условия за съществуване и единственост на решенията. Необходимите и достатъчни условия за съществуване на единственост на решението са разгледани по-подробно на базата на уравнението за топлопроводност. Предложено е извод на това уравнение използвайки само експерименталния закон на Фурие за топлопреноса и топлинния баланс за произволен обем от средата. За частния случай на стационарно уравнение на топлопроводност са показани числени решения на няколко конкретни задачи като е използвана документацията на COMSOL Multiphysics.

## I. Увод.

Голям брой от наблюдаваните явления не са статични, а зависят както от моментните стойности на дадени величини, така и от вида на тяхното изменение. Поведението на такива величини се описва с диференциални уравнения. Диференциалните уравнения играят забележителна роля в инженерството, физиката, икономиката и др. дисциплини като моделират процеси, които се изменят във времето. Например, във физиката обикновено диференциално уравнение може да се използва, за да се определи положението по вертикалата на топче падащо във въздух (приемайки само гравитацията и съпротивлението на въздуха като единствени сили, влияещи върху топчето). Ако  $y$  е функция на позицията на топчето, и  $y''$  е неговото ускорение, тогава ускорението на падащото топче се моделира чрез  $y'' = g - k_1 y'$ , където  $g$  е константното ускорение на гравитацията,  $y'$  е скоростта на топчето и  $k_1$  е коефициента на съпротивление на въздуха  $k$ , разделен на масата на топчето. Гравитацията е константна, но съпротивлението на въздуха е пропорционално на скоростта на топчето. Това означава, че ускорението на топчето е зависимо от неговата скорост. Тъй като ускорението е производната на скоростта, а скоростта е производната на координатата, решаването на тази задача изисква използване на диференциално уравнение.

Изследването на диференциалните уравнения е широка област от чистата и приложна математика, физиката, и инженерството. Във всички тези дисциплини се използват диференциални уравнения от различни видове. Чистата математика се фокусира върху съществуването и единствеността на решенията, докато приложната математика набляга на методите за приблизително решение. Диференциалните уравнения играят важна роля във виртуалното моделиране на всеки физически, технически, или



биологически процес. Диференциални уравнения като тези се използват за решаване на проблеми от реалния живот, макар, че те не винаги са точно решими или нямат пълен набор решения. Вместо това решенията може да са приближени, използвайки числени методи.

Един класически пример от Нютоновата механика:

Изхождайки от втория принцип на Нютон (или уравнението на движение)

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

и от дефинициите на скорост и ускорение,

$$\vec{a} = \frac{d^2}{dt^2} \vec{r}(t); \vec{v}(t) = \frac{d}{dt} \vec{r}(t),$$

намираме

$$m \frac{d^2}{dt^2} \vec{r}(t) = \vec{F} \Leftrightarrow$$

$\vec{F} = \vec{F}(\vec{r}(t), \frac{d}{dt} \vec{r}(t), t)$  - силата в общия случай е функция на радиус вектора, на скоростта и на времето

$$\frac{d^2}{dt^2} \vec{r}(t) - \frac{1}{m} \vec{F}(\vec{r}(t), \frac{d}{dt} \vec{r}(t), t) = 0 \text{ (ОДУ от 2 ред за } \vec{r} = \vec{r}(t) \text{ )} \quad (I.1.)$$

Това е основното уравнение на Нютоновата механика, записано в най-общ вид. Неговото решаване дава функцията  $\vec{r}(t)$ , която заедно със скоростта  $\frac{d}{dt} \vec{r}$ , описва напълно движението на дадено тяло, разгледано като материална точка.

За да бъде напълно определена функцията  $\vec{r}(t)$  трябва да са известни две начални условия (уравнението е ОДУ от 2 ред по времето). Това са всъщност началната стойност на радиус вектора  $\vec{r}_0 = \vec{r}(0)$  и началната скорост  $\vec{v}_0 = \frac{d}{dt} \vec{r}(t)|_{t=0}$ .

## II. Някои основни уравнения във физиката

### 1. Уравнение на Хамилтон-Якоби

В математиката уравнението на Хамилтон-Якоби е необходимо условие, описващо екстремалната геометрия в обобщението на Вариационното смятане. Във физиката уравнението на Хамилтон-Якоби е еквивалентно на други формулировки като Нютоновияте закони за движението, Лагранжовата механика и Хамилтоновата механика. Уравнението на Хамилтон-Якоби е полезно на практика за идентифициране на запазващи се величини (първи интеграли) за механичните системи, които може да се намерят, дори когато механичният проблем не може да бъде решен точно.

Уравнението на Хамилтон-Якоби е също единствената формулировка на механиката, в която движението на частица може да бъде представено като вълна. В този смисъл уравнението постига една отдавнашна мечта на теоретичната физика (датираща най-малко от Йохан Бернули в 18 век) за намиране на аналогия между разпространението на светлината и движението на частица. Вълновото уравнение за механичните системи е подобно, но не идентично, на уравнението на Шрьодингер; по тази причина уравнението

на Хамилтон-Якоби е смятано за „най-близката точка“ на класическата механика и квантовата физика.

### 1.1. Уравнение на Хамилтон-Якоби - математическа формулировка

Уравнението на Хамилтон-Якоби е нелинейно частно диференциално уравнение от първи ред за функцията  $S(q_1, \dots, q_N; t)$  наречена Хамилтонова основна функция (също така- действие) [1].  $q_1, \dots, q_N$  са обобщените координати,  $t$  е времето.

$$H(q_1, \dots, q_N; \frac{\partial S}{\partial q_1}, \dots, \frac{\partial S}{\partial q_N}; t) + \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad (\text{ЧДУ от 1 ред, нелинейно}) \quad (\text{II.1.1.})$$

Това уравнение може да бъде изведено от Хамилтоновата механика като се приеме  $S$  за пораждаща функция на канонична трансформация на класическия Хамилтониян  $H(q_1, \dots, q_N; p_1, \dots, p_N; t)$ . Обобщените импулси отговарят на първата производна на  $S$  по отношение на обобщените координати и могат да бъдат получени така:

$$p_k = \frac{\partial S}{\partial q_k} \quad ; \quad k = 1, \dots, N$$

### 1.2. Уравнение на Хамилтон-Якоби в областта на гравитацията

$$g^{ik} \frac{\partial S}{\partial x^i} \frac{\partial S}{\partial x^k} - m^2 c^2 = 0$$

Където  $g^{ik}$  са контравариантните компоненти на метричния тензор,  $m$  е масата на покой на частицата и  $c$  е скоростта на светлината.

### 1.3. Сравнение между уравнението на Хамилтон-Якоби и уравненията на Лагранж-Ойлер и на Хамилтон. Изясняване на връзката между тях

Уравнението на Хамилтон-Якоби (виж (I.1.1.)) е единствено, от първи ред частно диференциално уравнение за функцията  $S$  на  $N$  обобщени координати  $q_1, \dots, q_N$  и времето  $t$ . Обобщените импулси не участват, освен като производни на  $S$ . Функцията  $S$  е равна на класическото действие.

За сравнение в еквивалентната Лагранжова механика, където основни уравнения са тези на Лагранж-Ойлер, обобщените импулси също не се появяват явно. Обаче тези уравнения са система от  $N$  уравнения от 2 ред за времевата еволюция на обобщените координати. [1]

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad ; \quad i = 1, \dots, N \quad (\text{II.1.2.})$$

$L = L(q_1, \dots, q_N; \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_N, t)$  - Лагранжиан на системата

Ако Лагранжианът на системата е известен, то уравненията на Лагранж-Ойлер установяват връзка между ускоренията, скоростите и координатите, т.е. представляват уравненията на движение за системата.

От математическа гледна точка тези уравнения са система от  $N$  уравнения от 2 ред за  $N$  неизвестни функции  $q_i(t)$ . Общото решение на такава система съдържа  $2N$  произволни константи. За тяхното определяне и по този начин за пълното определяне на движението на механична система е необходимо да знаем началните условия, например началните стойности на координатите и скоростите.

Като друго сравнение уравненията на Хамилтон за движение са система от  $2N$  уравнения от първи ред за изменението във времето на обобщените координати  $q_1, \dots, q_N$  и обобщените импулси  $p_1, \dots, p_N$ .

$$\frac{\partial H}{\partial p_i} = \dot{q}_i; -\frac{\partial H}{\partial q_i} = \dot{p}_i; i = 1, \dots, N \quad (\text{II.1.3.})$$

$H = H(q_1, \dots, q_N; p_1, \dots, p_N; t)$  - Хамилтониан на системата

Хамилтониана е енергията на системата изразена чрез обобщените координати и импулси. Докато Лагранжовата формулировка на механиката описва механичното състояние чрез задаване на обобщените координати и скорости, то Хамилтоновата формулировка работи с обобщените координати и импулси, което е по-удобно при изясняване на някои общи въпроси в механиката. Уравненията на движение в Хамилтоновата механика (виж (II.1.3.)) са система от  $2N$  уравнения от 1 ред за неизвестните функции  $q_i(t)$  и  $p_i(t)$ , за разлика от  $N$ -те уравнения от 2 ред в Лагранжовата формулировка (виж (II.1.2.)).

В този смисъл, за да знаем явния вид на функциите  $q_i(t)$  и  $p_i(t)$  се нуждаем отново от  $2N$  константи. Това всъщност са началните стойности на координатите и импулсите. Тогава движението на механичната система е напълно определено.

Прехода от Лагранжова към Хамилтонова формулировка се извършва чрез преобразуването на Лъожандър [1].

$$L = L(q_1, \dots, q_N; \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_N; t)$$

Пълният диференциал на  $L$  като функция на обобщените координати и скоростите ще изглежда така:

$$dL = \sum_i \frac{\partial L}{\partial q_i} dq_i + \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} d\dot{q}_i$$

$$p_i = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \quad (\text{по дефиниция})$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} = \dot{p}_i \quad (\text{съгласно горната дефиниция и уравненията на Лагранж-Ойлер (виж II.1.2.))})$$

II.1.2.))

$$\text{Тогава } dL = \sum_i \dot{p}_i dq_i + \sum_i p_i d\dot{q}_i$$

Правим следното преобразуване:

$$\sum_i p_i d\dot{q}_i = d\left(\sum_i p_i \dot{q}_i\right) - \sum_i \dot{q}_i dp_i$$

$$\Rightarrow dL = \sum_i \dot{p}_i dq_i - \sum_i \dot{q}_i dp_i + d\left(\sum_i p_i \dot{q}_i\right)$$

Прехвърляме пълните диференциали от лявата страна и получаваме следния израз:

$$\Leftrightarrow d\left(\sum_i p_i \dot{q}_i - L\right) = -\sum_i \dot{p}_i dq_i + \sum_i \dot{q}_i dp_i$$

Полагаме:

$$H(q_1, \dots, q_N; p_1, \dots, p_N; t) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_i p_i \dot{q}_i - L$$

$$\Rightarrow dH = -\sum_i \dot{p}_i dq_i + \sum_i \dot{q}_i dp_i$$

От друга страна пълният диференциал на  $H$ , разгледан като функция на  $q_1, \dots, q_N$  и  $p_1, \dots, p_N$ , изглежда така:

$$dH = \sum_i \frac{\partial H}{\partial q_i} dq_i + \sum_i \frac{\partial H}{\partial p_i} dp_i$$

Тогава, след сравняване на двата изрази за  $dH$ , получаваме, че:

$$\frac{\partial H}{\partial q_i} = -\dot{p}_i; \frac{\partial H}{\partial p_i} = \dot{q}_i; i=1, \dots, N, \text{ което всъщност е системата (II.1.3.).}$$

Ето как можем да получим и уравнението на Хамилтон-Якоби (виж (II.1.1.))

$$S = \int_{t_1}^t L(q_1, \dots, q_N; \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_N; t) dt \quad - \text{това е действието}$$

$\Rightarrow \frac{dS}{dt} = L$ . От друга страна имаме, че  $S = S(q_1, \dots, q_N; t)$  следователно пълната производна на S по времето е:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial t} + \sum_i \frac{\partial S}{\partial q_i} \frac{dq_i}{dt}$$

$$\text{Обаче } \frac{\partial S}{\partial q_i} = p_i \text{ и } \frac{dq_i}{dt} = \dot{q}_i, \text{ тогава:}$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial t} + \sum_i p_i \dot{q}_i$$

Сравнявайки двата израза за  $\frac{dS}{dt}$  ще получим, че:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = L - \sum_i p_i \dot{q}_i, \text{ но } L - \sum_i p_i \dot{q}_i = -H \Rightarrow \frac{\partial S}{\partial t} = -H. \text{ Тогава:}$$

$$H + \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad - \text{Уравнението на Хамилтон-Якоби}$$

Решаването на задача за движението на механичната система чрез уравнението на Хамилтон-Якоби се свежда до следните няколко стъпки [1]:

$$\text{От уравнението: } H(q_1, \dots, q_N; \frac{\partial S}{\partial q_1}, \dots, \frac{\partial S}{\partial q_N}; t) + \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \text{ намираме пълния интеграл,}$$

който има следния вид:

$$S = f(t; q_1, \dots, q_N; \alpha_1, \dots, \alpha_N) + A$$

Това е решение на уравнението, което съдържа N+1 независими константи:  $\alpha_1, \dots, \alpha_N$  и A. Диференцираме пълния интеграл по константите  $\alpha_1, \dots, \alpha_N$  и приравняваме тези производни на нови константи  $\beta_1, \dots, \beta_N$ . По този начин получаваме система от N алгебрични уравнения за функциите  $q_1(t), \dots, q_N(t)$

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha_i} = \beta_i; i=1, \dots, N \quad (\text{от тези алгебрични уравнения намираме функциите } q_i(t), \text{ които}$$

освен от времето зависят и от 2N произволни константи)

Обобщените импулси намираме като първи производни на пълния интеграл по обобщените координати

$$p_i = \frac{\partial S}{\partial q_i}; i=1, \dots, N$$

По този начин получаваме обобщените координати  $q_i(t)$  и обобщените импулси  $p_i(t)$ , които зависят от 2N произволни константи. Определянето на тези константи означава да знаем началните координати и началните импулси.

## 2. Уравнение на Шрьодингер

Във физиката особено в квантовата механика уравнението на Шрьодингер е уравнение, което описва как квантовото състояние на физична система се изменя във времето. То е толкова централно за квантовата механика, както Нютоновите закони са за класическата механика.

В стандартната интерпретация на квантовата механика квантовото състояние, също назовано вълнова функция или вектор на състоянието, е най-пълното описание, което може да бъде дадено на физична система. Решения на уравнението на Шрьодингер описват не само атомичните и податомичните системи, електрони и атоми, но също така и макроскопични системи. Уравнението е назовано по името на Ервин Шрьодингер, който го открива в 1926г.

Уравнението на Шрьодингер може математически да се трансформира в матричната механика на Хайзенберг, и в Файнмановите континуални интеграли. Уравнението на Шрьодингер въвежда времето по начин несъгласуван за релативистките теории, проблем, който не е толкова сериозен в Хайзенберговата формулировка и напълно отсъстващ при континуалните интеграли.

Уравнението на Шрьодингер взема множество различни форми в зависимост от физическата ситуация.

### 2.1. Уравнение на Шрьодингер. Обща квантова система

За обща квантова система:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) = \hat{H} \Psi(\vec{r}, t) \quad (\text{II.2.1.})$$

където

- $i$  е имагинерната единица
- $\Psi(\vec{r}, t)$  е вълновата функция, чиито модул на квадрат е плътността на вероятността за даденото състояние на системата.
- $\hbar$  е редуцираната константа на Планк (константата на Планк разделена на  $2\pi$ )
- $\hat{H}$  е оператора на Хамилтон за системата. Неговите собствени стойности задават енергичният спектър на системата.

### 2.2. Уравнение на Шрьодингер за елементарна частица в три измерения

За елементарна частица в три измерения:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}) \Psi(\vec{r}, t) \quad (\text{II.2.2.})$$

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\vec{r})$$

където

- $\vec{r} = (x, y, z)$  е позицията на частицата в тримерното пространство,
- $\Psi(\vec{r}, t)$  е вълновата функция, чиито модул на квадрат е плътността на вероятността частицата да заема дадена позиция  $\vec{r}$  в даден момент от време  $t$ .
- $m$  е масата на частицата.
- $V(\vec{r})$  е временно независимата потенциална енергия на частицата на всяка позиция  $\vec{r}$ .

От явния вид на уравнението се вижда, че то е ЧДУ от 1 ред по времето и от 2 ред по координатите.

Неговото решаване изисква да познаваме началните условия ( $\Psi_0(\vec{r}) = \Psi(\vec{r}, 0)$ ),

където  $\vec{r}$  пробягва някаква тримерна област  $V$ , подмножество на  $\mathbb{R}^3$ ) и граничните условия по границата на  $V$  (тоест да знаем  $\Psi(\vec{r}, t)$ , когато  $\vec{r} \in \partial V$  за всяко  $t \in [t_1, t_2]$ ).

### 3. Уравнения на Максвел

Електромагнитното поле се описва от 4 вектора  $\vec{E}$ ,  $\vec{D}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  ( $\vec{E}$  и  $\vec{D}$  описват електричната компонента;  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  описват магнитната компонента). Всеки от тези вектори е функция на координатите  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и на времето  $t$ . Това означава, че електромагнитното поле се описва от 12 скаларни функции на координатите и времето.

Например:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = (E_x(x, y, z, t), E_y(x, y, z, t), E_z(x, y, z, t))$$

Тези функции са решение на система от 4 ЧДУ от 1 ред по координатите и времето, наречени уравнения на Максвел. Уравненията са 4 на брой, но са векторни, така че системата от скаларни ЧДУ се състои от  $4 \cdot 3 = 12$  уравнения. Те са напълно зададени, когато знаем тока на отместване  $\vec{J}_f$  и обемното разпределение на зарядите  $\rho_f$ , като функции на координатите и на времето.

(П.3.1.) Таблица: Формулировка в смисъла на *свободен* заряд и ел. ток

| Име                                                                              | Диференциална форма                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Законът на Гаус:                                                                 | $\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_f; \vec{\nabla} \cdot \vec{D} \equiv \text{div} \vec{D}$                                            |
| Законът на Гаус за магнетизма:                                                   | $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0; \vec{\nabla} \cdot \vec{B} \equiv \text{div} \vec{B}$                                                 |
| Уравнението на Максвел-Фарадей:                                                  | $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \vec{\nabla} \times \vec{E} \equiv \text{rot} \vec{E}$            |
| Теоремата на Ампер за циркулацията с добавката на Максвел за тока на отместване: | $\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_f + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \vec{\nabla} \times \vec{H} \equiv \text{rot} \vec{H}$ |

$\vec{E}$  - интензитет на електрическото поле

$\vec{H}$  - интензитет на магнитното поле

$\vec{D}$  - електрическа индукция

$\vec{B}$  - магнитна индукция

$\vec{J}_f$  - ток на отместване

$\rho_f$  - обемно разпределение на електрическите заряди

Пресмятане на ротация и дивергенция:

$\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} e_x + \frac{\partial}{\partial y} e_y + \frac{\partial}{\partial z} e_z$  - операторът "набла".  $e_x, e_y, e_z$  са единичните взаимноортогонални вектори по осите  $x, y$  и  $z$ , които образуват дясно ориентирана координатна система.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \det \begin{vmatrix} e_x & e_y & e_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} = \left( \frac{\partial}{\partial y} E_z - \frac{\partial}{\partial z} E_y \right) e_x - \left( \frac{\partial}{\partial x} E_z - \frac{\partial}{\partial z} E_x \right) e_y + \left( \frac{\partial}{\partial x} E_y - \frac{\partial}{\partial y} E_x \right) e_z \quad (\text{П.3.2.})$$

$$\vec{\nabla} \bullet \vec{B} = \frac{\partial}{\partial x} B_x + \frac{\partial}{\partial y} B_y + \frac{\partial}{\partial z} B_z \quad (\text{П.3.3.})$$

Решаването на системата уравнения на Максвел (виж (П.3.1.)) изисква да познаваме началните стойности на функциите  $\vec{E}$ ,  $\vec{D}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$ , а също тяхното поведение по границата на тримерната област, в която търсим електромагнитното поле.

Интересното при тези уравнения, които са линейни уравнения от 1 ред и по времето и по координати, е че в тях се съдържа в неявен вид геометрията на пространството на Минковски.

$$g = \|g_{ij}\| = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{vmatrix} \quad - \text{ метричният тензор в пространството на Минковски}$$

$$\left. \begin{aligned} x &= (x^0, x^1, x^2, x^3) \\ y &= (y^0, y^1, y^2, y^3) \end{aligned} \right\} \quad - \text{ два произволни вектора (събития) от пространството на Минковски}$$

$$(x, y) = \sum g_{ij} x^i y^j = x^T g y = x^0 y^0 - x^1 y^1 - x^2 y^2 - x^3 y^3 \quad - \text{ тяхното скалярно произведение}$$

Това всъщност е геометрията на пространствено-времето в специалната теория на относителността.

#### 4. Уравнение на Лаплас

В математиката уравнението на Лаплас е частно диференциално уравнение, наречено по името на Пеир-Симон Лаплас, който първи изучава неговите свойства.

Решенията на уравнението на Лаплас са важни в много области на науката, особено в областта на електромагнетизма, астрономията, и хидродинамиката, защото те описват поведението на електричните, гравитационните, и хидропотенциалите. Общата теория на решенията на уравнението на Лаплас е известна като теория на потенциала. В изучаването на топлопреноса, уравнението на Лаплас е стационарно топлинно уравнение.

#### 4.1. Уравнение на Лаплас. Дефиниция

В три измерения, проблемът е да се намери два пъти диференцируема функция  $\varphi$  с реални стойности, за реални променливи  $x$ ,  $y$ , и  $z$ , така че

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{II.4.1.})$$

Това също често се изписва като

$$\bar{\nabla}^2 \varphi = 0$$

или

$$\text{div grad} \varphi = 0$$

където  $\text{div}$  е divergence, и  $\text{grad}$  е gradient, или

$$\Delta \varphi = 0$$

където  $\Delta$  е оператора на Лаплас.

$$\bar{\nabla} \bullet \bar{\nabla} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \Delta$$

Решенията на уравнението на Лаплас са наречени хармонични функции.

Ако дясната страна е описана като дадена функция  $f(x, y, z)$ , тогава цялото уравнение се пише като:

$$\Delta \varphi = f$$

Тогава уравнението се нарича "Поасоново уравнение". Уравнението на Лаплас и уравнението на Поасон са най-простите примери на елиптични частни диференциални уравнения. Частният диференциален оператор,  $\bar{\nabla}^2$  или  $\Delta$ , (който може да бъде зададен за произволна размерност) е наречен оператор на Лаплас или просто Лапласиан.

Уравнението на Лаплас (и на Поасон) има единствено решение, ако знаем граничните условия за някаква тримерна област, където търсим функцията  $\varphi = \varphi(x, y, z)$

## 5. Уравнение на топлопроводност

### 5.1 Общ случай- нестационарно уравнение

Да изведем уравнението на топлопроводност [2]:

Нека  $T=T(x, y, z, t)$  е температурата на средата в точка  $(x, y, z)$  и в момента  $t$ . Да



приемем средата за изотропна. Тогава  $\rho = \rho(x, y, z)$ ,  $c = c(x, y, z)$ ,  $k = k(x, y, z)$  са съответно плътността, специфичният топлинен капацитет и коефициентът на топлопроводност в точка  $(x, y, z)$ . Да означим с  $F(x, y, z, t)$  интензитета на източниците на топлина в точка  $(x, y, z)$  в момент  $t$ .

Сега ще направим топлинния баланс за произволен обем  $V$  от средата, за интервала от време  $(t, t + \Delta t)$ . Нека  $S$  е границата на  $V$ ;  $\vec{n}$  е външната нормала към  $S$ .

Съгласно закона на Фурие през повърхността  $S$  в обема  $V$  навлиза топлина:

$$Q_1 = \int_S k \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} dS \Delta t = \int_S (k \text{ grad } T) \cdot \vec{n} dS \Delta t \quad (\text{II.5.1.})$$

По теоремата на Гаус имаме:

$$Q_1 = \int_V \text{div}(k \text{ grad } T) dV \Delta t \quad (\text{II.5.2.})$$

За сметка на топлинните източници в обема  $V$ , се отделя топлина:

$$Q_2 = \int_V F(x, y, z, t) dV \Delta t \quad (\text{II.5.3.})$$

Тъй като температурата в обема  $V$ , за интервала от време  $(t, t + \Delta t)$ , нараства с:

$$T(x, y, z, t + \Delta t) - T(x, y, z, t) \approx \frac{\partial T}{\partial t} \Delta t,$$

то затова е необходима топлина:

$$Q_3 = \int_V c\rho \frac{\partial T}{\partial t} dV \Delta t. \quad (\text{II.5.4.})$$

Топлинният баланс изисква  $Q_3 = Q_1 + Q_2$ , тогава замествайки  $Q_1$ ,  $Q_2$  и  $Q_3$  от формули (II.5.2.), (II.5.3.) и (II.5.4.), получаваме:

$$\int_V [\text{div}(k \text{ grad } T) + F - c\rho \frac{\partial T}{\partial t}] dV \Delta t = 0$$

Тъй като това уравнение трябва да е в сила за произволен обем  $V$  от средата, то изразът в скобите трябва да е 0, следователно:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(k \text{ grad } T) + F(x, y, z, t) \quad (\text{II.5.5.})$$

Нека средата освен изотропна да бъде и хомогенна, т.е.  $c$ ,  $\rho$  и  $k$  са const. Тогава за нестационарното уравнение на топлопроводност получаваме следния вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \Delta T + f(x, y, z, t) \quad (\text{II.5.6.})$$

$$a^2 = \frac{k}{c\rho}$$

$k$  - коефициент на топлопроводимост на средата

$c$  - специфичен топлинен коефициент на средата

$\rho$  - плътност на средата

$$f(x, y, z, t) = \frac{F(x, y, z, t)}{c\rho}$$

Често се използва следният еквивалентен запис на уравнение (II.5.6.):

$$\frac{\partial}{\partial t} T(x, y, z, t) - a^2 \Delta T(x, y, z, t) = f(x, y, z, t) \quad (\text{II.5.7.})$$

За да има уравнението единствено решение (тоест да намерим  $T = T(x, y, z, t)$  в

затворен обем  $V$ , подмножество на  $\mathbb{R}^3$  и в интервал време  $[t_1, t_2]$ ), трябва да знаем две неща:

1) началното разпределение на температурата (начално условие)

$$T(x, y, z, t) = T_0(x, y, z) \quad - \text{за } t=0$$

2) режимът на границата на средата (гранично условие)

(а) Задача на Дирихле - зададена е температурата върху границата  $S = \partial V$  :

$$T(x, y, z, t) = T_1(x, y, z, t) \quad - \text{върху } S$$

(б) Задача на Нойман - зададена е нормалната производна върху границата  $S = \partial V$  , т.е. зададен е потокът на топлина през границата:

$$-k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial \vec{n}} = T_2(x, y, z, t) \quad - \text{върху } S$$

$$(x, y, z) \in S$$

## 5.2 Стационарно уравнение на топлопроводност

Нека  $\frac{\partial}{\partial t} T(x, y, z, t) = 0 \Rightarrow T = T(x, y, z)$  , тоест температурата не зависи от времето,

тогава уравнението на топлопроводност добива вида (II.5.8.)  $\Delta T(x, y, z) = -\frac{f(x, y, z)}{a^2}$  .

Това фактически е уравнение на Поасон.

В следващата точка ще разгледаме няколко конкретни задачи за стационарното уравнение.

## 5.3 Приложение на COMSOL Multiphysics при анализ на полета в електротехнически устройства

Аналитичното решаване на частните диференциални уравнения, които описват сложните електротехнически процеси и физични явления, е труден процес и в някои случаи приложим само за някои прости случаи. Значително по-мощни и универсални са числените методи. Методът на крайните елементи (МКЕ) е метод за числено решаване на частни диференциални уравнения. Тези уравнения, заедно с подходящи, за задачата, гранични условия представляват математичен модел на електрическото, магнитното, електромагнитното, електростатичното, топлинното полета в дадено електротехническо устройство.

През последните години МКЕ се наложи със своята универсалност. Едно от големите му предимства е, че с него могат да се създадат мощни компютърни програми, които могат да се използват при решаването на широк клас поледи задачи, описващи се със сходни частни диференциални уравнения. С него могат да се изследват полета в хомогенни и нехомогенни, изотропни и анизотропни, линейни и нелинейни среди, могат да се решават задачи в двумерна и тримерни области, както и да се анализират нестационарни задачи. Тези предимства са го превърнали в доминиращ метод, използван в комерсиалните пакети за анализ на полета като COSMOS, COSMOS Desing STAR, ANSYS, QuickField, Maxwell, Flux и др.

COMSOL MULTIPHYSICS е мощен програмен продукт, базиран на МКЕ, който позволява моделиране и решаване на научни и практически проблеми. С този софтуер може лесно да се разширяват общоприети модели от физиката в MULTIPHYSICS модели. Не се изискват задълбочени познания от математиката или числен анализ. Чрез вградените физични модели е възможно за да изграждат модели с дефиниране на съответните физически компоненти - като свойства на материала, товари, гранични условия, източници, енергийни потоци и други. Вместо дефинирани базови уравнения,

COMSOL MULTIPHYSICS вътрешно компилира разширение PDES, представяйки целият модел. Продуктът съчетава гъвкав графичен потребителски интерфейс, използвайки езикът на познатата програма Matlab.

Математичната основа на COMSOL MULTIPHYSICS е система частни диференциални уравнения. Съществуват три начина на описване на PDES чрез математически режими на приложението:

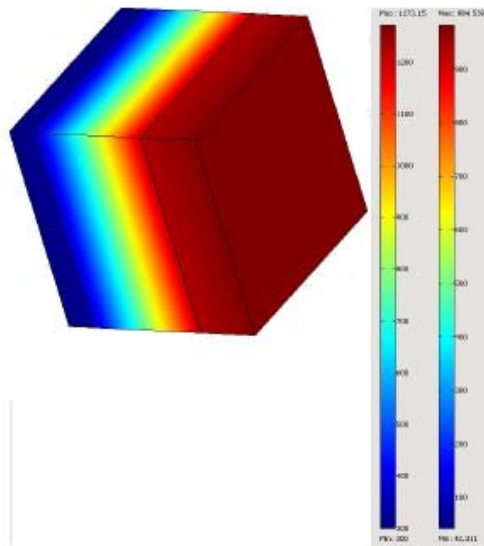
- коефициент на формата, подходящ за линейни или почти линейни модели;
- обща форма, подходяща за нелинейни модели;
- неустойчива форма, за модели PDES с граници, ръбове, или точки.

Използват се модели с изисквания за смесено пространство и производни по време.

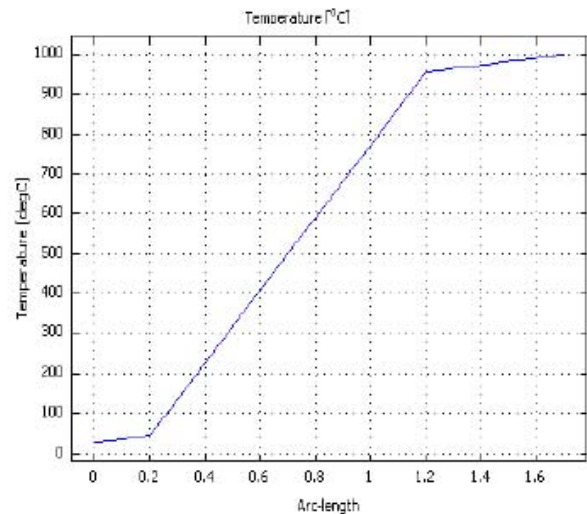
С помощта на програмата могат да се проведат различни видове анализ. Симулацията е проведена за топлинна задача при следните класически случаи:

### 5.3а. Теплопренасяне през плоска стена

Разглежда се трислойна стена. Източникът на топлина е отвън. Симулацията е при гранични условия на Дирихле – известна температура по повърхността. Полученият резултат е показан на фиг.1 и фиг.2.



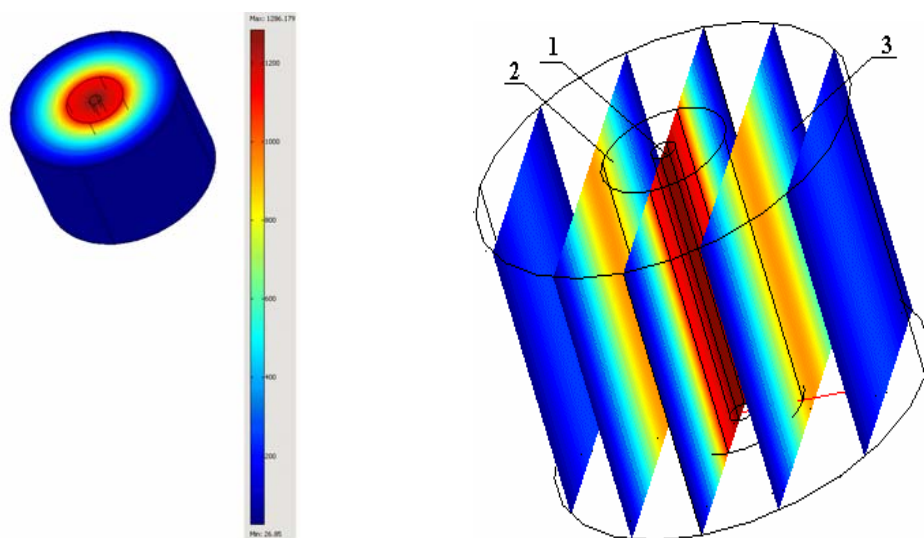
Фиг.1



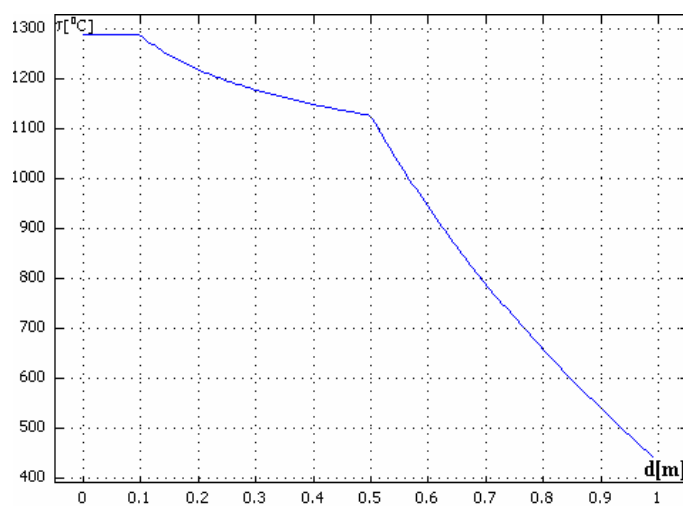
Фиг.2

### 5.3б. Теплопренасяне през цилиндрична среда

Цилиндърът се състои от три слоя. Източник на топлина се намира в най-вътрешния слой. Средният слой е вид термоизолация. Зададени са гранични условия на конвекция-лъчение към околната среда (Задача на Нойман). На фиг.3 и фиг.4 е представено разпределението на температурата в конкретен момент от преходния процес на нагряване, както и картината на разпределение на температурата в установен процес:



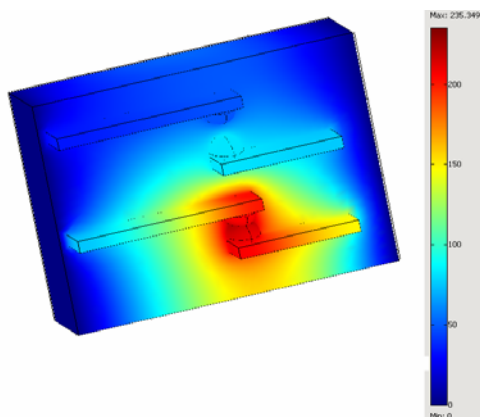
Фиг.3



Фиг.4

### 5.3в. Преходен процес на загряване на електрически контакти

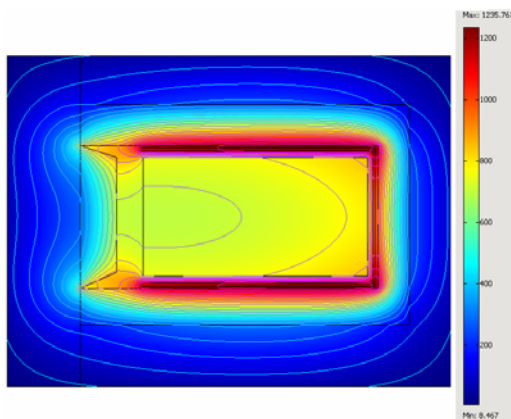
Показано е топлинното влияние на електрически контакт, по който протича ел.ток върху съседен контакт, по който не протича ток – фиг.5.



Фиг.5

### 5.3г. Електросъпротивителна пещ

На фиг.6 е показано загряване на пещ и разпределението на екипотенциалните линии. Оценено е влиянието на вратата на пещта върху температурното разпределение при нагреватели, разположени в горната и долната стена.



Фиг.6

Предложената програмна среда позволява да се реализират голям брой симулации на различни физични процеси и явления. Тя е особено подходяща за задачи със сложна геометрия и криволинейни граници на областта. Програмата позволява да се въведат разнообразни гранични условия и да се симулират стационарни и нестационарни процеси в статични и динамични среди, в тримерното пространство. Особено е важен факта, че всички ЧДУ и гранични условия са в диалогов прозорец, което позволява да се въведат или видоизменят някои от уравненията и да се въведат нелинейни параметри и среди. Програмната среда е изключително подходяща за анализ на полета и симулиране работа на електротехнически устройства.

### III. Заключение

Направен е кратък преглед на някои от основните диференциални уравнения във физиката, включващ уравненията на класическата механика в нейната Нютонова, Лагранжовата и Хамилтоновата формулировка, уравнението на Хамилтон-Якоби, уравнението на Шрьодингер, уравненията на Фарадей и Максвел, уравнението на Лаплас. Представени са необходимите и достатъчни условия за съществуване и единственост на решенията. Последните са илюстрирани по-подробно на базата на уравнението за топлопроводност. Предложен е извод на уравнението на топлопроводността използвайки единствено експерименталния закон на Фурие за топлопроводимостта и условието за топлинен баланс. За случая на стационарното уравнение на топлопроводността са показани числени решения на няколко конкретни задачи, използвайки документацията на COMSOL Multiphysics.

#### Цитирана литература:

1. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц; *Механика*; "Наука", Москва; 1965
2. В. С. Владимиров; *Уравнения математической физики*; "Наука", Москва; 1988

# Причинност на материалната фаза или една възможна , динамично-статистическа , интерпретация на квантовата механика

И. Г. Копринков

*Департамент по приложна физика, Технически Университет – София,  
бул. “Кл. Охридски” 8, 1756 София.*

Представени са теоретични и експериментални доказателства за съществуване на причинна връзка между фазата на вълновата функция и физическата реалност. Предложена е една възможна интерпретация на квантовата механика, определена като динамично-статистическа.

## I. Увод

Квантовата механика е вероятно най-успешната физична теория. Тя има основен принос за огромния прогрес на познанието в областта на микросвета и е нашият основен инструмент за проникване в света на градивните частици на материята - атоми, молекули и определени явления на субатомно ниво. Въпреки изминалите повече от осемдесет години от нейното създаване, тя и днес вълнува и вдъхновява физиците с нейните огромни възможности. Паралелно с това, квантовата механика продължава да бъде обект на научни дискусии и спорове, което спомага за нейното по-добро разбиране. Един от основните спорни проблеми в квантовата механика е свързан с нейната интерпретация. Днес, общоприетата е тъй наречената “стандартна” или “копенхагенска интерпретация”. Копенхагенската интерпретация представлява съвкупност от принципи и концепции, една от най-важните между които е тази за физическия смисъл на вълновата функция. Сред създателите на копенхагенската интерпретация личат имената на Нилс Бор, Вернер Хайзенберг и Макс Борн. Самата копенхагенска интерпретация не е хомогенна система от възгледи и в нея могат да се открият различни нюанси. Все пак, съгласно най-разпространеното и представително мнение, вълновата функция съдържа максимално пълната информация за една квантова система, но, въпреки това, тя е само инструмент на нашето познание за микросвета. Вълновата функция, сама по себе си, няма директен физически смисъл, но с нейна помощ могат да се конструират величини, които имат физически смисъл. Съгласно Макс Борн, описанието на реалността в термините на вълновата функция е съществено вероятно. Квадратът на модула (амплитудата) на вълновата функция дава плътността на вероятността  $w(\vec{r}, t)$ , например, да намерим една частица в дадена точка от пространството  $\vec{r}$  в даден момент от времето  $t$ , т.е.,

$$w(\vec{r}, t) = |\Psi|^2 = \Psi^* \Psi \quad (1)$$

Един от основните опоненти на квантовата механика в нейния вероятностен аспект е Айнщайн [1]. Той е считал, че квантовомеханичното описание в термините на вълновата функция е непълно и е предполагал, че пълно детерминистично описание на природата може да бъде намерено в рамките на определени параметри, наречени *скрити параметри*. Теорията на скритите параметри е опит да се създаде причинна (в класическото разбиране

на това понятие) квантова механика. Тази идея намира сериозно развитие в един от неговите последователи, Дейвид Бом [2]. Досега, обаче, нито една от значимите не-копенхагенски интерпретации [2-6] не се е наложила във физиката.

Един факт не може да не бъде отбелязан, а именно, ролята на фазата на вълновата функция е силно пренебрегната, както в копенхагенската, така и в другите значими интерпретации. В обичайното полярно представяне

$$\Psi = R(\vec{r}, t) \exp[-i\Phi(\vec{r}, t)] = R(\vec{r}, t) \exp[iS(\vec{r}, t)/\hbar] \quad (2)$$

елементите на вълновата функция са амплитуда  $R(\vec{r}, t)$  и фаза  $\Phi(\vec{r}, t)$ . Фазата с точност до константен фактор представлява самото физическото действие  $S(\vec{r}, t)$ , т.е.,  $\Phi(\vec{r}, t) = -\hbar^{-1}S(\vec{r}, t)$ . Установеното мнение на редица видни физици за фазата на вълновата функция е силно обезкуражаващо за търсене на физически смисъл в тази посока. Съгласно фон Нойман, всеки множител във вълновата функция  $\Psi$  с модул единица, т.е., от типа  $\exp(i\lambda t)$ , и постоянен в конфигурационното пространство (макар и иначе да е функция на времето  $t$ , *бел. на автора*) е принципиално ненаблюдаем [7]. И още, съгласно Ландау, всеки константен фазов множител от типа  $\exp(i\alpha)$ , с точност до който вълновата функция е определена поради самия математически формализъм, не се отразява на никакви физически резултати [8]. Настоящото разглеждане е продиктувано от факта, че определени аналитични резултати и критичен анализ на някои забележителни физични експерименти говорят в полза на това, че фазата на вълновата функция проявява причинно физическо поведение, което е еднозначно свързано със съпътстващите физически процеси и начални условия. Аргументите в полза на това могат да бъдат систематизирани в следните категории: частно-теоретични аргументи, общо-теоретични аргументи и експериментални аргументи.

## II. Причинност на материалната фаза

### 1. Частно-теоретични аргументи

За да изследваме фазовото поведение на една квантова система трябва да я въвлечем в реален физически процес, като я подложим на външно въздействие. За целта разглеждаме (двунивна) квантова система, която взаимодейства с електромагнитно (оптическо) поле от общ тип (с променлива амплитуда и фаза) и е подложена на статистически релаксационни процеси [9, 10]. За изследване на фазовите ефекти, особено подходящи са т.н. “облечени” квантови състояние, в термините на които параметрите на квантовата система и на електромагнитното поле участват по напълно равноправен и симетричен начин. Това не само отразява равноправието на встъпващите във взаимодействие системи, но и се оказва много полезно за интерпретацията на получените резултати. В допълнение, подходът е непертурбативен и резултатите важат в широк диапазон от интензитети на полето.

Проблемът за фазовото поведение на една квантова система се третира в рамките на временното уравнение на Шрьодингер

$$\hat{H}|\Psi(\vec{r}, t)\rangle = i\hbar\partial_t|\Psi(\vec{r}, t)\rangle \quad (3)$$



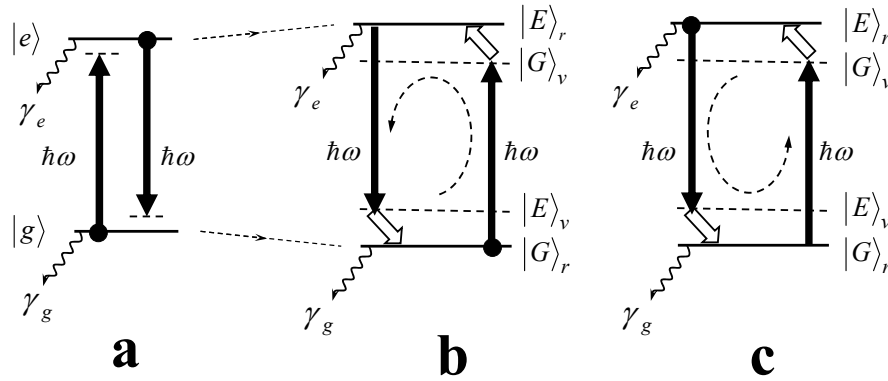
Намилтонианът на квантовата система за разглеждания случай, в представяне на собствените функции на непертурбирания Намилтониан, има вида

$$\hat{H} = \sum_{j=1}^2 \hbar \omega_j |j\rangle \langle j| - \mu E (|1\rangle \langle 2| + h.c.) - i\hbar \sum_{j=1}^2 \frac{\gamma_j}{2} |j\rangle \langle j| \quad . \quad (4)$$

Детайли за използваните означения, математическия формализъм и интерпретацията на резултатите могат да се намерят в [9, 10]. Векторът на състоянието  $|\Psi(\vec{r}, t)\rangle$  е суперпозиция от “голите” квантови състояния на непертурбираната система

$$|\Psi(\vec{r}, t)\rangle = \sum_j c_j(t) |j(\vec{r})\rangle \exp[-i(\varphi_j + \hbar^{-1} E_j t)] \quad , \quad j = 1, 2 \quad . \quad (5)$$

Началните фази  $\varphi_j$  на вълновите функции също са обект на разглеждане поради съображения подробно обосновани в [9].



**Фиг.1.** Еволюция на голите (a) към облечените квантови състояние при начално условие свързано с основно (b) и възбудено (c) състояние.

Следвайки стандартната процедура [10], проблемът се свежда до уравненията за движение на Бете-Лемб за амплитудите  $c_j$  на квантовите състояния

$$\begin{aligned} \partial_t c_1(t) &= (i/2)\Omega(t) \exp[-i\Delta\Phi(t)] c_2(t) - (\gamma_1/2) c_1(t) \\ \partial_t c_2(t) &= (i/2)\Omega(t) \exp[i\Delta\Phi(t)] c_1(t) - (\gamma_2/2) c_2(t) \end{aligned} \quad , \quad (6)$$

където  $\Omega(t) = \mu E_0(t)/\hbar$  е честотата на Раби,  $E_0(t)$  е амплитудата на електромагнитното поле,  $\Delta\Phi(t) = \Phi_e(t) - \Phi_g(t) - \Phi(t)$  е фазовата разлика определена от пълните фази на възбуденото  $\Phi_e(t)$  и основното  $\Phi_g(t)$  състояния и на електромагнитното поле  $\Phi(t)$ .

Строгото решение на проблема, уравнения (6), води до *неадиабатни вълнови функции*, въведени за първи път в [9, 10]. Еволюцията от голите към облечените квантови състояния при начално условие основно и възбудено състояние е показана на Фиг.1. Всяко облечено състояние се състои от една реална и една виртуална компонента [9-11]. Неадиабатният характер на състоянията се дължи на явното присъствие на полевите производни (тези на амплитудна и фазова по отношение на времето) и на

релаксационните членове, които се появяват по естествен начин в решението в резултат на прилагане на *обобщено адиабатно условие*, въведено в [9, 10].

$$\left| \partial_t^n (\partial_t \varphi - i\Omega^{-1} \partial_t \Omega) \right| \ll \left| \Delta\omega - i\gamma/2 \right|^{n+1-k} |\Omega|^k, \quad (7)$$

където  $n = 0, 1, 2, \dots$   $k = 0, 1, 2, \dots, n$ . Това е адиабатно условие от неограничен порядък, което обединява и обобщава конвенционалното адиабатно условие  $\left| (\Delta\omega - i\gamma)^{-1} E_o^{-1} \partial_t E_o \right| \ll 1$  [11], получаващо се от (7) при  $n = 0, k = 0$ , и адиабатното условие на Борн-Фок  $\left| \partial_t \Omega^{-1} \right| \ll 1$  [12], получаващо се от (7) при  $n = 0, k = 1$ . Конкретните решения в термините на неадиабатните вълнови функции са представени в [9, 10]. За целите на настоящото разглеждане основно значение има поведението на фазата на вълновата функция. Еволюцията на фазата на реалните и виртуални компоненти на основното и възбудено облечени състояния при начално условие *основно състояние*, както и съответните им значения, са представени на Фиг.2.

$$\begin{aligned} \Phi_{E,r} &= \Phi_{G,r} + \Phi_F + \Phi_{NAD} = \\ &= (\varphi_g + \varphi(t)) + \int_0^t \tilde{\omega}'_E dt' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{G,v} &= \Phi_{G,r} + \Phi_F = \\ &= (\varphi_g + \varphi(t)) + \int_0^t (\tilde{\omega}'_G + \omega) dt' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{E,v} &= \Phi_{E,r} - \Phi_F = \\ &= \varphi_g + \int_0^t (\tilde{\omega}'_E - \omega) dt' \end{aligned}$$

$$\Phi_{G,r} = \varphi_g + \int_0^t \tilde{\omega}'_G dt'$$

**Фиг.2.** Еволюция на фазата на вълновата функция при начално условие *основно състояние*.

$$\begin{aligned} \Phi_{E,r} &= \varphi_e + \varphi(t) - \varphi_0 + \int_0^t \tilde{\omega}'_E dt' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{G,v} &= \Phi_{G,r} + \Phi_F = \\ &= \varphi_e + \varphi(t) - \varphi_0 + \int_0^t (\tilde{\omega}'_G + \omega) dt' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{E,v} &= \Phi_{E,r} - \Phi_F = \\ &= \varphi_e - \varphi_0 + \int_0^t (\tilde{\omega}'_E - \omega) dt' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{G,r} &= \Phi_{E,r} - \Phi_F - \Phi_{NAD} = \\ &= \varphi_e - \varphi_0 + \int_0^t \tilde{\omega}'_G dt' \end{aligned}$$

**Фиг.3.** Еволюция на фазата на вълновата функция при начално условие *възбудено състояние*.

Еволюцията на фазата на вълновата функция по съответните компоненти на облекените състояния при начално условие *възбудено състояние*, както и съответните значения на фазата, са представени на Фиг.3.

Анализирайки поведението на фазата на вълновата функция на фиг. 2 и 3, може да се направи следното заключение [9, 10]: *Фазата на вълновата функция има поведение на адитивна величина, която еднозначно и причинно следва съпътстващите физични процеси и начални условия*. Всеки физичен процес, например, в случая, виртуално поглъщане, реално поглъщане на фотон (съпроводен с неадиабатен преход от виртуална към реална компонента), виртуално излъчване, реално излъчване на фотон (съпроводен с неадиабатен преход от виртуална към реална компонента) е съпроводен с прибавяне/изваждане на точна определена стойност на фазата съответстваща на придружаващия процес. Нещо повече, поведението и конкретните стойности на фазата не могат да бъдат правилно интерпретирани и разбрани без да се вземе предвид нейното причинно формиране в рамките на конкретния физичен процес и начални условия.

## 2. Общо-теоретични аргументи

Горното поведение на фазата представлява едно много сериозно наводящо съображение за причинност на материалната фаза, макар и само по себе си, по наше мнение, да не е достатъчно да се приеме като окончателно доказателство. Затова е необходимо да се потърси общо-теоретичен аргумент. Такъв може да се намери в рамките на т.н. хидро-динамично представяне на квантовата механика. Последното е известно почти от самото ѝ създаване [13, 14, 2]. Замествайки полярната форма на вълновата функция (2) в уравнението на Шрьодингер (3) се получава следната система от свързани уравнения:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\nabla S)^2}{2m} + V(\vec{r}, t) - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta R}{R} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial (R)^2}{\partial t} + \nabla \cdot \left( R^2 \frac{\nabla S}{m} \right) = 0 \quad (9)$$

Първото от тях (8) е известно като квантово-механично уравнение на Хамилтон-Якоби за физическото действие  $S(\vec{r}, t)$ , или фазата на вълновата функция  $\Phi(\vec{r}, t) = -\hbar^{-1} S(\vec{r}, t)$ , а второто уравнение (9) е просто уравнението за непрекъснатост на плътността на вероятността  $w = R^2 = |\Psi|^2$ . Последният член в (8),  $U(\vec{r}, t) = -(\hbar^2/2m)(\Delta R/R)$ , е известен като квантов потенциал и в него се състои основната разлика с класическото уравнение на Хамилтон-Якоби. Както се вижда от свързаните уравнения (8) и (9), амплитудата и фазата/действието не са независими една от друга, а взаимно се определят. Съгласно копенхагенската интерпретация, а също и други интерпретации, съществува връзка между *амплитудата* на вълновата функция и физическата реалност, например изразената с уравнение (1), т.е.,  $R(\vec{r}, t) \leftrightarrow \text{физическата реалност}$ . Свързаните уравнения (8) и (9) водят да връзката между действие/фаза и амплитуда, т.е.,  $S / \Phi \leftrightarrow R$ . В резултат на това, логически следва съществуването на следната *фундаментална връзка*:

$$S/\Phi \leftrightarrow R \leftrightarrow \text{физическа реалност} \quad (10)$$

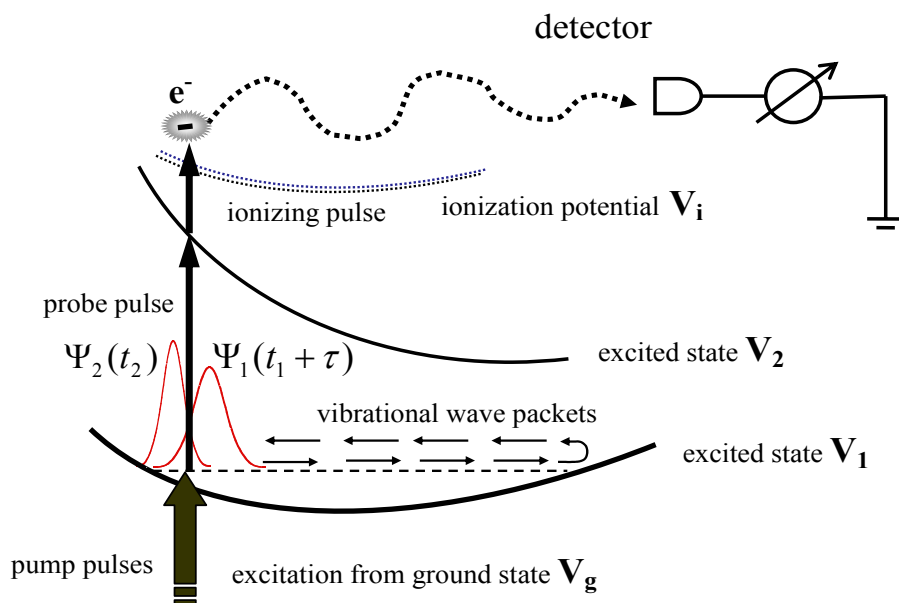
Горният резултат е напълно общ тъй като следва единствено от структурата на самата вълнова функция и от структурата на уравнението на Шрьодингер. Въпреки че хидродинамичното представяне е известно от самото създаване на квантовата механика, доколкото ни е известно, то не е използвано, до неотдавна [15-17], за разкриване на съществуването на фундаментална връзка между фазата на вълновата функция и физическата реалност. Интересно е да се отбележи още следното. Докато амплитудата на вълновата функция се подчинява на уравнението за непрекъснатост (9), което играе само спомагателна роля спрямо динамиката на квантовата система, то фазата/действието се подчинява на същинското динамично уравнение, т.е., на квантовото уравнение на Хамилтон-Якоби (8). Следователно, фазата/действието не само е свързана с физическата реалност, но тя носи същинската динамика на квантовата система. От структурата на свързаните уравнения още следва, че динамиката в квантовата механика не фигурира в чист вид, а е повлияна статистически от амплитудата  $R$  участваща в квантовия потенциал в динамичното уравнение (8). Тъй като квантовия “потенциал”  $U(\vec{r}, t) = -(\hbar^2/2m)(\Delta R/R)$  се определя от амплитудата на вълновата функция, то, поради статистическите свойства на амплитудата, по-удачно е той да бъде наречен *статистически член*. Статистическите свойства в квантовата механика също не са в чист вид, а са повлияни от динамиката посредством действието/фазата  $S$  в уравнението за непрекъснатост (9). Това дава основание да се мисли, че квантовата механика съдържа в себе си едновременно две начала, динамично и статистическо, макар и не в чист вид, носени от фазата/действието и амплитудата на вълновата функция, съответно. Тази същност на квантовата механика ясно се вижда в рамките на хидродинамичното представяне, но не е очевидна в рамките на Шрьодингеровото представяне. В зависимост от конкретните условия, всяко едно от тях може да бъде по-силно или по-слабо изразено. Всичко това дава основание да говорим за *динамично-статистическа интерпретация на квантовата механика*.

### 3. Експериментални аргументи

Може би най-важното от всичко казано до тук е, че горните аналитични резултати намират експериментално потвърждение. Критичният анализ на някои забележителни експерименти с вътрешно-атомни и вътрешно-молекулни вълнови пакети [18-20], макар и провеждани с друга цел, показват, че манипулацията на материалната фаза може да доведе до реално наблюдавани физични резултати. Оригиналната цел на споменатите експерименти е да се “визуализира” вътрешно-атомната (движението на вътрешно-атомните електрони) и вътрешно-молекулната (вибрационното движение на ядрата на молекулата) динамика. За разлика от стационарните квантови състояния, които са непрекъснато разпределени в пространството заето от квантовата система, например водородните вълнови функции, то суперпозицията от стационарни състояния може да създаде вълнови пакети, които се “стягат” много плътно около съответния квантов обект, вътрешно-атомен електрон [18] или ядро на молекула [19, 20], и позволяват по този начин да се “визуализира” вътрешната динамика на квантовата система, макар и не в смисъл на траектория на движение. За да се възбудят подобни локализирани вълнови пакети е необходимо времето за създаването им да бъде много по-късо от характерното време на съответната вътрешна динамика, например, еквивалентното време за “борово орбитиране” на електрона (с цялата условност на това понятие) или периода на трептене на молекулата. Боровото време за електрон в основно състояние на атома на водорода е от порядъка на  $150\text{ as}$  ( $\text{as}$  – аттосекунди,  $1\text{ as} = 10^{-18}\text{ s}$ ), докато характерният вибрационен

период попада във фемтосекундната област ( $1\text{fs} = 10^{-15}\text{s}$ ). Най-късият генериран до сега "светлинен" (по-точно в областта на екстремния ултравиолет, XUV) импулс от човека, който представлява и най-късия изкуствено генериран процес, е около  $130\text{as}$  [21]. Това налага експериментите с вътрешно-атомни вълнови пакети да се правят със суперпозиция от високолежащи ридбергови състояния, чийто период на орбитиране може да достигне до пикосекунди [18]. Провеждането на подобни експерименти в атоми и молекули е във възможностите на съвременните фемтосекундни лазерни технологии, с тенденция те да бъдат замествани от разработващите се вече източници на аттосекундни импулси и методи за измерване.

### Интерферометър на Майкелсън вътре в молекула



**Фиг. 4.** Генериране и еволюция на вътрешно-молекулни вълнови пакети и тяхната регистрация - принципна схема.

Идеята на експеримент демонстриращ влиянието на материалната фаза върху наблюдаем физичен процес може да се опише по следния начин. Къс лазерен импулс създава вълнов пакет, който се оставя да еволюира под действие на вътрешната динамика на квантовата система. В атомите, този вълнов пакет е суперпозиция от голям брой ридбергови състояния [18], а в молекулите е суперпозиция от голям брой ротационно-вибрационни състояния на дадено електронно състояние [19, 20]. Принципната схема на един подобен експеримент в молекула е представен на фиг.4. След известно време, например когато първият вълнов пакет се върне отново в областта където е създаден, нов лазерен импулс създава втори вълнов пакет. Двата вълнови пакета се наслагват и интерферират. Резултатът от тяхната интерференция се регистрира като локалната населеност на състоянието се възбуди до по-горно ниво и след това атомът или молекулата се йонизират. Полученият йонен ток е пропорционален на локалната населеност на съответното суперпозиционно състояние, която от своя страна зависи от детайлите на интерференцията на вълновите пакети. Всичко това позволява да се

наблюдават ефекти, които са директно свързани с вътрешно-атомните и вътрешно-молекулните процеси. Резултатът от интерференцията може да се контролира и манипулира чрез промяна на редица макроскопични параметри, като временната задръжка между лазерните импулси, носещата честота на лазерните импулси (което променя средната енергия на вълновите пакети), фазата на лазерния импулс и др. Интересно е да се отбележи, че всички тези параметри водят по един или друг начин до промяна на относителната фаза между вълновите пакети, скоростта на "навъртане" на материална фаза, или на началната фаза на вълнови пакети в момента на тяхното създаване. И всичко това се отразява на резултата от интерференцията на вълновите пакети и може да се регистрира от детектиращата система. Следователно, *интерференцията на вътрешно-атомните/молекулни вълнови пакети води до реално наблюдаеми физически ефекти, които по дефинитивен начин се влияят от материалната фаза.* Подобни резултати се получават и при интерференция на вълнови пакети на свободни частици.

Интересен е и следния паралел при тези експерименти. Интерференцията на вълнови пакети в атома може да се разглежда като своеобразен интерферометър на Юнг вътре в атома, а на вълнови пакети в молекулата – като своеобразен интерферометър на Майкелсън вътре в молекулата, фиг.4. Основната разлика при тези интерферометри е, че вместо светлина се използват вълнови пакети, т.е., суперпозиция от вълнови функции, а източник на тези вълнови пакети представлява локалната област от пространството вътре в квантовата система, където тези пакети се генерират.

## Заклучение

Теоретичните и експериментални резултате показват, че фазата на вълновата е причинно и еднозначно свързана със съпътстващите физически процеси и начални условия. Фазата/действието на вълновата функция се определя от квантовомеханичното уравнение на Хамилтон-Якоби, повлияна статистически от амплитудата, и в основна степен е свързана с динамиката на квантовата система. Амплитуда на вълновата функция се определя от уравнението за непрекъснатостта на плътността на вероятността, повлияно динамически от фазата/действието, и в основна степен е свързана със статистическите свойства на вълновата функция. Вълновата функция съдържа едновременно динамични и статистически характеристики на квантовата система, което е основа за динамично-статистическа интерпретация на квантовата механика.

## Литература

1. A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, Phys. Rev. **47**, 777 (1935)
2. D. Bohm, Phys. Rev. **85**, 166 (1952)
3. R. Feynman, Rev. Mod. Phys. **20**, 367(1948)
4. R. B. Griffiths, J. Stat. Phys., **36**, 219 (1984)
5. H. Everett, Rev. Mod. Phys., **29**, 454 (1957)
6. W.H. Zurek, Rev. Mod. Phys., **75**, 715 (2003)
7. J. von Neumann, Mathematical Foundations of Quantum Mechanics, Princeton University Press, 1955.
8. L.D. Landau, E.M. Lifshitz, Quantum Mechanics, Non-relativistic Theory, Nauka, Moscow (in Russian), 1989
9. I. G. Koprnikov, Phys. Lett. A **272** , 10 (2000).

10. I. G. Koprinkov, J. Phys. B: At. Mol. and Opt. Phys. **34** , 3679 (2001).
11. D. C. Hanna, M. A. Yuratich, D. Cotter, *Nonlinear Optics of Free Atoms and Molecules*, (Springer-Verlag, 1979).
12. M. Born, V. Fock, Z. Phys. **51**, 165 (1928).
13. L. de Broglie, C. R. Acad. Sci. Paris **183**, 447 (1926)
14. von E. Madelung, Z. Phys. **40**, 322 (1926)
15. I. G. Koprinkov, Proc. of the XXIII International Conference on Photonic Electronic and Atomic Collisions, ICPEAC 2003, Stockholm, Sweden 23 - 29 July, Mo196.
16. I. G. Koprinkov , arXiv:0811.4310v3
17. I. G. Koprinkov, submitted.
18. M. W. Noel and C. R. Stroud, Jr, Phys. Rev. Lett. **75**, 1252 (1995)
19. N.F. Scherer, A.J. Ruggiero, M. Du, G.R. Fleming, J. Chem. Phys. **93**, 856 (1990)
20. J. J. Gerdy, M. Dantus, R. M. Bowman, A. H. Zewail, Chem. Phys. Lett., **171**, 1 (1990)
21. G. Sansone et. al., Science, **314**, 443 (2006).

## Material phase causality or a dynamics-statistical interpretation of the quantum mechanics

I. G. Koprinkov

*Department of Applied Physics, Technical University of Sofia,  
1756 Sofia, Bulgaria*

*Abstract* Theoretical and experimental evidences of existence of a causal relationship between the phase of the wave function and the physical reality are presented. Dynamics-statistical interpretation of the quantum mechanics is proposed on that ground.

# **Адронният ускорител – голямата загадка или експериментът на експериментите**

Мирослав Стайков и Виктор Стойнов

*Факултет по телекомуникации, Технически университет – София  
бул. “Кл. Охридски” 8, 1756 София*

## **I. Въведение**

Новият ускорител на частици е разположен на 100 метра под земята на границата между Франция и Швейцария. Зашеметяващото съоръжение представлява дълъг 27-километров тунел, чиято мощност ще превъзхожда 7 пъти американския ускорител Tevatron. В централната му част са разположени две гигантски тръби, които ще поддържат температура, по-ниска от космическата. Те са изградени от хиляди свръхпроводими нишки от ниобиево-титаниева сплав. Всяка нишка е 10 пъти по-тънка от човешки косъм, а общата им дължина е над 10 пъти разстоянието между Земята и Слънцето! Свръхниските температури от 1,9K (-271.25°C) ще се достигат при условия на дълбок вакуум, като налягането в тръбите ще бъде десет пъти по-слабо от това на Луната. Ускоряваните субатомни частици (например протони или тежки йони) ще се получават от водород, като за достигане на максимален интензитет на лъчите ще са необходими едва 2 нанограма водород на ден. Иначе казано, за да изразходва “цял” един грам водород, на колайдера ще са му нужни 1 милион години..... Ускорените частици ще се движат под действието на мощно магнитно поле с почти скоростта на светлината, като всяка от тях ще изминава цялата 27-километрова дължина повече от 11 000 пъти в секунда. Магнитите на колайдера имат тегло от около 10 000 тона желязо и надминават по масата си дори Айфеловата кула. На 4 възлови места в LHC двете ускоряващи частиците тръби се пресичат, което води до сблъскване на протоните и до още по-високата им скорост. Енергията, получена от светкавичното движение на частиците, ще бъде достатъчна за разтопяването на половин тон мед или за мигновеното унищожаване на малък автомобил.

## **I. Назад в миналото**

Идеята за пътешествие във времето е вълнувала човечеството от древността и теоретично е развита от колегата на Алберт Айнщайн – австрийският математик Курт Гюдел. Той, с помощта на теорията на относителността, още през 30-те години на миналия век доказва принципната възможност за преместване в миналото. След раждането на неговата хипотеза известни физици яростно започват да опровергават идеята му, тъй като пътуването във времето заплашва с появата на парадокси и нарушава принципа на причинно-следствените връзки. Пътувайки във времето например, Мартин МакФлай – героят от филма “Завръщане в бъдещето”, успява драматично да промени пространствено-времевия континуум. Той прави така, че собствената му майка да се влюби в него, вместо в баща му, и по този начин застрашава появата си на белия свят...

Всъщност, когато енергията на LHC се концентрира върху субатомна частица (като протонът, който е трилион пъти по-малък от мушица), тя се ускорява до светлинната скорост. При тези условия, съгласно Теорията на относителността, с нея биха се случили странни изменения в пространствено-времевите ѝ характеристики. Гравитацията на Земята слабо изкривява четирите познати ни измерения, а колайдерът е способен така да



деформира времето при тези скорости, че то да се “заклучи” в кръг. Подобно явление физиците наричат “затворена времеподобна крива”, която прави теоретично възможно връщането в миналото. Тази образна схема се допълва и от теорията, предложена през 1988 година от професор Кип Торн и колегите му от Калифорнийския технологичен институт в Пасадена. Още тогава те демонстрираха, че пространствено-времевите (т. нар. червейни) тунели могат да дадат зелена светлина за преместване във времето. Тази теория доби световна популярност след публикуването на романа на Карл Саган “Контакт”, по който бе създаден и едноименен филм. Учените поддържат мнението, че LHC ще създава лесно червейните тунели, тъй като затворените времеподобни криви могат да се появят при сблъсък на ускорените частици и така да се преместят във времето.

Разбира се, за реализиране на истинско пътешествие е необходимо да се преодолеят редица проблеми и един от тях е, че през миниатюрните канали на този етап от експериментите може да премине само субатомна частица. Засега най-оптимистичните надежди са, че LHC ще докаже съществуването на червейните тунели - ако част от енергията на Големия адронен колайдер се изгуби, това ще бъде обяснено именно с възможността частиците да пронизват времето през тунелите.

### **III. Пореден сблъсък с тъмната енергия**

Една от загадките в предложената концепция за затворената времеподобна крива се крие в тайнствената природа на силата, която държи червейните канали отворени, за да се осъществи преместване във времето. Тъмната енергия – антигравитационният фантом, който обхваща Вселената, може да е силата, която поддържа каналите открити. Ако сблъсъкът на частиците в комбинация с фантомната енергия доведе до създаването на времевите тунели, скоро може да очакваме изненадващо посещение от цивилизации от бъдещето.

Професор Дейвид Дойч – един от водещите учени в Оксфорд, счита, че на този етап можем да говорим само хипотетично за крайните резултати. Доктор Браян Кокс от Манчестърския университет обобщава: “Енергията от милиардите космически лъчи, които са навлизали в земната атмосфера в продължение на последните няколко милиарда години, със сигурност е по-голяма от енергията на LHC. По тази логика пътешествениците от бъдещето отдавна вече е трябвало да ни посетят.”

### **IV. Големите очаквания**

По предварителен план до края на юни магнитите на LHC трябваше да се охладят до необходимата свръхниска температура, а в края на юли и началото на август – да бъде пуснат първият лъч от протони. За да се достигнат предвидените за тази година енергии от 10 TeV ще изчакаме до края на лятото. Очаква се първите сблъсъци на високоенергийни частици да се осъществят в края на септември. През целия зимен период обаче съоръжението ще бъде изключено. Ръководството на проекта е решило през 2008 г. да не се достига проектният максимум от 14 TeV, а първите сблъсъци с максимална енергия да станат реалност през 2009 година. Трябва да отбележим и някои песимистични прогнози сред учените. Вече се появиха различни хипотези за глобален катаклизъм, които налагат идеята, че при достигане на пълната мощност на колайдера ще се формират черни дупки, които ще нарастват и ще погълнат планетата ни. Противниците на грандиозния експеримент дори подадоха иск срещу правителството на САЩ и CERN с настояване опитът да се отложи с няколко месеца до гарантиране на напълно безопасни условия. Учените от CERN обаче са категорични, че мощните космически лъчи, които всеки ден бомбардират Земята, са несравнимо по-високоенергийни от мощността на LHC. И ако

това застрашаваше планетата ни, то досега тя да е била унищожена.... За да успокои духовете, на 6-ти април CERN проведе ден на отворените врати. Тогава многобройните посетителите се разходиха в просторния ускорител, наблюдаваха интересни физични експерименти, изложби и научно-популярни филми, а поканените двама Нобелови лауреати изнесоха лекции пред широката аудитория. В крайна сметка – експериментът продължава. Дали ще ни изненадат крайните резултати от внушителното съоръжение? Нека да бъдем търпеливи – бъдещето скоро ще покаже!

Част от **въпросите**, на които 7000 учени от цял свят се надяват да получат отговори след експериментите в Големия адронов колайдер са:

Дали Стандартният модел нарушава механизма на Хигс за образуване на масите на елементарните частици? Ако не, колко са Хигс бозоните и каква е масата им?

Ще бъде ли по-точното измерване на масите на барионите напълно съвместимо със Стандартния модел?

Имат ли елементарните частици *суперсиметрични партньори*?

Защо има очевидно нарушаване на симетрията между материя и антиматерия?

Съществуват ли допълнителни измерения (както предсказва теорията на струните) и можем ли да ги "видим"?

Какво всъщност са тъмната материя и тъмната енергия?

Защо гравитацията е с много порядъци по-слабо взаимодействие от останалите три?

Въпреки че отговорите на тези въпроси биха били безценни, новият ускорител на ЦЕРН си има **цена**, която не е никак малка. Първоначално приетата през 1995 г. стойност на проекта е била 1700 млн. евро плюс 140 млн. евро за експериментите, но през 2001 г. е направено преизчисляване и цената се е вдигнала с 300 млн. евро за ускорителя и 30 млн. евро за експериментите, което общо прави колосалните 2.17 млрд. евро. По време на строителството са изниквали множество проблеми пред инженерите и всичко това доведе до преместване на крайния срок от 2005 към април 2007, а на 22 юни ЦЕРН обяви нов срок: **май 2008 г.**

Съществуват известни **притеснения относно безопасността** на Големия адронов колайдер. Според някои хора експериментите в него могат да предизвикат няколко теоретични катастрофи, способни да унищожат Земята или дори Вселената! Например:

Създаване на стабилна черна дупка;

Създаване на странна материя, по-стабилна от обикновената материя;

Създаване на магнитни монополи, които да катализират протонния разпад;

Инициране на преминаване към различен квантово-механичен вакуум.

Основните притеснения са следните:

***Много мощни сблъсъци на частици?***

Сблъсъците в ускорителя действително ще са най-енергичните, правени някога в лаборатория, но са далеч от мощността на колизиите, ставащи постоянно в природата.

При избухване на свръхнови или при раждане на [черни дупки](#) се образуват т. нар. *космически лъчи*. Тези лъчи са с огромни енергии и пътуват от краищата на Вселената почти със скоростта на светлината, прекосяват милиарди светлинни години и се случва да навлезнат в земната атмосфера, при което неминуемо някои от тях се сблъскват с частици от атмосферата. **ЛНС не прави нищо друго, освен да пресъздава подобни естествени събития в лаборатория, но в много по-малък мащаб.** Такива сблъсъци са ставали в продължение на 4.5 милиарда години тук на Земята, както и на Луната, Марс, Слънцето и другите планети, и досега не е установено да са им навредили.

### ***Създаване на черни дупки?***

Черни дупки се образуват при колапс на масивни звезди, при което огромна маса се концентрира в една точка. Колкото по-малка е масата на звездата (или енергията), толкова по-слабо е привличането. Според някои физици в ЛНС могат да се създадат [микроскопични черни дупки](#) (с големината на протон), но това е възможно само ако съществуват допълнителни измерения. Дори и да е така, енергията на мини черните дупки не може да е по-голяма от енергията на създалите ги адрони. Това значи, че те няма да имат необходимата сила, за да погълнат каквато и да е материя (дори и да са се образували във вътрешността на най-плътните познати ни обекти — неутронните звезди). Нито необходимото време, защото [черните дупки губят маса](#) в процес, наречен изпарение. Колкото по-малки са те, толкова по-интензивно се изпаряват. Тези мини черни дупки ще съществуват само за частица от секундата преди да изчезнат. Освен това, ако при сблъсъци в ускорителя могат да се създадат мини черни дупки, то такива са създавани в продължение на милиарди години от космическите лъчи. И все пак досега Земята не е погълната.

### ***Пресъздаване на Големия взрив?***

Енергията в ускорените частици е силно концентрирана, но по абсолютна стойност е много по-малка от енергиите в ежедневието ни. Когато физиците казват, че ще пресъздадат [Големия взрив](#) те нямат предвид, че ще стане гигантска експлозия, от която ще се роди нова вселена, а че за много кратко време в силно концентрираната зона на сблъсъка (с размер на един протон) плътността на енергията ще бъде като тази моменти след Големия взрив.

### ***Strangelets?***

[Стрейнджлетите](#) са хипотетични частици, неоткрити досега, които са съставени изцяло от странни (strange) кварки. Те са по-тежки от нормалните кварки, съставляващи нормалната материя, поради което са силно нестабилни. Дори и да съществуват, електромагнитните им свойства ще ги отблъскват от нормалната материя и те просто ще се разпаднат за части от секундата.

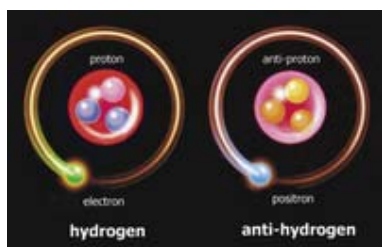
### ***Радиация?***

При ускорителите не може да се елиминира радиоактивното излъчване, понеже то е неизбежна част от изследваните процеси. В ЦЕРН са взети всички възможни мерки, за да се намали до минимум облъчването на персонала и изтичането на радиация в околната среда. Спазени са швейцарските, френските и общите европейски директиви по отношение на допустимата радиация. ЛНС е разположен в тунел на 100 метра под земята,

което значи, че радиацията при работа на ускорителя, както и остатъчната радиация, няма да могат да изтичат. Само изпомпваният въздух ще бъде слабо радиоактивен: с интензитет около 240 пъти по-нисък от този на естествения радиоактивен фон, породен от същите онези космически лъчи и други природни източници.

## V. Няколко думи за Антиматерията:

### Антиматерията



Само секунда след раждането на Вселената тя била наводнена от частици и през следващите 300 милиона години звездите и галактиките започнали да се оформят във вида, познат ни днес. Но има един голям проблем! Не би трябвало да ни има. Хората, планетите, звездите, галактиките — всичко това би трябвало да е нереален сън. На теория нищо не трябва да съществува.

Според физиката, Големият взрив трябва да е създал по равни количества материя и антиматерия. Антиматерията е "огледалният образ" на материята — има същата маса, но противоположен заряд. Заради различията си, когато тези първични врагове се срещнат, те се унищожават напълно, от което се получава ослепителна светлина. Още в самото начало би следвало материята и антиматерията да са се анихилирали и да не са оставили нищо друго, освен хало от остатъчна светлина.

Ние никога не сме намирали достатъчно големи количества антиматерия във Вселената. Не е изключено да има антизвезди и антигалактики изградени изцяло от антиматерия, но които са стабилни, защото никога не са влизали в контакт с материята. Всъщност ако някога открием извънземни преди да се срещнем ще трябва да проверим дали не са от антиматерия, иначе ще стане лошо и за нас, и за тях.

Изглежда очевидно, че във Вселената има повече материя, отколкото антиматерия. Материя има навсякъде около нас, но антиматерия почти не сме виждали. Как се е получил този дисбаланс, след като и двата вида частици са били по равно? Никой не знае със сигурност. Физиките, специалисти по елементарните частици смятат, че излишъкът от материя е останал, защото античастиците не са съвсем точно противоположни на нормалните частици. За пръв път това откритие е било направено през 60-те години на XX век от Джеймс Кронин и Вал Фич, които печелят Нобелова награда за работата им по т. нар. елементарни частици каони.

Физиките мислят, че каоните имат по-дълъг живот от антикаоните, но все още не са сигурни дали това е достатъчна причина материята да тържествува. За да изследват тези загадки физиките създават антиматерия като сблъскват частици в огромни лаборатории, наречени ускорители на частици. Те могат да пресъздадат състоянието на ранната Вселена и като изследват тези древни битки се надяват да разбулят мистерията на нашето оцеляване

Статия :

Прочутият английски физик Стивън Хокинг не вярва, че при започващия днес в ЦЕРН /междуправителствена европейска организация за ядрени изследвания в Женева/ експеримент, няма да бъдат създадени нито черни дупки, нито “божията частица”.

Макар да очаква да получи Нобелова награда, ако все пак бъдат създадени черни дупки, Хокинг не е оптимист. Според него вероятността в Големия адронен колайдер да бъдат създадени миниатюрни черни дупки, е по-малка от един процент. “Ако Големият адронов колайдер създаде малки черни дупки, няма съмнение, че ще спечеля Нобелова награда, когато демонстрират свойствата, които аз предвидих. Мисля обаче, че вероятността Големият адронен колайдер да има достатъчно енергия за тяхното създаване е по-малка от един процент”, каза Хокинг. От друга страна той може да изгуби 50 британски лири от баса си с колегата си Горди Кейн, който за разлика от Хокинг е убеден в съществуването на “божията частица”. Ако частицата, която се смята за отговорна за факта, че материята има маса, съществува, е почти сигурно, че Големият адронен колайдер ще я открие. Хокинг обаче казва: “Големият адронов колайдер ще увеличи четири пъти енергията, с която се изследват ударите между частиците. Според досегашните разбирания това трябва да е достатъчно да бъдат открити божии частици. Мисля, че ще бъде много по-интересно, ако не ги открием. Това ще означава, че нещо е грешно и ще трябва отново да се премисли. Обзаложих се на 50 лири, че няма да открием божията частица”, каза Хокинг. Той може да получи Нобелова награда, ако бъде потвърдена неговата теория от 1974 г., според която черните дупки могат да емитират излъчване въпреки силната си гравитация. /в. “Ютарни лист”/

Причините да не се притесняваме за безопасността ни не са просто измислени от група хора, а са резултат от десетилетия научни изследвания в държави от цял свят. Разбира се, има много малка вероятност всичките физици по света да са сбъркали, както и има вероятност *"LHC да създаде дракони, които да ни изядат"*.

Без навлизане в неизвестното няма научно-технически прогрес. Все някой трябва да може да прецени дали даден експеримент е рисков и дали може да се извърши. По-добре да се доверим на физиците, отколкото на 99% от останалите хора по земята, които и идея си нямат за какво става въпрос.

## Ускорители на елементарни частици

Диана В. Илиева

*Транспортен факултет, Технически Университет – София,  
бул. “Кл. Охридски” 8, 1756 София*

Докладът разглежда същността на колайдера като машина, приложението и значението му в съвременната физика. Описани са общите за всички ускорители компоненти. Разгледани са структурата и принципите на действие на видовете ускорители. Отделено е внимание и на най-нашумелият експеримент с колайдер - опитът в ЦЕРН с LHC, като са посочени целите, устройството и графикът на ускорителя, предизвикал толкова дебати.

Съвременната физика на високите енергии не може да се развива като наука без помощта на ускорителите на елементарни частици. Откакто бе доказано, че съставните единици на атома имат дори по-сложна структура от предполагащото, ускорителите са начинът да надникнем в тези най-малки блокове градящи вселената ни и да разберем взаимодействията в микрокосмоса.

### Какво представляват и как работят ускорителите на частици?

Това са едни от най-големите и мощни машини на нашето съвремие и представляват сложни съоръжения за ускоряване на електрони, протони, атомни ядра и йони на леки и тежки елементи за сметка на енергията на подходящо комбинирани постоянни или променливи електрични и магнитни полета. По формата на траекториите на частиците ускорителите се делят на линейни и циклични (циклотрон, бетатрон, синхротрон, фазотрон, синхрофазотрон), а по начина на ускоряване се разграничават електростатични, вихрови, индукционни, резонансни. В линейните ускорители поток от частици се ускорява праволинейно в медна тръба с помощта на генератори на вълни, наречени клистри, докато в кръговите ускорители частиците се ускоряват по криволинейна траектория в затворена тръба. И в двата случая щом достигнат необходимите енергитични нива те се сблъскват с избраната за случая мишена и детектори засичат лъчението и получените изотопи/ нови частици. Траекторията на частиците се контролира чрез електромагнити, които при нужда я изкривяват.

### За какво се използват тези ускорители?

Чрез колайдерите се обстрелват ядра с ускорени високоенергитични частици като така се изследват ядрените им взаимодействия, получават се нови изотопи и химични елементи, елементарни частици, като с допълнителни устройства могат да се формират вторични снопове от  $\pi$ -мезони,  $K$ -мезони, антипротони, неутрони и др. Така ускорителите на елементарни частици дават един първичен и няколко вторични снопа от високоенергитични частици. Тези машини са намерили приложение както във физиката и техниката, така и в медицината при лечението на злокачествени тумори.

## КОМПОНЕНТИ.

Независимо от вида, компонентите на ускорителите са следните:

**Източник на частици** — от тук идват частиците, задвижвани в колайдера. Те могат да бъдат електрони, протони, позитрони, йони, ядра на тежки и леки елементи и др.

**Медна тръба** — по нея се движат ускорените частици. Тръбата е изработена от метала мед, защото той е много добър електромагнитен проводник, като отстъпва по качества единствено на среброто, но то значително би оскъпило направата на колайдера. При големите ускорители тези тръби са дълги километри.

**Клистриони** — генерират микровълни, чрез които се придава допълнителна енергия на частиците. Разположени са на равни интервали по дължината на ускорителя.

**Електромагнити** — могат да са обикновени или свръхпроводими и не позволяват на снопа частици да се разпръсне. Тяхната роля е да го карат да се движи като фокусиран, плътен сноп в средата на тръбата. Поради по-голямата плътност нараства и броят на сблъсъците.

**Мишени** — различават се според вида и целта на експеримента. Могат да бъдат както тънки метални фолия, така и противоположно движещ се поток от определени частици.

**Детектори** — те са ключовият елемент на ускорителя. Те отчитат новообразуваните частици и излъчената при сблъсъка радиация. Детекторите са няколко вида: с втечен газ, наситени газови изпарения или пък твърди. Когато частицата премине през тях оставя следа и така бива засечена. Някои детектори тежат хиляди тонове и са с размери от порядъка на 30-40 м.

**Вакуумни системи** — вакуум системите поддържат среда на дълбок вакуум, и така предотвратяват възможни възниквания на искри породени от микровълните, както и нежеланите сблъсъци с атмосферните частици.

**Охлаждащи системи** — при насищането на движещите се частици с енергия температурата се покачва, което може да доведе до разтапяне или разширяване на медните тръби. Тези нежелани последствия се предотвратяват чрез охлаждащите системи. Ако магнитите на колайдера са свръхпроводими, те трябва да се охлаждат с течен хелий и течен азот до няколко градуса над абсолютната нула, като течния азот служи само за намаляване на прехода между течния хелий и външната среда.

**Компютърни системи** — чрез тях се контролират процесите на колайдера. За да функционират оптимално са им необходими много бързи процесори и голяма памет. Това са едни от най-мощните компютри на света, които са свързани в големи мрежи.

**Предпазни щитове** — при сблъсък на ускорените частици голяма част от енергията се освобождава като радиация, особено под формата на опасните гама лъчи. Те са много опасни, затова ускорителите са дълбоко под земята (LHC например е на 100 метра под повърхността) и са облечени в кожуси от стоманобетон. Когато работят, там не се допускат хора. Нивото на радиационния фон се следи постоянно.

**Захранваща система** — ускорителите често те са вързани към електроразпределителната мрежа, но понякога имат собствени генератори, защото консумират големи количества електроенергия.

**Пръстени за съхранение** — в тях се прибират частиците, които вече са ускорени, като в този пръстен се поддържа тяхната скорост. Той е умалено копие на основния.

Всички тези компоненти работят в перфектен синхрон.

## ВИДОВЕ УСКОРИТЕЛИ.

### ЛИНЕЕН УСКОРИТЕЛ

Линейният ускорител представлява система от кухи цилиндри, всеки следващ все по-дълъг от предходния, поместени във вакуум. Източникът на заредени частици се поставя пред първия - най-късия цилиндър. В цилиндъра върху движещата се частица не действат сили и скоростта ѝ е постоянна. Между всеки два цилиндъра е приложено напрежение  $U$ , така че частица със заряд  $e$ , при преминаването си между два цилиндъра получава допълнителна енергия  $eU$ . Скоростта  $v$  и кинетичната ѝ енергия нарастват. Дължината на всеки следващ цилиндър е избрана така, че частицата с вече по-висока скорост да премина през него за същото време, за което е преминала през предния. С други думи времето за изминаване на дължината на цилиндъра се запазва константно. Следователно може да се използва променливо напрежение с постоянна честота (което технически е по-лесно) и да се подберат дължините на цилиндрите така, че всеки път, когато частицата преминава от един цилиндър в друг, тя да получава допълнителна порция енергия.

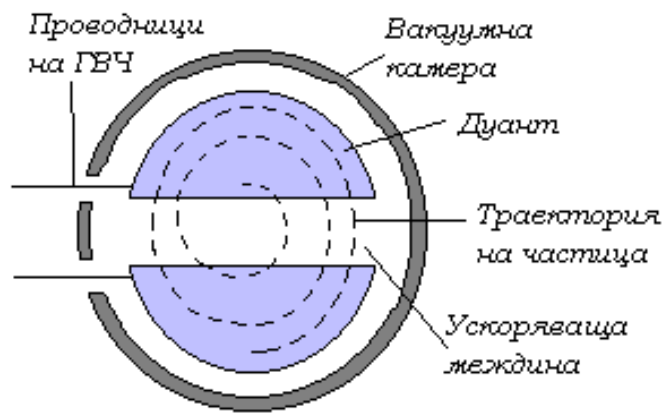
Въпреки че ускоряващото напрежение не е много високо в този случай, частицата получава много "доза" енергия и в края на краищата енергията ѝ да стане много висока.

### ЦИКЛОТРОН

Недостатъкът на линейния ускорител е, че при съвременните размери на машините ще е необходима много голяма площ, за да се разгърне дължината ѝ. Този проблем се решава от структурата на циклотрона.

Циклотронът представлява цикличен ускорител на заредени частици, действащ на резонансния принцип. Състои се от два кухи полуцилиндъра наречени дуанти. Перпендикулярно на тях е създадено силно магнитно поле, в което заредените частици се движат по кръгови орбити. В циклотрона се впръскват сноп йони, които при всяко преминаване от един в друг дуант се ускоряват от приложеното между тях високочестотно електрично поле.

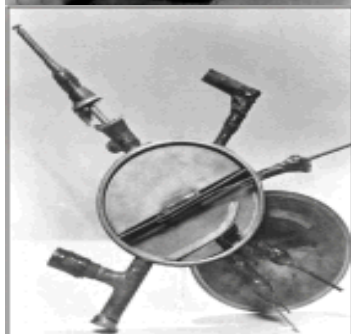
И тук времето за едно пълно завъртане на частиците по медните тръби е константно като с увеличаването на енергията на частиците нараства и радиусът на тяхната орбита. Така времето, за което частиците извършват една обиколка не зависи от тяхната енергия. Допълнителната си енергия частицата получава от променливото електрично поле между двата дуанта, където се намират генераторите на високи честоти. То сменя полярността си при всяко преминаване на частицата.



ГВЧ - генератор на високи честоти



Релативистичните ефекти пречат да се достигнат големи нива на ускорение в циклотрона. В следващите колайдери от този вид - синхротрона и фазотрона, проблемът е преодолян чрез промени в силата на магнитното поле и в честотата на електричното поле.



Първият циклотрон, изобретен от Ъ. О. Лорънс и построен през 1931 г. имал доста малки размери и възможности - радиусът на неговите дуанти бил 28 cm и позволявал да се получат протони с енергии 1,2 MeV. След двадесет години радиусът на дуантите на циклотрона в Бъркли бил 152 cm, теглото на неговите магнити достигало до 200 t, а ускоряваните от него протони имали енергия около 80 MeV. Съвременните ускорители вече достигат огромни размери, като за поддръжката и управлението им са необходими хиляди хора и бюджет от милиарди евро.

### *БЕТАТРОН*

Бетатронът представлява инсталация за ускоряване на електрони. Имаме електрони обикалящи по стабилни кръгови орбити във вакуумна камера. Енергия им се придава чрез усилващо се магнитно поле, което естествено предполага съществуването и на съпровождащо го електрично поле. В бетатрона се получават снопове от високоенергитични електрони с много голяма мощ, от които се получават проникващи рентгенови лъчи. Това определя приложението на машината не само за физични изследвания, но и за технически и медицински ползи (лечение на злокачествени тумори). Строят се бетатрони за енергия на електроните от няколко до няколкостотин MeV.

### *СИНХРОТРОН И СИНХРОФАЗОТРОН*

Синхрофазотронът е подобрен и специализиран вариант на синхротронът, като и двата колайдера действат на резонансния принцип и са с циклична структура. Разликата обаче идва от частиците, които обикновено ускоряват и начина на придаване на допълнителна енергия.

Синхротронът е ускорител за електрони и йони. Представлява пръстеновиден електромагнит поставен във вакуумна камера също с пръстеновидна форма. Отначало действа като бетатрон - ускорява с помощта на засилващо се магнитно поле. Когато

скоростта на частиците доближи скоростта на светлината, те се ускоряват с променливо електрично поле, приложено към резонаторна кухина във вакуумна камера. Ускоряват се електрони до енергии от десетки MeV до десетки GeV.

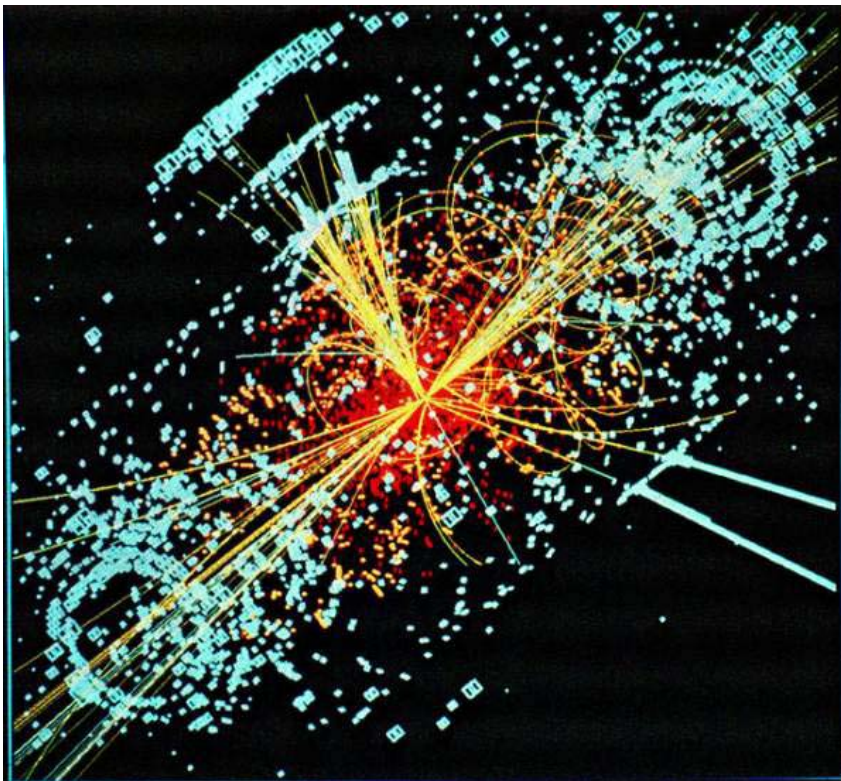
Синхрофазотронът е ускорител ползван главно на протони. В него се мени синхронно и честотата на ускоряващото напрежение.

#### **ФАЗОТРОН (СИНХРОЦИКЛОТРОН)**

Фазотронът представлява цикличен резонансен ускорител на заредени частици, но с постоянно магнитно поле именяща се честота на ускоряващото електрично напрежение. Той е следващото еволюционно стъпало след циклотрона. Ускоряването се извършва чрез многократното преминаване на частиците през високочестотното електрично поле с променлива честота. Използва се за ускорение на тежки частици (протони, деутерони,  $\alpha$ -частици) до енергия няколко десетки MeV.

#### **ГОЛЕМИЯТ АНДРОНЕН КОЛАЙДЕР (LHC)**

Големият адронен колайдер - най-големият ускорител на елементарни частици на планетата, беше задействан успешно на 10 септември 2008 година. Целта на учените от ЦЕРН, които провеждат експеримента, е да пресъздадат условията във Вселената в първия миг след Големия Взрив и да открият последната липсваща елементарна частица - Хигс бозонът. Симулация на тази частица предполага проявлението ѝ да има приблизително този вид:



Колайдерът е най-мощната машина от своя тип правена до момента, с лъчи със 7 пъти по-голяма енергетичност от създаваните до сега, като се очаква да достигнат 30 пъти по-висок интензитет щом колайдерът достигне оптималните си възможности през 2010. Още на 10-ти успешно бяха задвижени снопове и в двете посоки, нещо смятано за прекалено оптимистично. За да се поддържат сноповете в състояние на насочено движение се използват радиочестотна система. Тя уеднаквява различните скорости на движещите се частици, забавяйки по-бързите и задвижвайки по-бързо другите. Така снопът остава концентриран като фини нишки с дължина от порядъка на 11 см. Фокусираните снопове увеличават вероятността на сблъсъците, като сложността да се получи сблъсък в колайдера е сравнена с тази да оцелиш с връх на игла върха на друга игла, намираща се на 10 км разстояние.

След първоначалния си успех, на 18-ти септември ускорителят трябваше да бъде спрян за около ден поради проблеми с електрозахранването. Един от трансформаторите на повърхностна точка на ускорителя се повреди и криогенните (охлаждащите) системи спряха работа върху два от секторите на колайдера. Трансформаторът е тегло 30 тона и 12 MVA беше подменен.



Първото предвидено по график сблъскване беше насорчено за 24-ти септември 2008. Но тъй като LHC е най-голямата машина от този тип със своите 27 км дължина, започването на подобен процес е дори по-сложно от обикновено. Необходим е перфектен синхрон между всички звена на колайдера. След охлаждането на 8-те сектора на ускорителя трябва да бъде проведено електрическо тестване на 1600 свръхпроводими магнита, всеки от които със собствено захранване на номинален поток електрически ток. Включва се захранване на системите на всеки от 8-те сектора, а после всички те се настройват да работят в унисон като цялостна система. Към края на юли 2008 това бе постигнато и температурата на секторите беше 1,9 градуса над абсолютната нула.

Следващата фаза беше синхронизирането със Супер Протонния Синхротронен Ускорител. Времева разлика в реакциите на двете машини трябва да е от порядъка на част от наносекундата.

Ускорителят предизвика множество обществени дебати, като много организации и активисти настояваха за спиране или отлагане на експеримента. Някои имаха религиозни, други научни доводи. Сред научните беше и опасността от създаване на черна дупка, което е смятано за вероятно при високите енергитични нива постигнати в колайдера. Частиците в него ще се движат с приблизително 99,99% от скоростта на светлината. Черните дупки обаче зараждащи се в ускорителите имат много малки размери- около  $10^{-32}$  см, като за сравнение човешкият косъм е с дебелина  $10^{-3}$  см. Освен това според известният физик Стивън Хоукинг миниатюрните черни дупки са изключително нестабилни и се сричат вътре в себе си една пикосекунда след възникването си вследствие на Хоукинговата радиация, доказвайки така, че всички страхове около унищожението на Земята от черна дупка възникнала в колайдер са неоснователни.

ЛНС ще работи през цялата есен на 2010 г., като с това се цели да се осигурят надеждни данни и първите анализирани физични резултати от експеримента ще бъдат изнесени през същата година.

Източници на информация:

инж. Филип Стоянов

<http://quant.hit.bg>