

РЕЗЮМЕТА НА НАУЧНИТЕ ТРУДОВЕ

на гл. ас. д-р Даниела Ангелова Георгиева
*представени за участие в конкурс за заемане на академична длъжност “доцент”
по професионално направление 4.5 Математика
научна специалност “Математическо моделиране и приложение на математиката”
обявен за нуждите на кат. “Математическо моделиране и числени методи” при
ФПМИ на ТУ-София
в ДВ, брой № 93/26.11.2019 г.*

I. Характеристика на научните трудове

За участие в конкурса са представени 10 научни публикации, от които:

- 1 е публикувана в научно издание от квантил Q1;
- 2 са публикувани в научни издания от квантил Q3;
- 7 са публикувани в научни издания, реферирани и индексирани в Scopus (с SJR);
- 1 е самостоятелна;
- на 2 кандидатът е първи автор;
- 3 са обособени като равностойни на монографичен труд.

Основните направления на изследване и математическо моделиране са в следните две области:

- 1) нелинейна оптика;
- 2) теория на гравитацията и астрофизиката.

Създадените математически модели от нелинейната оптика се изследват числено с помощта на разработени алгоритми, базирани на симетричната форма на метода на разделяне по физични фактори (наричан още “split-step” Фурие метод), която приложена върху основното уравнение на разпространение на вълни в оптични влакна има грешка от ред $O(h^3)$. Поради използването на бързото преобразование на Фурие за решаването на линейната стъпка на “split-step” Фурие метода, той е на близо два порядъка по-бърз от множество диференчни (мрежови) методи за решаване на същата задача.

Създадените нелинейни математически модели от теория на гравитацията и астрофизиката се изследват числено с помощта на непрекъснатия аналог на метода на Нютон, който е един от най-ефективните итерационни методи за решаване на едномерни нелинейни задачи. При този метод изходната нелинейна задача се свежда до решаването на двуточкова линейна гранична задача на всяка итерация. Тези линейни задачи се дискретизират с помощта на метода на колокациите, при което се стига до системи линейни алгебрични уравнения с разредени матрици. Непрекъснатият аналог

на метода на Нютон е ефективен също така и при решаването на задачи на Щурм-Лиувил и задачи със свободни граници.

II. Показател В – Научни публикации, равностойни на монографичен труд на тема “Изследване влиянието на нелинейни процеси при еволюцията и взаимодействието на свръх-къси лазерни импулси”.

Представени са 3 публикации като равностойни на монографичен труд.

[B1] L. M. Kovachev, **D. A. Georgieva** and A. M. Dakova, “Influence of the four-photon parametric processes and cross-phase modulation on the relative motion of optical filaments”, *Laser Physics* **25**(10), 105402 (2015), <http://dx.doi.org/10.1088/1054-660X/25/10/105402>, **IF: 1.05, Q3**.

[B2] L. M. Kovachev and **D. A. Georgieva**, “The long range filament stability: balance between non-paraxial diffraction and third-order nonlinearity”, *Proc. of SPIE*, **Vol. 8770**, 87701G (2013), <https://doi.org/10.1117/12.2013663>, **SJR: 0.236**.

[B3] **D. A. Georgieva**, "Depolarization of femtosecond pulses in air by nonlinear mechanisms", *Proc. of SPIE*, **Vol. 11047**, 110471A (2019), doi: 10.1117/12.2519307, **SJR 0.238**.

РЕЗЮМЕ: 1) **[B1]** Филаментите са високо интензивни фемтосекундни лазерни импулси, които имат устойчиво разпространение на разстояние от порядъка на няколко километра във въздух при мощности над критичната за само-фокусировка. Основната характеристика на тези импулси е тяхната асиметрична Лоренцова форма и свръх-широк спектър. Известен експериментален факт е, че в случая на мулти-филаментно разпространение броят на филаментите намалява при отдалечаването им от лазерния източник. Експериментите показват, че при разпространението от порядъка на 50 до 100 филамента в резултат на обмен на енергия и привличане между отделните импулси остават около 4-5 мощни единични импулса на разстояние от порядъка на 1,5 – 2 километра.

Във **[B1]** се изследва аналитично и числено взаимодействието на оптичните импулси при колинеарно разпространение и влиянието на фазовата крос-модулация (ФКМ) и изродените четири-фотонни параметрични процеси (ИЧФПП) върху относителното им движение и енергообмен, в зависимост от началната фаза. За обяснението на горе-описаните явления е предложен нов нелинеен векторен модел, включващ двата нелинейни процеса (ФКМ и ИЧФПП). Тъй като филаментите са оптични импулси с широк спектър, тяхната динамика се изследва в рамките на непараксиалната оптика. Предложеният модел се изследва числено с помощта на алгоритъм, базиран на симетричната форма на “split-step” Фурие метода. Проведени са числени експерименти с два, три и четири лазерни импулса. Числените резултати показват, че когато началната фазова разлика между импулсите е равна на нула доминира фазовата крос-модулация и се наблюдава сливане на импулсите и създаване

на един единствен силен филамент – Rogue вълна. Когато началната фазова разлика между импулсите е различна от нула, доминират изродените четири-фотонни параметрични процеси, в следствие на което настъпва обмен на енергия между филаментите, което води до тяхното редуциране – единият от импулсите се усилва, самофокусира се и получава достатъчно мощност да продължи разпространението си, докато останалите импулси отдават енергия, навлизат в линеен режим и постепенно дифрактират в пространството. Влиянието на фазовата крос-модулация върху относителното движение на импулсите може да се изследва аналитично посредством метода на моментите. В този случай е възможно да се въведе потенциал на взаимодействие и сливането на импулсите може да се представи като потенциално взаимодействие, дължащо се на този нелинеен процес (ФКМ). Потенциалът на взаимодействие е пресметнат аналитично за Гаусови и Лоренцови импулси. Представеният модел показва, че фазовата крос-модулация и изродените четири-фотонни вълнови процеси са едни от основните механизми за редуциране на броя на филаментите при мощност малко над критичната за само-фокусировка.

2) [B2] Една от най-важните характеристики за импулси с фемтосекундна продължителност е възможността за бърза трансформация на спектрално-тесни импулси ($\Delta k \ll k_0$) в импулси с широк спектър ($\Delta k \sim k_0$). Спектрално-широките импулси, които са спектрално-ограничени, имат само няколко цикъла под обвивката (суб-фемтосекундни и атосекундни импулси). Стандартните фемтосекундните импулси могат да получат свръх-широк спектър чрез фазова модулация (чирпиране) или чрез нелинейни механизми.

Дифракцията и дисперсията на спектрално-тесните импулси се описва в рамките на параксиалната оптика, докато за спектрално-широките импулси това не е възможно. Поради тази причина се изследва непараксиалното амплитудно уравнение, което описва еволюцията не само на спектрално-тесни, но и на спектрално-широки лазерни импулси. В процеса на изследване също така е показано, че във фемтосекундната област не е възможна редукция на нелинейността от трети ред до нелинейност от типа на Кер (т.е. пропорционална на интензитета на импулса).

Линеен режим на разпространение на лазерните импулси: Изследва се линейното непараксиално амплитудно уравнение и се решава числено и аналитично проблемът с разпространението на спектрално-широки лазерни импулси. Анализирани са различни режими на дифракция. Типичните спектрално-тесни фемтосекундни импулси дифрактират, следвайки закона на Френел. Спектрално-широките импулси при няколко дифракционни дължини получават параболична форма на интензитета и дифракция, известна в литературата като $\lambda^{(3)}$ тип дифракция.

В нелинеен режим на разпространение на импулсите се изследва кубичен тип на нелинейна поляризация (нелинейност), като се вземе в предвид, че в Галилеева координатна система вместо на третата хармонична се генерира нова честота, пропорционална на три пъти обвиващата-носеща честота (carrier-to-envelope frequency).

В този режим импулсите генерират нова честота с GHz-во спектрално отместване във въздух и THz-во отместване в твърди тела и стъкла. Тази генерация води до асиметрично уширение на спектъра на импулсите към високите честоти (от инфра-червената област към видимата част на спектъра), което е типично за началния процес на филаментация.

3) [B3] Друг експериментален факт, свързан с процеса на филаментация, е нехомогенното въртене на вектора на електричното поле (деполяризация). Във [B3] са изследвани аналитично и числено нелинейните поляризационни състояния (въртенето на вектора на електричното поле) на фемтосекундни лазерни импулси. Предложен е нов механизъм с включване на генерация на сигнална вълна с терахерцово спектрално отместване. Изведена е векторна система от нелинейни ЧДУ, описваща еволюцията на основната и сигналните вълни. Предложеният модел се изследва числено с помощта на алгоритъм, базиран на симетричната форма на “split-step” Фурие метода. Изследвани са поляризационните свойства и на двете компоненти. В случая на начално линейно поляризиран импулс посоката на вектора на електричното поле се запазва, т.е. не се наблюдава деполяризация. В случаите на начално кръгово и елиптично поляризиран лазерен импулс се наблюдава въртене и осцилация на поляризационната елипса. Направените числени симулации потвърждават експерименталните наблюдения, че ъгълът на завъртане на електричното поле е различен във всяка точка на петното на импулса, като той е най-голям в центъра на импулса.

III. Показател Г – Други научни трудове (които не са представени по показател В), книги и глави от книги, изобретения, патенти или полезни модели, заявки за патенти или полезни модели

Представени са 7 публикации извън равностойните на монографичен труд.

[Г1] P. Fiziev and D. Georgieva, “Inflation and oscillations of the Universe in 4D dilatonic gravity”, Physical Review D **67**, 064016 (2003), DOI: 10.1103/PhysRevD.67.064016, **IF: 4.599, Q1**.

РЕЗЮМЕ: Разгледан е модел на инфлация на Вселената в 4D (3+1 мерна) дилатонна гравитация с масово дилатонно поле, в който дилатона изпълнява ролята на инфлантонно поле. Установено е, че продължителността на инфлационния стадий в този модел е обратно пропорционална на масата на дилатона. Показано е, че типичната продължителност на инфлационния стадий в най-простия модел от този тип е реалистична без необходимост от фина настройка.

[Г2] **D. A. Georgieva**, I. Zh. Stefanov, M. D. Todorov, and S. S. Yazadjiev, “Charged black holes with massive scalar field”, AIP CP**1186**, 166 (2009), <https://doi.org/10.1063/1.3265326>, **SJR: 0.163**.

РЕЗЮМЕ: Разгледани са статични и сферично-симетрични черни дупки с магнитен заряд в скаларно-тензорните теории на гравитацията (СТТ) с масивно скаларно поле и източник на електромагнитно поле, описвано от електродинамика на Ойлер-Хайзенберг (в СТТ гравитационното взаимодействие се описва чрез две полета: тензорно поле от втори ранг, зададено с метриката на пространство-времето, и допълнително скаларно поле). Начално-граничната задача със свободна лява граница – хоризонтът на събитията на черната дупка – се свежда до обобщена нелинейна задача с един спектрален параметър и се изследва числено с помощта на алгоритъм, базиран на непрекъснатия аналог на метода на Нютон. На всяка итерационна стъпка съответните линейни начално-гранични задачи се решават чрез метода на колокациите с квадратични Лагранжеви крайни елементи. Наличието на масово скаларно поле води до по-сложна причинна структура на черните дупки в сравнение с безмасовия случай. Допуска се съществуването на вътрешни хоризонти и екстремални решения (т.е. изроден хоризонт на събитията).

[Г3] I. Zh. Stefanov, **D. Georgieva**, S. Yazadjiev and M. Todorov, “Mathematical modeling of soliton-like solutions in the scalar-tensor theories of gravity”, AIP CP**1186**, 173 (2009), <https://doi.org/10.1063/1.3265327>, **SJR: 0.163**.

РЕЗЮМЕ: В рамките на скаларно-тензорните теории на гравитацията са получени числени решения, описващи заредени солитоно-подобни обекти – регулярни, асимптотически плоски, стационарни решения с крайна енергия. Лагранжианът на електромагнитното поле допуска такъв тип решения и е съгласуван с електродинамиката на Максвел при слаби електромагнитни полета. Получените солитоно-подобни решения имат аналог и в Общата теория на относителността, които в този случай с нарастване на магнитния заряд преминават гладко в регулярни черни дупки (първо с изроден хоризонт на събитията и след това с два хоризонта – хоризонт на събитията и вътрешен хоризонт). В представената работа е доказано, че поради наличието на скаларно поле, в рамките на скаларно-тензорните на гравитацията не съществуват регулярни черни дупки. Този факт е потвърден и числено.

[Г4] **D. A. Georgieva**, I. Zh. Stefanov, M. D. Todorov, and S. S. Yazadjiev, “Phases of soliton-like solutions in the scalar-tensor theories of gravity”, AIP CP**1301**, 321 (2010), <https://doi.org/10.1063/1.3526628>, **SJR: 0.166**.

РЕЗЮМЕ: Получени са неединствени числени решения (фази), описващи солитоно-подобни обекти с магнитен заряд в скаларно-тензорните теории на гравитацията. Куплиращата функция между скаларното и електромагнитното поле е избрана така, че полевите уравнения да допускат неединствени решения.

Съществуването на повече фази предполага наличието на фазови преходи (буфуркация). Числено са изследвани глобалните свойства на получените солитонно-подобни обекти.

[Г5] Т. Л. Бояджиев, Д. А. Георгиева и П. П. Физиев, “Численное исследование некоторых решений релятивистского уравнения скалярных частиц в гравитационном поле точечного источника”, Журнал Вычислительной Математики и Математической Физики **45**(3), 526-535 (2005), ISSN: 0044-4669, **SJR: 0.285**.

Английска версия на списанието: Т. L. Boyadzhiev, **D. Georgieva** and P. P. Fiziev, “Numerical study of some solutions to the relativistic equation of scalar particles in the gravitational field of a massive point”, Computational Mathematics and Mathematical Physics (Zhurnal Vychislitel’noi Matematiki i Matematicheskoi Fiziki) **45**(3), 507–515 (2005), ISSN: 0965-5425, **SJR: 0.285**.

РЕЗЮМЕ: Проведено е числено изследване на решения на релятивистското вълново уравнение на Клайн-Гордън за скаларни частици в гравитационното поле на масов точков източник в рамките на Общата теория на относителността. Това уравнение описва частици със спин нула. Релятивистското уравнение на Клайн-Гордън се свежда до уравнението на Щурм-Лиувил и е формулирана съответната спектрална гранична задача за намиране на собствени функции и собствени стойности. Наличието на крайни потенциални ями води до възникването на свързани състояния и дискретен спектър. Основното и по-високите дискретни състояния и съответните им собствени стойности са изследвани за различни стойности на ъгловия момент на скаларните частици. Съществено нова черта на получените решения е зависимостта на техните физически характеристики от гравитационния дефект на масата на точковия източник на гравитационното поле. За численото изследване на съответната задача на Щурм-Лиувил се използва алгоритъм на базата на непрекъснатия аналог на метода на Нютон. На всяка итерация съответните линейни гранични задачи се решават чрез метода на колокациите със кубични ермитови сплайни с ред на апроксимация $O(h^4)$ на търсеното решение.

[Г6] A. Dakova, L. Kovachev, D. Dakova, **D. Georgieva** and V. Slavchev, “Degenerate four-photon parametric processes and vector solitons”, Optik **168**, 721-727 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.04.133>, **IF: 1.914, Q3**.

РЕЗЮМЕ: Еволюцията на лазерен импулс, разпространяващ се в едномодови оптични влакна, се представя в рамките на система от две свързани нелинейни уравнения, описващи взаимодействието между векторните компоненти на импулса. Тази нелинейна система от диференциални уравнения включва процесите на самовъздействие, крос-модулация и изродено четирифотонно смесване. Системата уравнения има два типа солитонни решения в отрицателната област на дисперсията – линейно поляризирани и кръгово поляризирани. Интензитетът на кръгово

поляризираните солитони е с $3/2$ пъти по-висок от интензитета на линейно поляризираните солитони. Анализът на нелинейните дисперсионни съотношения в настоящата статия показва, че тази разлика в интензитетите се дължи на смяната на знака пред фазата, обусловена от изроденото четирифотонно смесване.

При разпространението на оптични импулси в линеен режим се запазват трите поляризационни състояния на импулса - линейна, кръгова и елиптична поляризация.

В нелинеен режим се наблюдава въртене на поляризационната елипса в случай на елиптична поляризация. Завъртането на поляризационната елипса в този случай се обяснява в литературата с действието на крос-модулацията поради факта, че уравненията се записват в базис на лява и дясна кръгова поляризация. Численият анализ на процеса в настоящата работа показва, че ротацията на поляризационната елипса се дължи на изродените четирифотонни процеси и енергийния обмен между елиптично поляризираните x и y компоненти на лазерния импулс. Системата нелинейни диференциални уравнения се изследва числено с помощта на алгоритъм, базиран на симетричната форма на “split-step” Фурие метода.

[Г7] A. Dakova, D. Dakova, Z. Andreeva, **D. Georgieva**, V. Slavchev and L. Kovachev, “Four-photon parametric mixing in CW and pulse regimes in single mode optical fibers”, Proc. of SPIE, Vol. **11332**, 113320H (2019), doi: 10.1117/12.2553231, **SJR: 0.238**.

РЕЗЮМЕ: Четирифотонните параметрични процеси са едни от най-често наблюдаваните ефекти в експерименти при разпространение на лазерни импулси и снопове в изотропни материали, осигуряващи кубична (или още $\chi^{(3)}$) нелинейност. Процесът на четирифотонно параметрично смесване обикновено се използва за преобразуване на входния лазерен импулс в оптични вълни на няколко различни честоти. Взаимодействието и преобразуването на енергия е най-силно, когато между вълните има условия за фазов синхронизъм. Основните изследвания са свързани с проблемите на ефективното усилване на сигналните вълни с приложение в оптични усилватели. В режим на усилване обикновено се изследват така наречените съкратени уравнения в приближение на зададено поле на основната (напомпващата) вълна.

По-общият проблем на периодичния обмен на енергия на големи разстояния между напомпващата, сигналната и допълнителната (антистоксовата) вълни, разпространяващи се в едномодови влакна, изисква числено решаване на системата нелинейни уравнения за разпространение, включваща първи (групова разстройка) и втори ред на дисперсията на груповите скорости, самовъздействие, кросмодулация и тяхното влияние върху процеса на неизродено параметрично четирифотонно смесване. В настоящата статия тази система се решава числено чрез “split-step” Фурие метода. Главната цел е да се изследва проблема за ефективен обмен на енергия в импулсен режим. Основната идея е, че за спектрално близки импулси е възможно компенсиране на разликата в груповите скорости чрез нелинеен механизъм на самозахващане чрез крос-модулацията. Поради тази причина, численият експеримент е проведен за

четирифотонно смесване между спектрално близки пикосекундни импулси $\Delta\lambda = \lambda_p - \lambda_s < 40$ nm, където λ_p и λ_s са съответно дължината на вълната на напмпващата и сигналната вълна, с времева продължителност 1 – 10 ps (което съответства на спектрална ширина на импулса от порядъка на $\Delta\lambda_{\text{импулса}} \approx 0,3 - 3$ nm). Изследвано е разпространението на параметрично свързани импулси в отрицателната, но достатъчно близо до нулевата, област на дисперсия на влакното. В този спектрален диапазон и за тези малки спектрални отмествания между импулсите е възможно да се наблюдава компенсация на разликата в груповите скорости с нелинейни механизми.

С помощта на числените експерименти е намерена спектрална област и максимално спектрално отместване между основната и сигналните вълни, в които е възможно захващане на напмпващата и сигналните вълни в един общ вълнов пакет и ефективен квазипериодичен обмен на енергия между тях.

София,
12.03.2020 г.

Подпис:
/гл. ас. д-р Д. Георгиева/

SUMMARY OF THE SCIENTIFIC PUBLICATIONS

of assistant professor Daniela Angelova Georgieva, PhD
for participation in a competition for academic position "Associate professor"
in the professional field 4.5 Mathematics
scientific specialty "Mathematical modeling and application of mathematics"
announced for the needs of Department "Mathematical modeling and numerical methods",
Faculty of applied mathematics and informatics at the Technical University of Sofia
at the State Gazette, issue 93/26.11.2019

I. General description of the scientific works presented:

A total number of 10 publications have been submitted for participation in the competition, of which:

- 1 was published in Q1 scientific journal;
- 2 were published in Q3 scientific journals;
- 7 were published in scientific journals, referenced and indexed in Scopus (with SJR);
- the applicant is sole author of 1 work;
- the applicant is first author of 2 works;
- 3 of the papers are presented as equivalent to a monograph.

The main areas of scientific research and mathematical modeling are in the following two fields:

- 1) nonlinear optics;
- 2) theory of gravity and astrophysics.

The mathematical models developed in the field of nonlinear optics are numerically investigated using algorithms based on the symmetric form of the method of separation by physical factors (also called the "split-step" Fourier method), which applied to the amplitude equations describing the propagation of optical pulses in isotropic media is of order of approximation. Due to the use of the fast Fourier transform algorithm, the split-step Fourier method can be faster by up to two orders of magnitude compared with most finite-difference schemes for solving the same problem $O(h^3)$. The obtained non-linear mathematical models of gravity and astrophysics are numerically investigated using the continuous analogue of the Newtonian method, which is one of the most effective iterative methods for solving one-dimensional nonlinear problems. In this method, the initial nonlinear problem is reduced to solving a two-point linear boundary problem at each iteration. These linear problems are discretized using the collocation method, which leads to systems of linear algebraic equations

with sparse matrices. The continuous analogue of the Newton method is also effective in solving problems of Sturm-Liouville and free boundary problems.

II. Indicator B – Scientific publications equivalent to a monograph on: “Investigation of the influence of nonlinear processes on the evolution and interaction of ultra-short laser pulses”.

3 publications are presented as equivalent to a monograph work:

[B1] L. M. Kovachev, **D. A. Georgieva** and A. M. Dakova, “Influence of the four-photon parametric processes and cross-phase modulation on the relative motion of optical filaments”, *Laser Physics* **25**(10), 105402 (2015), <http://dx.doi.org/10.1088/1054-660X/25/10/105402>, **IF: 1.05, Q3**.

[B2] L. M. Kovachev and **D. A. Georgieva**, “The long range filament stability: balance between non-paraxial diffraction and third-order nonlinearity”, *Proc. of SPIE*, Vol. **8770**, 87701G (2013), <https://doi.org/10.1117/12.2013663>, **SJR: 0.236**.

[B3] **D. A. Georgieva**, "Depolarization of femtosecond pulses in air by nonlinear mechanisms", *Proc. of SPIE*, Vol. **11047**, 110471A (2019), doi: 10.1117/12.2519307, **SJR 0.238**.

SUMMARY: 1) [B1] Filaments are high-intensity femtosecond laser pulses that have a stable propagation of several kilometers in air at powers above the critical self-focusing power. The main characteristics of these pulses is their asymmetric Lorentz shape and ultra-wide spectrum. It is a known experimental fact that in the case of multi-filament propagation, the number of filaments decreases as propagate away from the laser source. Experiments show that for an initial number of 50 to 100 filaments, as a result of energy exchange and attraction between the individual impulses, at a distance of 1.5 - 2 kilometers only about 4-5 powerful single impulses remain.

[B1] investigates analytically and numerically the interaction of optical pulses in collinear propagation and the influence of phase cross-modulation (FCM) and degenerate four-photon parametric processes (DFPPP) on their relative motion and energy exchange, depending on the initial phase. To explain the phenomena described above, a new nonlinear vector model is proposed, incorporating the two nonlinear processes (FCM and DFPPP). Because the filaments are broad-spectrum optical pulses, their dynamics is investigated within the frame of non-paraxial optics. The proposed model is numerically investigated using an algorithm based on the symmetric split-step Fourier method. Numerical experiments with two, three and four laser pulses were performed. The numerical results show that when the initial phase difference between the pulses is zero, the phase cross-modulation dominates and the pulses merge and create a single strong filament - Rogue wave. When the initial phase difference between the impulses is non-zero, the degenerate four-photon parametric processes dominate, resulting in an exchange of energy between the filaments, leading to their reduction - one of the impulses is amplified, self-focused and enough power is given to continue its

propagation, while the other impulses give off energy, enter linear mode and gradually diffract into space. The effect of phase cross-modulation on the relative motion of impulses can be investigated analytically using the moment method. In this case, it is possible to introduce an interaction potential and the impulse merger can be represented as a potential interaction due to this nonlinear process (FCM). The interaction potential was calculated analytically for Gaussian and Lorentz impulses. The model presented here shows that the phase cross-modulation and the degenerate four-photon wave processes are among the main mechanisms for reducing the number of filaments at power slightly above the critical self-focusing power.

2) [B2] One of the most important characteristics of pulses with a femtosecond duration is the ability to rapidly transform spectrally narrow pulses ($\Delta k \ll k_0$) into broad-spectrum pulses ($\Delta k \sim k_0$). Spectrally-wide pulses, which are spectrally-limited, have only a few cycles under the envelope (sub-femtosecond and attosecond pulses). Standard femtosecond pulses can be obtained over a wide region by phase modulation (chirping) or by nonlinear mechanisms.

The diffraction and dispersion of the spectrally-narrow pulses is described within the framework of paraxial optics, while this is not possible for the spectrally-wide pulses. For this reason, the non-paraxial amplitude equation is investigated, which describes the evolution of not only spectrally narrow but also spectrally wide laser pulses. The study also showed that in the femtosecond region it is not possible to reduce the third-order nonlinearity to a Kerr-type nonlinearity (i.e., proportional to the pulse intensity).

Linear mode of laser pulse propagation: The linear non -axial amplitude equation is investigated and the problem of the propagation of spectrally-wide laser pulses is solved numerically and analytically. Different diffraction modes are analyzed. Typical spectrally-narrow femtosecond pulses diffract, following the Fresnel law. Spectrally-wide pulses at several diffraction lengths become with parabolic intensity and diffraction known in the literature as $\lambda^{(3)}$ type diffraction.

In the nonlinear pulse propagation mode, a cubic type of nonlinear polarization (nonlinearity) is investigated, taking into account that a new frequency proportional to three times the carrier-to-carrier frequency is generated in the Galilee coordinate system (instead of the third harmonic). In this mode, the pulses generate a new frequency with GHz spectral shift in air and THz shift in solids and glasses. This generation results in an asymmetric broadening of the pulse spectrum towards higher frequencies (from the infrared region to the visible part of the spectrum), which is typical for the initial filamentation process.

3) [B3] Another experimental fact related to the filamentation process is the non-homogeneous rotation of the electric field vector (depolarization). In [B3], the nonlinear polarization states (rotation of the electric field vector) of femtosecond laser pulses were analyzed analytically and numerically. A new mechanism has been proposed to include signal wave generation with terahertz spectral shift. A vector system of nonlinear NCs is presented to describe the evolution of the fundamental and signal waves. The proposed model is

numerically investigated using an algorithm based on the symmetric split-step Fourier method. The polarization properties of both components were investigated. In the case of an initially linearly polarized pulse, the direction of the electric field vector is maintained, i.e. no depolarization was observed. In the case of an initially circular and elliptically polarized laser pulse, rotation and oscillation of the polarization ellipse are observed. The numerical simulations made confirm the experimental observations that the angle of rotation of the electric field is different at each point in the spot of the pulse, being the largest at the center of the pulse.

III. Indicator G - Other scientific papers (not presented under Indicator B), books and book chapters, inventions, patents or utility models, applications for patents or utility models.

7 publications are presented outside those equivalent of monograph work.

[G1] P. Fiziev and **D. Georgieva**, “Inflation and oscillations of the Universe in 4D dilatonic gravity”, *Physical Review D* **67**, 064016 (2003), DOI: 10.1103/PhysRevD.67.064016, **IF: 4.599, Q1**.

SUMMARY: A model of inflation of the Universe in the frames of four-dimensional dilatonic gravity with a massive dilaton field is considered. The dilaton plays the role of an inflaton field. The time duration of the inflation in this model is reciprocal to the mass of the dilaton. The typical number of e-folds in the simplest model of this type is shown to be realistic without fine-tuning.

[G2] **D. A. Georgieva**, I. Zh. Stefanov, M. D. Todorov, and S. S. Yazadjiev, “Charged black holes with massive scalar field”, *AIP CP***1186**, 166 (2009), <https://doi.org/10.1063/1.3265326>, **SJR: 0.163**.

SUMMARY: Static and spherically symmetric magnetically charged black holes coupled to Euler-Heisenberg type non-linear electrodynamics in the scalar-tensor theories of gravity with massive scalar field are considered. The boundary-value problem with free left-hand boundary – the event horizon – is reduced to a generalized nonlinear problem with one spectral parameter and is investigated numerically by means of an algorithm based on the continuous analogue of Newton method. At each iteration step for solving the corresponding linear boundary-value problems a collocation scheme with quadratic Lagrangian finite elements is used. The presence of a massive scalar field leads to a different causal structure of the black hole solutions in comparison to the massless case. The massive scalar field admits the existence of inner horizons and extremal solutions (i.e degenerated event horizon).

[G3] I. Zh. Stefanov, **D. Georgieva**, S. Yazadjiev and M. Todorov, “Mathematical modeling of soliton-like solutions in the scalar-tensor theories of gravity”, AIP CP**1186**, 173 (2009), <https://doi.org/10.1063/1.3265327>, **SJR: 0.163**.

SUMMARY: In the scalar-tensor theories of gravity are obtained numerical solutions describing charged soliton-like objects – regular, asymptotically flat, stationary solutions having finite energy. The lagrangian of the electromagnetic field allows solutions of this type and in the weak-field regime its leading terms restore the Maxwell lagrangian. The obtained soliton-like solutions have also an analogue in the General relativity. In the latter case with the increase of magnetic charge the solutions smoothly pass into regular black holes (first with degenerated event horizon and then with two horizons – an event horizon and an inner horizon). It has been also proved that the presence of the scalar field does not allow the existence of regular black holes in the scalar-tensor theories of gravity. This fact is confirmed also numerically.

[G4] **D. A. Georgieva**, I. Zh. Stefanov, M. D. Todorov, and S. S. Yazadjiev, “Phases of soliton-like solutions in the scalar-tensor theories of gravity”, AIP CP**1301**, 321 (2010), <https://doi.org/10.1063/1.3526628>, **SJR: 0.166**.

SUMMARY: Multiple-phase numerical solutions describing magnetically charged soliton-like objects coupled to non-linear electrodynamics in scalar-tensor theories of gravity are obtained. The specific choice of the coupling function between the scalar field and the electromagnetic field allows the existence of non-unique solutions (phases) of the field equations. The non-uniqueness of the solutions implies the presence of phase transitions (bifurcation). The general properties of the obtained soliton-like objects are also investigated numerically.

[G5] Т. Л. Бояджиев, **Д. А. Георгиева** и П. П. Физиев, “Численное исследование некоторых решений релятивистского уравнения скалярных частиц в гравитационном поле точечного источника”, Журнал Вычислительной Математики и Математической Физики **45**(3), 526-535 (2005), ISSN: 0044-4669, **SJR: 0.285**.

English version of the journal: T. L. Boyadzhiev, **D. Georgieva** and P. P. Fiziev, “Numerical study of some solutions to the relativistic equation of scalar particles in the gravitational field of a massive point”, Computational Mathematics and Mathematical Physics (Zhurnal Vychislitel’noi Matematiki i Matematicheskoi Fiziki) **45**(3), 507–515 (2005), ISSN: 0965-5425, **SJR: 0.285**.

SUMMARY: Some solutions to the relativistic Klein-Gordon wave equation of scalar particles in the gravitational field of a massive point source in General relativity are investigated numerically. This equation describes particles of zero spin. The relativistic Klein-Gordon equation is reduced to the Sturm-Liouville equation. The corresponding spectral boundary problem of finding eigenfunctions and eigenvalues is formulated. The presence of finite potential wells leads to existence of bounded states and discrete spectrum. The discrete

states and the corresponding eigenvalues are investigated for different values of the angular momentum of the scalar particles. A novel feature of the solutions under consideration is the essential dependence of their physical properties on the gravitational mass defect of the point source. For the numerical study of the solutions of the Sturm-Liouville problem the continuous analogue of Newton method is used. The corresponding linear boundary problems at each iteration step are solved by means of cubic hermite spline collocation scheme of fourth order of approximation.

[G6] A. Dakova, L. Kovachev, D. Dakova, **D. Georgieva** and V. Slavchev, „Degenerate four-photon parametric processes and vector solitons“, *Optik* **168**, 721–727 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.04.133>, **IF: 1.191, Q3**.

SUMMARY: The evolution of a laser pulse propagating in single-mode optical fibers is presented within a system of two coupled nonlinear equations describing the interaction between the vector components of the pulse. This nonlinear system of differential equations involves the processes of self-action, cross-modulation, and degenerate four-photon mixing. The system of equations has two types of soliton solutions in the negative domain of dispersion - linearly polarized and circularly polarized. The intensities of circularly polarized solitons are 3/2 times higher than the intensities of linearly polarized solitons. The analysis of the nonlinear dispersion ratios in this article shows that this difference in intensities is due to the phase sign change caused by the degenerate four-photon mixing.

In the propagation of optical pulses in a linear mode, the three polarization states of the pulse are preserved - linear, circular and elliptical polarizations.

In non-linear mode, rotation of the polarization ellipse is observed in the case of elliptical polarization. In this case, the rotation of the polarization ellipse is explained in the literature by the action of cross-modulation due to the fact that the equations are written in the basis of left and right circular polarization. The numerical analysis of the process in the present work shows that the rotation of the polarization ellipse is due to the degenerate four-photon processes and the energy exchange between the elliptically polarized x and y components of the laser pulse. The system of nonlinear differential equations is numerically investigated using an algorithm based on the symmetric form of the split-step Fourier method.

[G7] A. Dakova, D. Dakova, Z. Andreeva, **D. Georgieva**, V. Slavchev and L. Kovachev, “Four-photon parametric mixing in CW and pulse regimes in single mode optical fibers”, *Proc. of SPIE*, Vol. **11332**, 113320H (2019), doi: 10.1117/12.2553231, **SJR: 0.238**.

SUMMARY: The four-photon parametric processes are among the most commonly observed effects in experiments on the propagation of laser pulses and beams in isotropic materials providing cubic (or $\chi^{(3)}$) nonlinearity. The four-photon parametric mixing process is typically used to convert the laser input pulse into optical waves at several different frequencies. The interaction and conversion of energy is strongest when there are conditions for phase synchronism between the waves. The main research is related to the problems of the

effective amplification of signal waves with application in optical amplifiers. In gain mode, the so-called truncated equations are usually investigated in the approximation of a given field of the main (pumping) wave.

The more general problem of the periodic exchange of energy over long distances between the pumping, signaling and auxiliary (anti-Stokes) waves propagating in single-mode fibers requires a numerical solution of the system of nonlinear propagation equations including first (group disorder) and second-order variance of group velocities, self-action, cross-modulation and their influence on the process of degenerate parametric four-photon mixing. In this article, this system is solved numerically by the split-step Fourier method. The main objective is to investigate the problem of efficient energy exchange in pulse mode. The main idea is that for spectrally close impulses it is possible to compensate for the difference in the group velocities by a nonlinear self-trapping mechanism involving cross-modulation. For this reason, the numerical experiment was performed for four-photon mixing between spectrally close picosecond pulses $\Delta\lambda = \lambda_p - \lambda_s < 40$ nm, where λ_p and λ_s are the pump and signal wavelengths, respectively, with a time duration of 1 - 10 ps (corresponding to a pulse width of the order of $\approx 0.3 - 3$ nm). The propagation of parametrically coupled pulses in the negative, but close enough to zero, dispersion region of the fiber was investigated. In this spectral range and for these small spectral shifts between the pulses, it is possible to observe the compensation of the difference in group velocities by nonlinear mechanisms.

By means of numerical experiments, we have found the spectral region and the maximum spectral displacement between the main and the signal waves, where it is possible to capture the pump and signal waves in a single wave packet, with an effective quasi-periodic energy exchange between them.

Sofia,
12.03.2020

Signature:
/Assist. Prof. D. Georgieva, PhD/