

Załącznik 2 do wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego

AUTOREFERAT

Katarzyna Krajewska

Instytut Fizyki Teoretycznej, Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski

Spis treści:

1. CURRICULUM VITAE.....	2
2. PRZEBIEG PRACY NAUKOWEJ.....	6
A. Przed uzyskaniem stopnia doktora.....	6
B. Po uzyskaniu stopnia doktora.....	8
3. JEDNOTEMATYCZNY CYKL PUBLIKACJI NAUKOWYCH.....	12
A. Wskazanie osiągnięcia stanowiącego podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego.....	12
B. Wykaz prac stanowiących jednotematyczny cykl publikacji.....	13
C. Omówienie wkładu habilitantki do rozwoju dziedziny.....	13

1. CURRICULUM VITAE

Katarzyna Krajewska

Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki

Instytut Fizyki Teoretycznej

ul. Hoża 69, Warszawa 00-681

WYKSZTAŁCENIE I UZYSKANE STOPNIE NAUKOWE

- maj 1994** matura w V Liceum Ogólnokształcącym im. Ks. Józefa Poniatowskiego w Warszawie w klasie o profilu matematyczno-fizycznym
- czerwiec 1999** stopień magistra nauk fizycznych w zakresie fizyki teoretycznej uzyskany z wyróżnieniem na Wydziale Fizyki UW po ukończeniu studiów magisterskich w latach 1994-1999; praca magisterska pt. „*Potencjał zero-zasięgowy: przykład renormalizacji w nierelatywistycznej mechanice kwantowej*” napisana pod kierunkiem dr hab. Jerzego Kamińskiego; praca wyróżniona Nagrodą im. Joanny i Jerzego Glazerów za najlepszą pracę magisterską wykonaną na Wydziale Fizyki UW w roku akad. 1998/1999
- maj 2004** stopień doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki uzyskany na Wydziale Fizyki UW po odbyciu studiów doktoranckich w latach 1999-2004; rozprawa doktorska pt. „*Kontrola stanów rezonansowych zewnętrznym polem elektromagnetycznym na przykładzie oddziaływania kontaktowego*” wykonana pod kierunkiem prof. dr. hab. Jerzego Kamińskiego; rozprawa doktorska uznana za wyróżniającą się

PRZEBIEG PRACY ZAWODOWEJ

- 1999-2004** studia doktoranckie na Wydziale Fizyki UW
- od października 2004** adiunkt naukowo-dydaktyczny na Wydziale Fizyki UW
- październik 2005 – styczeń 2007** staż podoktorski na Wydziale Fizyki i Astronomii, Uniwersytet w Nebrasce, Lincoln, USA

NAGRODY I WYRÓŻNIENIA

- 1999** Dyplom z wyróżnieniem ukończenia studiów magisterskich na Wydziale Fizyki UW
- 1999** Nagroda im. Joanny i Jerzego Glazerów za najlepszą pracę magisterską wykonaną na Wydziale Fizyki UW w roku akad. 1998/1999
- 2001** Nagroda Dziekana Wydziału Fizyki UW za wyróżniające się prowadzenie zajęć rachunkowych w roku akad. 2000/2001 (ćwiczenia z Mechaniki Kwantowej I)
- 2004** Wyróżnienie rozprawy doktorskiej wykonanej na Wydziale Fizyki UW
- 2005** Theodore P. Jorgensen Postdoctoral Fellowship, Wydział Fizyki i Astronomii, Uniwersytet w Nebrasce-Lincoln, USA (październik 2005 – styczeń 2007)
- 2008** Nagroda JM Rektora Uniwersytetu Warszawskiego III stopnia

DZIAŁALNOŚĆ ORGANIZACYJNA

2001-2002	opiekun II roku studiów magisterskich na Wydziale Fizyki UW
2002-2004	członek Rady Naukowej Instytutu Fizyki Teoretycznej, Wydział Fizyki UW
od 2006	członek Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego (APS) członek Sekcji Fizyki Atomowej, Molekularnej i Optycznej (DAMOP)
2008-2012	członek Rady Naukowej Instytutu Fizyki Teoretycznej, Wydział Fizyki UW
2010-2011	sekretarz Rady Naukowej Instytutu Fizyki Teoretycznej, Wydział Fizyki UW
2009-2012	członek Zespołu ds. studenckich praktyk zawodowych, Wydział Fizyki UW
od 2010	administrator strony internetowej projektu „ <i>Fizyka – kształcenie dla gospodarki opartej na wiedzy</i> ”, Wydział Fizyki UW
2011	przewodnicząca sesji referatów na konferencji <i>XX International Laser Physics Workshop</i> , Sarajewo, Bośnia i Hercegowina
od 2012	współkoordynator wymiany naukowej z ośrodkami badawczymi w Europie w ramach projektu „ <i>PhoQuS@UW: Fostering Excellence in Photonics and Quantum Science</i> ”, Wydział Fizyki UW
od 2013	członek Komisji ds. zatrudnień w projekcie „ <i>PhoQuS@UW: Fostering Excellence in Photonics and Quantum Science</i> ”, Wydział Fizyki UW
2013	członek Lokalnego Komitetu Organizacyjnego konferencji międzynarodowej <i>Quantum Optics VIII</i> , Jachranka

OSIĄGNIĘCIA NAUKOWO-BADAWCZE

Podane dane bibliometryczne z bazy Web of Science (WoS) pochodzą z dnia 25 kwietnia 2013r.

1. Autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych:
całkowita liczba opublikowanych artykułów (zgodnie z Załącznikiem 4): **24**
– w tym artykułów w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR): **24**
2. Sumaryczny impact factor (IF) 24 publikacji naukowych według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania (w przypadku artykułów z 2012r. zastosowano wskaźnik z 2011r.):
IF – **61.94**
3. Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS):
z wyłączeniem autocytowań – **135**
4. Indeks Hirscha opublikowanych prac według bazy Web of Science (WoS): **9**
5. Kierowanie międzynarodowymi lub krajowymi projektami lub udział w takich projektach:

Spośród wymienionych niżej projektów, tylko jeden (a) dotyczy okresu przed uzyskaniem doktoratu. Pozostałe projekty, tj. **(b-h) dotyczą okresu po uzyskaniu stopnia doktora.**

(a) **główny wykonawca** w projekcie „*Kontrola procesów kwantowych zewnętrznym polem elektromagnetycznym*” finansowanym przez Komitet Badań Naukowych w latach 2000-2003; grant KBN 2 P03B 039 19.

(b) **główny wykonawca** w projekcie „*Kontrola procesów kwantowych polem elektromagnetycznym*” finansowanym przez Komitet Badań Naukowych w latach 2005-2008; grant KBN 1 P03B 006 28.

(c) **główny wykonawca** w projekcie „*Efekty odbicia w kreacji par i kontrola transmisji rezonansowej w silnym polu laserowym*” finansowanym przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2009-2011; grant N N202 033337.

(d) udział w projekcie „*Fizyka – kształcenie dla gospodarki opartej na wiedzy*” finansowanym ze środków UE w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego; **administrator strony internetowej** projektu; projekt w trakcie realizacji na Wydziale Fizyki UW.

(e) udział w projekcie Międzynarodowych Studiów Doktoranckich (MPD) na Wydziale Fizyki UW finansowanym przez Fundację na Rzecz Nauki Polskiej. W ramach projektu, **współsprawuję opiekę** nad tematem doktoratu „*Engineering and Control of Quantum Processes by Attosecond Laser Pulses*”.

(f) **kierownik projektu** „*Indukowane polem laserowym procesy kreacji par w elektrodynamice kwantowej*” finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki; projekt w trakcie realizacji na Wydziale Fizyki UW; grant 2011/01/B/ST2/00381.

(g) udział w projekcie „*PhoQus@UW: Fostering Excellence in Photonics and Quantum Science*” finansowanym w ramach 7 Programu Ramowego UE; **współkoordynator wymiany naukowej** z ośrodkami badawczymi w Europie; **członek Komisji ds. zatrudnień**; projekt w trakcie realizacji na Wydziale Fizyki UW.

(h) **główny wykonawca** w projekcie „*Procesy kwantowe w ultrakrótkich impulsach laserowych*” finansowanym przez Narodowe Centrum Nauki; projekt w trakcie realizacji na Wydziale Fizyki UW; grant 2012/05/B/ST2/02547.

6. Współpraca zagraniczna:

- a) Uniwersytet w Durham, Wielka Brytania, grupa prof. Roberta M. Potvliege'a
- b) Uniwersytet w Düseldorfie, Niemcy (do niedawna Instytut Maxa Plancka w Heidelbergu), grupa prof. Carstena Müllera
- c) Uniwersytet w Kolorado i JILA, Boulder, USA, grupa prof. Andreasa Beckera
- d) Uniwersytet w Nebrasce-Lincoln, USA, grupa prof. Anthony F. Starace'a

7. Staże naukowe:

- a) USA, Uniwersytet w Nebrasce-Lincoln:
 - kilka miesięcznych wizyt naukowych w latach: 2003, 2009 - 2012
 - Theodore P. Jorgensen Postdoctoral Fellowship (październik 2005 - styczeń 2007)
 - półroczna wizyta naukowa w 2008
- b) Francja, Uniwersytet w Rennes 1, miesięczna wizyta w 2009
- c) Niemcy, Instytut Maxa Plancka w Heidelbergu, miesięczna wizyta w 2011

8. Udział w międzynarodowych lub krajowych konferencjach tematycznych:

- a) **Udział w 25 konferencjach i warsztatach tematycznych** o charakterze międzynarodowym (wykaz znajduje się w Załączniku 6).

b) **Przewodniczenie sesji referatów** w trakcie konferencji *XX International Laser Physics Workshop*, Bośnia i Hercegowina, lipiec 2011r.

c) **26 wystąpień konferencyjnych**, w tym 18 referatów i 8 prezentacji plakatowych. Wśród tych wystąpień, **16 referatów oraz 6 plakatów** zaprezentowałam w okresie **po uzyskaniu stopnia doktora**. Pełen wykaz prezentacji konferencyjnych znajduje się w Załączniku 6. Poniżej zamieszczam jedynie wykaz referatów, które wygłosiłam.

Wykaz referatów na konferencjach:

- 2003** „*Control of resonance states in crossed magnetic and laser fields*”
XII International Laser Physics Workshop, Hamburg, Niemcy
- 2003** „*Stabilization of resonance states in crossed magnetic and laser fields*”
Wildcorn Conference, Kansas State University, Manhattan, USA
- 2004** „*Stabilization of resonance states in crossed magnetic and laser fields in a parabolic quantum well*” XIII International Laser Physics Workshop, Triest, Włochy
- 2005** „*Autoionizing states in crossed magnetic and laser fields*”
XIV International Laser Physics Workshop, Kioto, Japonia
- 2005** „*Electron-positron pair creation by powerful laser-ion interaction*”
XIV International Laser Physics Workshop, Kioto, Japonia
- 2006** „*Electron-positron pair production by the impact of a high-power laser pulse on relativistic ions*”
37th Annual DAMOP Meeting, Knoxville, USA
- 2006** „*Resonant-like enhancement of the high-energy plateau in ATD*”
37th Annual DAMOP Meeting, Knoxville, USA
- 2006** „*Channel-closing-related enhancement of the high-energy plateau in above-threshold detachment*”
The 2006 Conference on Super Intense Laser Atom Physics, Salamanka, Hiszpania
- 2006** „*Threshold-related effects in the high-energy plateau in above-threshold detachment*”
XV International Laser Physics Workshop, Lozanna, Szwajcaria
- 2006** „*Resonant-like plateau enhancements*”
KITP Attosecond Science Workshop, Santa Barbara, USA
- 2007** „*Angular correlations in pair creation*”
XVI International Laser Physics Workshop, Léon, Meksyk
- 2009** „*Electron-positron pair creation - Relevance of recoil effects*”
Workshop on Super Intense Laser-Atom Physics, Park Narodowy Zion, USA
- 2010** „*Electron-positron pair creation and Oleinik resonances*”
XIX International Laser Physics Workshop, Foz do Iguaçu, Brazylia

- 2011 „*Laser-induced electron-positron pair creation: from tunneling- to multiphoton regime*”
XX International Laser Physics Workshop, Sarajewo, Bośnia i Hercegowina
- 2012 „*Nonlinear Compton scattering in short laser pulses*”
43rd Annual DAMOP Meeting, Anaheim, USA
- 2012 „*Compton process in intense laser pulses – can we see the mass effects?*”
XXI International Laser Physics Workshop, Calgary, Kanada
- 2012 „*Electron-positron pair creation in a bichromatic laser field*”
w trakcie *Symposium on Strong-Field Quantum Electrodynamics*, XXI International Laser Physics Workshop, Calgary, Kanada
- 2012 „*Nonlinear Compton scattering in ultrashort laser pulses*”
XXXII European Conference on Laser Interaction with Matter, Warszawa

2. PRZEBIEG PRACY NAUKOWEJ

Opisując przebieg pracy naukowej wyróżniłam dwa etapy: przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora i po jego uzyskaniu. Chciałabym przy tym zaznaczyć, że kierunek badań podjętych w trakcie pracy nad doktoratem kontynuowałam jeszcze po obronie rozprawy doktorskiej. W przebiegu mojej pracy naukowej wyróżniłabym ponadto cztery grupy tematyczne, wokół których koncentrowały bądź nadal koncentrują się moje badania:

- I. Dynamika procesów kwantowych w obecności silnego pola magnetycznego i elektrycznego (w ogólności zależnego od czasu)
 - temat związany z pracą doktorską, kontynuowany również po ukończeniu doktoratu
- II. Procesy wielofotonowe w silnych polach laserowych
 - temat podjęty w trakcie stażu podoktorskiego, kontynuowany po ukończeniu stażu
- III. Fundamentalne procesy elektrodynamiki kwantowej w silnych polach laserowych
 - temat podjęty po obronie doktoratu, stanowi główne pole moich obecnych zainteresowań naukowych
- IV. Kontrola procesów kwantowych w impulsach attosekundowych
 - temat podjęty ponad rok temu, związany z opieką naukową nad doktoratem realizowanym w ramach Międzynarodowych Studiów Doktoranckich (MPD) na Wydziale Fizyki UW

A. PRZED UZYSKANIEM STOPNIA DOKTORA

W roku 1994 rozpoczęłam studia magisterskie na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Specjalizację w obrębie fizyki teoretycznej zrobiłam pod kierunkiem dr. hab. Jerzego Kamińskiego w Zakładzie Teorii Pola i Fizyki Statystycznej Instytutu Fizyki Teoretycznej. Moje ówczesne badania koncentrowały się na opisie modelu oddziaływania kontaktowego (o zerowym zasięgu), a w szczególności na – związanej z tym zagadnieniem – renormalizacji. Rezultaty swojej analizy ujęłam w pracy magisterskiej pt. „*Potencjał zero-zasięgowy: przykład renormalizacji w nierelatywistycznej mechanice kwantowej*”, która uznana została za najlepszą pracę magisterską wykonaną na Wydziale

Fizyki UW w roku akademickim 1998/1999 i uhonorowana Nagrodą im. Joanny i Jerzego Glazerów. Studia magisterskie ukończyłam z wyróżnieniem w czerwcu 1999 roku.

W ramach studiów doktoranckich na Wydziale Fizyki UW, kontynuowałam – pod kierunkiem prof. dr. hab. Jerzego Kamińskiego w Zakładzie Optyki Kwantowej i Fizyki Atomowej Instytutu Fizyki Teoretycznej – obrany kierunek badań z naciskiem położonym na zastosowania wspomnianego wyżej modelu oddziaływania kontaktowego. Posłużył mi on przy opisie oddziaływania elektronów z obojętnymi elektrycznie atomami, które to podejście znajduje szerokie zastosowanie zarówno w fizyce atomowej jak też w ciele stałym. Tematem moich badań stała się kwantowa dynamika elektronów oddziałujących kontaktowo z atomami w obecności skrzyżowanych, silnych pól magnetycznego oraz elektrycznego.

Jak wynikało z przeprowadzonej analizy dla układów dwuwymiarowych, pod nieobecność pola elektrycznego oddziaływanie kontaktowe elektronu z atomem znosi częściowo degenerację poziomów Landau'a, indukując dodatkowe widmo punktowe pomiędzy tymi poziomami. Włączenie do rozważań słabego pola elektrycznego powoduje, że owe stany zlokalizowane zmieniają charakter – mamy wtedy do czynienia ze stanami rezonansowymi, których czas życia zanika monotonicznie wraz ze wzrostem natężenia pola elektrycznego. Najważniejszym wynikiem moich badań w tym okresie było odkrycie, że pole elektryczne może również generować nowe stany rezonansowe a, co więcej, stany te mogą ulegać stabilizacji. Okazało się, że dla pewnych szczególnych wartości stałej charakteryzującej oddziaływanie elektronu z rodzimym atomem oraz dla odpowiednio dobranych natężeń pól zewnętrznych, które uznać należy za silne, czasy życia nowych stanów rezonansowych wykazują niespotykaną zależność od natężenia pola elektrycznego – zamiast oczekiwanego monotonicznego zaniku przy wzroście natężenia pola elektrycznego, obserwuje się stabilizowanie stanów rezonansowych [A1,A2]. Nawiązując z kolei do hydrodynamicznego sformułowania mechaniki kwantowej, zjawisko stabilizacji udało nam się powiązać z ruchem wirowym cieczy prawdopodobieństwa opisującej kwantowo-mechaniczną dynamikę elektronu, czego parametrem kontroli okazało się być pole elektryczne [A3]. Uogólnieniem powyższych rozważań było zastąpienie stałego pola elektrycznego polem laserowym spolaryzowanym kołowo. Okazało się przy tym, że przypadkiem w pełni rozwiązywalnym jest przypadek rezonansowy, kiedy częstość pola laserowego równa się częstości cyklotronowej ruchu elektronu w polu magnetycznym. O tej właśnie sytuacji fizycznej traktował artykuł [A4].

W trakcie studiów doktoranckich byłam głównym wykonawcą w projekcie „*Kontrola procesów kwantowych zewnętrznym polem elektromagnetycznym*” (grant KBN 2 P03B 039 19), finansowanym przez Komitet Badań Naukowych. W tym okresie – na zaproszenie prof. Anthony Starace'a – odbyłam miesięczną wizytę na Uniwersytecie w Nebrasce-Lincoln, USA, która zaowocowała moim późniejszym stażem podoktorskim w tamtejszej jednostce badawczej. W tym okresie opublikowałam cztery artykuły [A1-A4] jak również zebrane materiały przedstawiłam w postaci dwóch referatów i dwóch plakatów na konferencjach międzynarodowych. Materiały te stanowiły podstawę mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej „*Kontrola stanów rezonansowych zewnętrznym polem elektromagnetycznym na przykładzie oddziaływania kontaktowego*”, którą obroniłam w maju 2004 roku. Moja rozprawa doktorska uznana została przez Radę Wydziału Fizyki UW za wyróżniającą się.

- A1. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, „*Stabilization of impurity states in crossed magnetic and electric fields*”, J. Math. Phys. **43**, 3937 (2002)
- A2. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, „*Generation and control of resonance states in crossed magnetic and electric fields*”, Phys. Lett. A **301**, 369 (2002)
- A3. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, „*Vortices and stabilization of resonance states in crossed magnetic and electric fields*”, Phys. Rev. B **68**, 064418 (2003)

A4. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, „Control of resonance states in crossed magnetic and laser fields”, Laser Phys. **14**, 194 (2004)

B. PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA

Po obronie rozprawy doktorskiej, zostałam zatrudniona na Wydziale Fizyki UW, w Instytucie Fizyki Teoretycznej (Katedra Optyki Kwantowej i Fizyki Atomowej) na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego. Moja praca badawcza w tym okresie dotyczy czterech wymienionych na wstępie grup tematycznych.

I. Dynamika procesów kwantowych w obecności silnego pola magnetycznego i elektrycznego (w ogólności zależnego od czasu)

Jeszcze w trakcie studiów doktoranckich nawiązałam współpracę z prof. Robertem Potvliege'm z Uniwersytetu w Durham, Wielka Brytania, która to współpraca nasiliła się po uzyskaniu przeze mnie stopnia doktora. Nasze prace koncentrowały się na uogólnieniu rozważanego przeze mnie modelu teoretycznego elektronu oddziałującego z rodzimym atomem w zewnętrznych, skrzyżowanych polach elektrycznym i magnetycznym na przypadek trójwymiarowy. Aby zagadnienie, którego analizą się zajęliśmy, bliższe było typowej sytuacji fizycznej spotykanej w ciele stałym, do rozważań włączyliśmy dodatkowy potencjał studni kwantowej, skierowanej wzdłuż wektora indukcji magnetycznej. Dla tak postawionego problemu, podobnie jak dla dwóch wymiarów, metoda funkcji Greena pozwoliła nam na zbadanie własności elektronowych stanów rezonansowych oraz ich kontroli przez pola zewnętrzne. Wstępne wyniki badań wskazujące na istnienie stanów rezonansowych, które – podobnie do przypadku dwuwymiarowego – ulegają stabilizacji zreferowałam na konferencji LPHYS'04. Zostały one także opublikowane w pracy [B1]. Odkryłam ponadto, że owe długo-żyjące stany rezonansowe istnieją nawet w sytuacji, kiedy potencjał kontaktowy opisujący oddziaływanie elektron-atom nie jest wystarczająco silny, aby związać układ [B2]. Prace te finansował Komitet Badań Naukowych w ramach projektu „Kontrola procesów kwantowych polem elektromagnetycznym” (grant KBN 1 P03B 006 28).

Innym przykładem, który badałam w kontekście kontroli procesów kwantowych silnym polem elektromagnetycznym jest sytuacja, gdy elektron oddziałujący kontaktowo z neutralnym atomem umieszczony zostaje w zewnętrznym polu magnetycznym. Pokazałam, że na skutek sprzężenia dyskretnych poziomów Landau'a z widmem ciągłym obserwuje się stany autojonizujące. Z kolei włączenie do rozważań pola elektrycznego doprowadziło do zaobserwowania charakterystycznej dla zjawiska stabilizacji zależności tempa zaniku stanów od intensywności pola elektrycznego. O ile mi wiadomo, podobny efekt nie został wcześniej zaobserwowany w przypadku stanów autojonizujących. Wyniki te opublikowałam w pracy [B3] a także zaprezentowałam w formie referatu na konferencji LPHYS'05 oraz plakatu na konferencji DAMOP 2006.

Wszystkie z wymienionych tu prac posługują się modelem oddziaływania kontaktowego. Jest to jeden z nielicznych w mechanice kwantowej modeli ściśle rozwiązywalnych – tym chętniej stosowany jest w różnych działach fizyki. Jak wiadomo, teoria z udziałem potencjałów zero-zasięgowych wymaga przeprowadzenia renormalizacji, przy czym istnieje dowolność w wyborze metod renormalizacji. W artykule [B4] przedstawiłam oryginalną metodę podejścia do potencjałów zero-zasięgowych w oparciu o regularyzację nielokalnymi potencjałami separowalnymi. Pozwala ona na systematyczną analizę problemu w dowolnej ilości wymiarów, co zilustrowane zostało na przykładzie jonizacji stałym polem elektrycznym.

B1. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, R. M. Potvliege, „Stabilization of resonances in crossed magnetic and laser fields in a parabolic quantum well”, Laser Phys. **15**, 238 (2005)

- B2. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, R. M. Potvliege, „*Long-lived resonances supported by a contact interaction in crossed magnetic and electric fields*”, *Ann. Phys. (NY)* **323**, 2639 (2008)
- B3. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, „*Autoionizing states in crossed magnetic and laser fields*”, *Laser Phys.* **15**, 1700 (2005)
- B4. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, K. Wódkiewicz, „*Zero-range interaction in arbitrary dimensions and in the presence of external forces*”, *Opt. Commun.* **283**, 843 (2010)

II. Procesy wielofotonowe w silnych polach laserowych

Fundamentalnym procesem, który umożliwia wytwarzanie spójnych, bardzo krótkich impulsów silnego pola elektromagnetycznego jest proces generacji wyższych harmonicznych. Zasadniczym problemem technologicznym, z jakim borykamy się tutaj od lat jest zwiększenie intensywności wypromieniowywanego w ten sposób pola elektromagnetycznego. Aby możliwa była większa całościowa kontrola procesu, konieczne jest dogłębne poznanie mechanizmów odpowiedzialnych za proces generacji wyższych harmonicznych, a mianowicie zjawisk jonizacji wielofotonowej a także rekombinacji elektronów. W swojej pracy naukowej, we współpracy z prof. Anthony Starace'm i prof. Ilya Fabrikantem z Uniwersytetu w Nebrasce-Lincoln, USA, zajmuję się badaniami nad pierwszym z tych zjawisk. Naszym celem jest wyjaśnienie wzmocnienia obserwowanego w widmie elektronów emitowanych w procesie jonizacji ponadprogowej, które bezpośrednio prowadzi do wzmocnienia sygnału wyższych harmonicznych. Ten bardzo istotny i pożądanym dla dalszego rozwoju technologii laserowej efekt badaliśmy w kontekście jonizacji wielofotonowej jonów ujemnych i atomów [C1-C4].

W październiku 2005 roku, rozpoczęłam półtoraroczny staż doktorski na Uniwersytecie w Nebrasce-Lincoln, USA, jako *Theodore P. Jorgensen Fellow*. W trakcie stażu badałam efekty wzmocnienia w jonizacji jonów ujemnych na przykładzie jonów wodoru H^- i fluoru F^- , które to jony można opisać w przybliżeniu pojedynczego aktywnego elektronu posługując się potencjałem o krótkim zasięgu. Przeanalizowałam wówczas zależność tempa jonizacji obu jonów od natężenia przyłożonego pola laserowego. Najważniejszym rezultatem moich badań było stwierdzenie, iż znaczny wzrost jonizacji ma miejsce dla takich wartości pola laserowego, dla których (na skutek zmiany potencjału ponderomotorycznego) zamykane są kolejne wielofotonowe kanały jonizacji. Innymi słowy, sterując parametrami wymuszającego pola laserowego jesteśmy w sposób dramatyczny wpływać na efektywność procesu jonizacji. Moja analiza pokazała, że wzmocnienie sygnału jonizacji istotnie zależy od rodzaju jonu poddanego działaniu pola laserowego; zależy bowiem od symetrii stanu początkowego elektronów. W szczególności dla pola laserowego o polaryzacji liniowej, wzrost tempa jonizacji najwyraźniej manifestuje się dla kanałów jonizacji odpowiadających parzystej bądź nieparzystej liczbie absorbowanych fotonów, odpowiednio dla początkowego stanu elektronowego o symetrii s (jon H^-) bądź p (jon F^-). Wyniki te pozostają w zgodzie z prawem Wignera dla potencjałów krótkiego zasięgu, które przewiduje zachowanie się częściowych (tj. odpowiadających absorpcji ustalonej liczby fotonów) temp jonizacji w warunkach modyfikowanego polem laserowym wielofotonowego rezonansu pomiędzy stanem podstawowym jonu a widmem ciągłym. Rezultaty, o których mowa zawarłam w artykule [C1]. Bardziej szczegółowa analiza zachowania się częściowych temp jonizacji i wyniki obliczeń całkowitych temp jonizacji dla obu jonów w zależności od wymuszającego pola laserowego opublikowane zostały w [C2].

Moje badania nad efektami progowymi w jonizacji jonów ujemnych dotyczyły również analizy rozkładów kątowych fotoelektronów. W początkowej fazie badań skoncentrowałam się na analizie zachowania rozkładów kątowych najmniej energetycznych elektronów [C1,C2]. Zaobserwowane dramatyczne zmiany rozkładów kątowych dla natężeń pola laserowego bliskich natężeniom progowym potwierdziły silną zależność od symetrii stanu początkowego jonizowanych elektronów. Systematyczną analizę efektów progowych w rozkładach kątowych fotoelektronów w różnym zakresie energii przepro-

wadziłam w [C3]. Analiza rozkładów kątowych emitowanych elektronów w warunkach, w jakich ma miejsce pożąany wzrost tempa jonizacji pokazała, że wzmożona jonizacja elektronów występuje dla dużych kątów detekcji (mierzonych względem wektora liniowej polaryzacji pola laserowego), natomiast wraz ze wzrostem energii jonizowanych elektronów wzmocnienie to obserwowane jest dla coraz mniejszych kątów. Choć efekt wzmocnienia nie został zaobserwowany dla najbardziej energetycznych elektronów, pokazałam, że odpowiadające im rozkłady kątowe zmieniają znacząco swój kształt, a co za tym idzie, że efekty progowe w widmie jonizowanych elektronów występują w znacznie szerszym zakresie energetycznym niż wcześniej sądzono.

W świetle przedstawionych wyników rodzi się pytanie, czy podobne wnioski można wyciągnąć w przypadku jonizacji neutralnych atomów, gdy w stanie końcowym opisującym zjonizowany elektron w polu laserowym (w odróżnieniu od jonów, gdzie oddziaływanie elektronu z rdzennym atomem ma charakter krótko-zasięgowy) należy uwzględnić długo-zasięgowy potencjał kulombowski. Uogólnieniu przedstawionych wyżej rezultatów na przypadek jonizacji atomów poświęcona jest praca [C4].

W pracy [C4] przedstawiłam analizę efektów progowych dla jonizacji atomów, ze szczególnym uwzględnieniem roli wymuszającego pola laserowego. Wskazałam, że charakterystyczne zachowanie się temp jonizacji zdominowane jest w przypadku atomów sprzężeniem (za pomocą pola laserowego) ze stanami rydbergowskimi o różnych wartościach orbitalnego momentu pędu. W szczególności, sprzężenie ze stanami rydbergowskimi charakteryzującymi się wysokimi wartościami orbitalnego momentu pędu prowadzi do płaskiej zależności temp jonizacji od przyłożonego pola laserowego. Zachowanie to wyjaśnia obserwowane w wielu pracach teoretycznych, jednak nadające problemy interpretacyjne, występowanie „efektywnego” proggu na jonizację. Efektem progowym jest też występowanie wielofotonowych rezonansów ze stanami rydbergowskimi, co (w przypadku stanów charakteryzujących się umiarkowanymi wartościami orbitalnego momentu pędu) prowadzi do wzrostu tempa jonizacji atomów. Zaobserwowałam przy tym zależność obserwowanych struktur rezonansowych od symetrii stanu początkowego elektronu walencyjnego, co zilustrowałam na przykładzie atomów wodoru (stan s) i neonu (stan p).

Przedstawione tu wyniki badań zaprezentowałam na konferencjach DAMOP 2006, SILAP 2006, LPHYS'06 oraz Attosecond Science Workshop w formie referatów, zaś na konferencjach ICPEAC 2007, LPHYS'07 oraz ICOMP XI w formie plakatów. Niektóre z tych wystąpień a także prace [C1-C3] były finansowane w ramach grantu Komitetu Badań Naukowych „Kontrola procesów kwantowych polem elektromagnetycznym” (grant KBN 1 P03B 006 28).

- C1. **K. Krajewska**, I. I. Fabrikant, A. F. Starace, „*Threshold effects in strong field detachment of H^- and F^- : Plateau enhancements and angular distribution variations*”, Phys. Rev. A **74**, 053407 (2006)
- C2. **K. Krajewska**, I. I. Fabrikant, A. F. Starace, „*Threshold-related effects in the high-energy plateau in above-threshold detachment*”, Laser Phys. **17**, 368 (2007)
- C3. **K. Krajewska**, I. I. Fabrikant, A. F. Starace, „*Threshold effects on plateau electron angular distributions in above-threshold detachment*”, Phys. Rev. A **78**, 023407 (2008)
- C4. **K. Krajewska**, I. I. Fabrikant, A. F. Starace, „*Threshold effects in strong-field ionization: Energy shift and Rydberg behaviors*”, Phys. Rev. A **86**, 053410 (2012)

III. Fundamentalne procesy elektrodynamiki kwantowej w silnych polach laserowych

Ogromny postęp technologii laserowej, jaki dokonał się w ostatnich latach zaowocował powstaniem źródeł światła laserowego o niespotykanych dotąd dużych intensywnościach; mianowicie, możliwym stało się wytwarzanie pól laserowych o składowej elektrycznej znacznie przewyższającej

pole kulombowskie, które wiąże elektrony w atomach i cząsteczkach. Jednocześnie, udało się skrócić czas trwania impulsów laserowych i obecnie standardowym narzędziem są lasery femtosekundowe czy wręcz attosekundowe. W kontekście postępującego rozwoju technologii laserowej, ogromne znaczenie zaczęły odgrywać badania dotyczące oddziaływania pola laserowego z materią w reżimie ultrawysokich intensywności, gdzie możliwe staje się testowanie procesów elektrodynamiki kwantowej.

Jednym z fundamentalnych procesów elektrodynamiki kwantowej jest kreacja par elektronowo-pozytonowych. Moje badania nad tym procesem dotyczyły w swej pierwszej fazie wielofotonowej kreacji par elektron-pozyton w zderzeniach wiązek ciężkich jąder atomowych z ultra-silnym polem laserowym. Pole laserowe traktowane było przy tym w przybliżeniu monochromatycznej fali płaskiej a ponadto zaniebany był odrzut zderzających się z polem laserowym cząstek. Uzyskane w ten sposób wyniki opublikowane zostały w pracach [D1-D4] oraz podsumowane w artykule przeglądowym [D5]. Nasze badania w tym okresie finansował Komitet Badań Naukowych w ramach projektu „*Kontrola procesów kwantowych polem elektromagnetycznym*” (grant KBN 1 P03B 006 28). Wyniki tych badań zaprezentowałam w formie referatów na konferencjach LPHYS'05, DAMOP 2006 oraz LPHYS'07.

Pierwsze wyniki, jakie opublikowaliśmy w tej tematyce dotyczyły szybkości kreacji par przy ustalonej wzajemnej konfiguracji przestrzennej produkowanego elektronu i pozytonu [D1,D2] oraz ich korelacji spinowych. Uogólniając te rozważania, zbadaliśmy korelacje kątowe produkowanych cząstek oraz zależność całkowitego tempa kreacji par od natężenia pola laserowego [D3]. Obliczenia rozkładów kątowych emitowanych cząstek pokazały, że pary kreowane są głównie w płaszczyźnie wyznaczonej przez wektor polaryzacji pola laserowego a także kierunek jego propagacji [D4]. Analiza korelacji w rozkładach kątowych par pokazała, że cząstki są anty-skorelowane (tj. emitowane są w przeciwnych kierunkach), która to tendencja utrzymuje się przy zmianie natężenia pola laserowego [D4].

Wszystkie wymienione tu prace [D1-D5] dotyczą sytuacji, gdy wymuszające pole laserowe opisane jest w przybliżeniu monochromatycznej fali płaskiej. Tymczasem w ostatnich latach – poszerzając swój warsztat naukowy – staram się wyjść poza to przybliżenie. W szczególności, zajęłam się rozpraszaniem Comptona w krótkich impulsach laserowych, o czym traktują prace [D6,D7]. Warto zwrócić uwagę, że proces Comptona stanowi źródło spójnych, kwazi-monoenergetycznych fotonów X oraz fotonów γ , które z kolei znajdują szerokie zastosowania w nauce, medycynie czy przemyśle. Tym samym ważne staje się zbadanie rzeczywistych charakterystyk promieniowania komptonowskiego, na które niebagatelny wpływ ma postać wymuszającego je pola laserowego. Moje badania nad tym zagadnieniem dotyczyły zależności rozkładów energetycznych i kątowych promieniowania Comptona od czasu trwania wymuszającego impulsu laserowego [D6]. Sytuację tę porównałam z wynikami dla modulowanej fali płaskiej. Okazało się przy tym, że zgodność obu podejść w przypadku długich impulsów laserowych załamuje się, gdy skracamy ich czas trwania. Również własności symetrii rozkładów kątowych emitowanych fotonów dramatycznie zależą od czasu trwania wymuszającego impulsu laserowego. Te pierwsze rezultaty badań nad rozpraszaniem Comptona w krótkich impulsach laserowych zreferowałam na konferencjach DAMOP 2012, LPHYS'12 oraz ECLIM 2012. Kontynuację tych badań stanowi artykuł [D7], w którym przeanalizowane zostały efekty spinowe w nieliniowym procesie Comptona. Prace w tym kierunku sponsoruje Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu badawczego „*Procesy kwantowe w ultrakrótkich impulsach laserowych*” (grant 2012/05/B/ST2/02547).

D1. P. Sieczka, **K. Krajewska**, P. Panek, J. Z. Kamiński, F. Ehlotzky, „*Electron-positron pair creation by powerful laser-ion impact*”, Phys. Rev. A **73**, 053409 (2006)

D2. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, F. Ehlotzky, „*Electron-positron pair creation by powerful laser-ion interaction*”, Laser Phys. **16**, 272 (2006)

D3. J. Z. Kamiński, **K. Krajewska**, F. Ehlotzky, „*Monte-Carlo analysis of electron-positron pair creation by powerful laser-ion impact*”, Phys. Rev. A **74**, 033402 (2006)

- D4. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, „*Angular correlations in pair creation*”, Laser Phys. **18**, 185 (2008)
- D5. F. Ehlotzky, **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, „*Fundamental processes of quantum electrodynamics in laser fields of relativistic power*”, Rep. Prog. Phys. **72**, 046401 (2009)
- D6. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, „*Compton process in intense short laser pulses*”, Phys. Rev. A **85**, 062102 (2012)
- D7. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, „*Spin effects in nonlinear Compton scattering in ultrashort linearly-polarized laser pulses*”, Laser Part. Beams (w druku) (2013)

IV. Kontrola procesów kwantowych w impulsach attosekundowych

Obecne technologie pozwalają na syntezę attosekundowych impulsów laserowych, czy to w postaci pojedynczych impulsów czy też ciągu takich impulsów. Impulsy attosekundowe umożliwiają badanie dynamiki układów kwantowych na ultra-krótkiej skali czasowej, co dotyczy między innymi dynamiki elektronów w atomach, cząsteczkach i nanostrukturach. Główną rolą badań teoretycznych w tej dziedzinie jest opis i wyznaczenie nowych sposobów kontroli procesów kwantowych zachodzących w tak krótkiej skali czasowej. Stanowi to również cel moich badań w tej dziedzinie.

Od czerwca 2011 roku, jestem współopiekunem naukowym mgr. Felipe Cajiao-Veléza, doktora Międzynarodowych Studiów Doktoranckich (MPD) na Wydziale Fizyki UW. Praca naukowa Pana Cajiao-Veléza w temacie „*Engineering and Control of Quantum Processes by Attosecond Laser Pulses*” dotyczy zasadniczo dwóch zagadnień: kontroli transportu w nanostrukturach a także kontroli procesów jonizacji i generacji wyższych harmonicznycch za pomocą impulsów attosekundowych. Pierwszy z tych tematów doktorant wykonuje pod kierunkiem prof. dr hab. Jerzego Kamińskiego. Pod moim kierunkiem rozwija natomiast metody obliczeniowe związane z uogólnieniem przybliżenia eikonalnego, co służy nam za podstawę badań nad jonizacją i generacją wyższych harmonicznycch. Prace w tym kierunku są na tyle zaawansowane, że już wkrótce spodziewamy się wysłać do publikacji pierwsze wyniki badań. Wstępne wyniki prezentowane były w formie plakatu na konferencji LPHYS'12. Nasze prace w tym temacie finansuje Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu badawczego „*Procesy kwantowe w ultrakrótkich impulsach laserowych*” (grant 2012/05/B/ST2/02547). Temat doktoratu realizowany jest we współpracy z grupą prof. Andreasa Beckera z Uniwersytetu w Kolorado i JILA, USA, w związku z czym mgr Cajiao-Veléz odbył właśnie półroczną wizytę w tamtejszej jednostce badawczej, gdzie pracował nad procesem generacji wyższych harmonicznycch.

3. JEDNOTEMATYCZNY CYKL PUBLIKACJI NAUKOWYCH

A. Wskazanie osiągnięcia stanowiącego podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego:

Osiągnięciem naukowym stanowiącym podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego, zgodnie z art. 16 ust. 2 z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, jest jednotematyczny cykl 6 prac, które ukazały się drukiem w czasopiśmie znajdujących się w bazie Journal Citation Reports. Tematem cyklu są „*Procesy kreacji par elektron-pozyton w silnych polach laserowych*”.

B. Wykaz prac stanowiących jednotematyczny cykl publikacji:

Teksty prac stanowiących jednotematyczny cykl publikacji stanowią Załącznik 7. Na cykl składają się:

- E1. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, „*Recoil effects in multiphoton electron-positron pair creation*”
Phys. Rev. A **82**, 013420 (2010)
- E2. **K. Krajewska**, „*Electron-positron pair creation and Oleinik resonances*”
Laser Phys. **21**, 1275 (2011)
- E3. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, „*Correlations in laser-induced electron-positron pair creation*”
Phys. Rev. A **84**, 033416 (2011)
- E4. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, „*Phase effects in laser-induced electron-positron pair creation*”
Phys. Rev. A **85**, 043404 (2012)
- E5. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, „*Symmetries in the nonlinear Bethe-Heitler process*”
Phys. Rev. A **86**, 021402(R) (2012)
- E6. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, „*Breit-Wheeler process in intense short laser pulses*”
Phys. Rev. A **86**, 052104 (2012)

C. Omówienie wkładu habilitantki do rozwoju dziedziny:

Rozwijane na świecie badania dotyczące oddziaływania silnego pola elektromagnetycznego z materią są niewątpliwie ściśle związane z postępem technologii laserowej, jaki dokonał się w ostatnich latach; mowa tutaj o powstaniu źródeł silnego światła laserowego generowanego w postaci krótkich impulsów laserowych. I tak, obecnie możliwa jest produkcja impulsów laserowych o nieosiągalnych wcześniej wysokich intensywnościach (rzędu 10^{22} W/cm² [1,2]). Ponadto, powszechnie wytwarzane w laboratoriach impulsy laserowe składać się mogą z zaledwie kilku cykli optycznych i trwać w obrębie femto- czy attosekund. W tej dziedzinie kraje europejskie znajdują się w czołówce światowej, o czym świadczy ich zaangażowanie w projekty takie jak ELI (Extreme Light Infrastructure) [3], HiPER (High Power laser Energy Research facility) [4] i FLASH (Free-electron LASer in Hamburg) [5], których celem jest wytwarzanie super-intensywnych i bardzo krótkich impulsów spójnego promieniowania laserowego. Dalekosiężnym celem tych przedsięwzięć jest z kolei użycie owych wiązek laserowych w testowaniu nieperturbacyjnej elektrodynamiki kwantowej, w tym procesów kreacji par elektron-pozyton (e^-e^+).

Teoretyczne badania nieliniowych procesów kreacji par elektron-pozyton indukowanych silnym polem laserowym stanowią sedno niniejszego cyklu publikacji. Głównym ich celem jest jakościowa analiza warunków, w których możliwe jest zwiększenie efektywności procesu kreacji par a także gruntowne zbadanie jego charakterystyk, w tym rozkładów energetycznych i kątowych kreowanych cząstek. Prezentowany cykl prac koncentruje się zasadniczo wokół dwóch zagadnień: (a) *efektów odbicia* w kreacji par elektronowo-pozytonowych w wyniku zderzenia wiązki jąder atomowych (np. protonów) z intensywną wiązką laserową [E1-E3], oraz (b) *kontroli procesu* kreacji par elektronowo-pozytonowych przez wymuszające je pole laserowe [E4-E6]. Tego rodzaju analiza teoretyczna wydaje się szczególnie ważna w kontekście przyszłych eksperymentów, planowanych chociażby w ramach wspomnianych tu projektów ELI, HiPER i FLASH, a w dalszej perspektywie prowadzić może do efektywnej produkcji spolaryzowanych pozytonów, które znajdują szerokie zastosowania, m.in. w fizyce ciała stałego i fizyce materiałowej.

(a) Efekty odbicia w procesach kreacji par elektron-pozyton indukowanych polem laserowym

Najintensywniej badanym współcześnie typem procesu jest kreacja par e^-e^+ w wyniku zderzenia wiązki jąder atomowych z wiązką pola laserowego, tzw. nieliniowy proces Bethe-Heitlera (zobacz, np. [6-21]). W tym kontekście warto zwrócić uwagę, że o ile mamy do czynienia ze zderzeniem czołowym, w układzie spoczynkowym jądra natężenie pola laserowego jest wzmocnione o czynnik $4\gamma^2$, gdzie $\gamma \gg 1$ jest relatywistycznym czynnikiem Lorentza. Sugeruje to, że dysponując relatywistycznymi cząstkami-tarczami proponowany scenariusz kreacji par elektron-pozyton można w zasadzie zrealizować nawet dla obecnie osiągalnych pól laserowych. Z kolei z punktu widzenia opisu teoretycznego ważnym spostrzeżeniem jest, że komptonowska długość fali elektronu znacznie przewyższa typowe rozmiary jąder atomowych a , co za tym idzie, z dobrym przybliżeniem jesteśmy w stanie opisać zderzające się jądra atomowe jako cząstki punktowe. Jak argumentowano w [22,23], to samo podejście nie znajduje zastosowania, gdy w rozpatrywanym procesie kreowane są pary mion-antymion.

W analizach teoretycznych poświęconych kreacji par e^-e^+ w procesie Bethe-Heitlera stosowane było powszechnie przybliżenie nieskończenie ciężkich jąder atomowych polegające na pominięciu efektów związanych ze zmianą pędu jąder atomowych w momencie kreacji pary, czyli na pominięciu efektów ich odbicia [6-15,17-21]. My również stosowaliśmy to przybliżenie (zwane też przybliżeniem potencjalnym) w naszych pierwszych artykułach na ten temat [9-12]. W trakcie tych początkowych prac zrodziło się pytanie, czy przybliżenie, o którym mowa ma sens dla obecnie osiągalnych ultra-silnych pól laserowych, kiedy energia ponderomotyczna (związana z ruchem oscylacyjnym swobodnego elektronu w polu laserowym) znacznie przewyższa energię spoczynkową elektronu. Problem ten został podjęty niezależnie przez nas [E1-E3] i przez grupę z Instytutu Maxa Plancka w Heidelbergu, Niemcy [16]. Zwróćmy uwagę, że wyniki poprzedzające okres, którego dotyczy prezentowany cykl publikacji zostały podsumowane w naszej pracy przeglądowej [24]. Obszerną literaturę tematu znaleźć też można w ostatnio opublikowanym artykule przeglądowym grupy z Heidelberga [25].

Efekty dotyczące wpływu skończonej masy jąder atomowych na tempo kreacji par elektron-pozyton dla przypadku, gdy wymuszające pole laserowe spolaryzowane jest kołowo omówione zostały w pracy [16]. Rozpatrzono tam jedynie przypadek, gdy intensywność wymuszającego pola laserowego jest stosunkowo mała zaś częstość kołowa stosunkowo duża. W takich warunkach, relatywistycznie niezmienniczy parametr μ , który uznaje się za wielkość charakteryzującą różne reżimy w procesach kreacji par indukowanych polem laserowym spełnia warunek $\mu \ll 1$ [26]; innymi słowy, wyniki przedstawione w artykule [16] dotyczyły perturbacyjnego reżimu kreacji par w polu laserowym [26]. Z tego względu, autorzy pracy [16] nie zaobserwowali znaczących efektów odbicia.

Nasze badania w tym zakresie finansowało Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego; projekt „Efekty odbicia w kreacji par i kontrola transmisji rezonansowej w silnym polu laserowym” otrzymał finansowanie ministerialne na lata 2009-2011. Wyniki zawarte w pracach [E1-E3] przedstawiłam w formie referatów na konferencjach SILAP 2009, LPHYS'10 oraz LPHYS'11, a także w formie plakatu w trakcie Gordon Research Conference.

E1. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, „Recoil effects in multiphoton electron-positron pair creation”
Phys. Rev. A **82**, 013420 (2010)

W publikacji przedstawiona została teoria procesu Bethe-Heitlera z udziałem pola laserowego w postaci monochromatycznej fali płaskiej, oparta na dwuwierzchołkowym diagramie Feynmana uwzględniającym zmianę pędu zderzającej się z polem laserowym cząstki naładowanej. Przedstawione ilustracje numeryczne dotyczyły nieperturbacyjnego reżimu kreacji par [26]. Choć wyniki dotyczyły sytuacji, gdy zderzające się z polem laserowym jądra atomowe to jądra neonu, porównywalne wyniki otrzymane zostały dla jąder ołowiu (i niezależnie dla protonów). Dla tak dobranych warunków, dokonano szczególnej analizy różniczkowych oraz całkowitych temp kreacji par elektron-pozyton. Wyniki

dotyczyły układu odniesienia, w którym jądro atomowe początkowo spoczywało.

Wcześniejsze badania nad procesem reakcji par elektronowo-pozytonowych pokazały, iż przy istniejących możliwościach eksperymentalnych efektywność tego procesu – przy zaniechaniu odrzutu zderzających się z polem laserowym cząstek naładowanych – jest niewielka. W związku z powyższym, przeprowadziłam gruntowną analizę tego zjawiska uwzględniając to ostatnie. Moja analiza pokazała, że różniczkowe tempa wielofotonowej reakcji par e^-e^+ wykazują ogromny wzrost (nawet o kilka rzędów wielkości) dla niezerowego przekazu pędu pochodzącego od cząstek naładowanych, co ma miejsce w trakcie ich zderzenia z ultra-silną wiązką laserową (tj. charakteryzującą się warunkiem $\mu \gg 1$). Dlatego spodziewać się należy wzmożonej efektywności badanego procesu, czego wykazanie oraz jakościowa analiza pod kątem ewentualnej realizacji eksperymentalnej stanowiły mój cel przewodni. W związku z powyższym zbadałam m.in. zależność różniczkowych temp wielofotonowej reakcji par od polaryzacji wymuszającego ją pola laserowego. Okazało się przy tym, że w obszarze nieperturbacyjnym jest to zależność dramatyczna; jedynie dla polaryzacji liniowej można było mówić o efekcie znaczącym i tej sytuacji fizycznej poświęcona została głównie publikacja [E1].

Kolejnym aspektem, który badałam była zależność rozkładów kątowych produkowanych cząstek od konfiguracji przestrzennej jąder atomowych. Obliczenia wykonane dla różnych konfiguracji przestrzennych jąder atomowych pokazały, iż reakcja par elektron-pozyton jest najbardziej efektywna, o ile zderzające się z polem laserowym jądro (na skutek odrzutu) porusza się asymptotycznie w kierunku propagacji fali laserowej (dotyczy to rozpatrywanego układu odniesienia). Zaobserwowano przy tym, że o ile wysoko-energetyczne pary kreowane są głównie w płaszczyźnie wyznaczonej przez wektor polaryzacji pola laserowego (mowa tu o polaryzacji liniowej) i przez kierunek jego propagacji, tak rozkłady kątowe nisko-energetycznych par rozmyte są względem kierunku propagacji pola.

Ponieważ różniczkowe tempa reakcji par wykazywały ogromne oscylacje wraz ze zmianą wartości przekazu pędu pochodzącego od jąder atomowych, oszacowanie całkowitego tempa reakcji par elektronowo-pozytonowych – stanowiące główny przedmiot zainteresowania grup doświadczalnych – było możliwe dzięki symulacjom Monte Carlo. W pracy [E1] przedstawiłam wyniki oszacowań Monte Carlo całkowitych temp reakcji par dla różnych wartości parametru μ w reżimie nieperturbacyjnym. Zaobserwowałam przy tym dramatyczny (tzn. o kilka rzędów wielkości) wzrost temp reakcji par dla przypadku, gdy w rozpatrywanym reżimie intensywności ($\mu \gg 1$) uwzględnimy wpływ skończonej masy jąder atomowych.

Dyskusja podjęta w publikacji [E1] nad efektami odbicia w procesie Bethe-Heitlera reakcji par elektronowo-pozytonowych kontynuowana była w kolejnej pracy na ten temat [E2].

E2. **K. Krajewska**, „*Electron-positron pair creation and Oleinik resonances*” Laser Phys. **21**, 1275 (2011)

Artykuł dotyczył procesu Bethe-Heitlera reakcji par e^-e^+ indukowanych liniowo spolaryzowaną monochromatyczną falą płaską w reżimie nieperturbacyjnym. W pracy dokonałam szczegółowej analizy różniczkowych temp reakcji par w procesie Bethe-Heitlera w przybliżeniu ciężkiego jądra atomowego. W tym celu porównałam wyniki dla przypadków, gdy jądro atomowe nie wymienia z polem laserowym fotonów bądź wymienia skończoną ich liczbę. Okazało się przy tym, że zasadne jest pominięcie ubierania jąder przez pole laserowe w rozpatrywanym reżimie intensywności ($\mu \gg 1$). Wynika to z faktu, że poprawka związana z ubieraniem przez pole laserowe jądra atomowego o liczbie porządkowej Z wynosi $(Z\mu m_e c^2)^2/2$, i w rozpatrywanej sytuacji fizycznej jest wielkością zaniechwalnie małą w porównaniu z $(Mc^2)^2$ (tutaj, m_e jest masą spoczynkową elektronu, zaś M jest masą spoczynkową jądra). Oznacza to, że nawet dla lekkich cząstek (np. protonów) zderzających się z wiązką laserową można zaniechać ich ubieranie przez pole laserowe pod warunkiem, że $(Z\mu m_e c^2)^2/2 \ll (Mc^2)^2$.

Kolejnym ważnym elementem publikacji było zademonstrowanie rezonansów w procesie Bethe-

Heitlera kreacji par, które to rezonanse charakteryzują procesy elektrodynamiki kwantowej w silnych polach laserowych (zobacz, np. [27,28]). Rozpatrzyłam przy tym sytuację, kiedy proton zderza się z liniowo spolaryzowaną wiązką laserową tż. $\mu=1$, co w dalszym ciągu charakteryzuje nieperturbacyjny reżim kreacji par indukowanej polem laserowym [26]. Zauważmy, że w rozpatrywanym przypadku uzasadnione było zaniedbanie ubierania protonu przez pole laserowe. O ile mi wiadomo, praca zawiera jedyne wyniki numeryczne dotyczące rezonansowej kreacji par w procesie Bethe-Heitlera. Wskazały one na istnienie bardzo wąskich rezonansów dla protonowego przekazu pędu będącego wielokrotnością $2m_e c$. Rezultaty te demonstrowały doskonałą zgodność z analizą biegunów w propagatorze fotonu i w związku z tym zinterpretowałam je jako tzw. rezonanse Oleinika [29,30].

W pracy [E2] opublikowane zostały pierwsze wyniki dotyczące procesu Bethe-Heitlera kreacji par w reżimie nieperturbacyjnym, tż. $\mu \sim 1$. Temat ten był kontynuowany w kolejnej pracy cyklu [E3].

E3. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, „*Correlations in laser-induced electron-positron pair creation*”
Phys. Rev. A **84**, 033416 (2011)

Praca dotyczyła procesu Bethe-Heitlera kreacji par w nieperturbacyjnym (mianowicie, gdy $\mu \sim 1$) reżimie oddziaływania pola laserowego z materią, gdy proton zderza się z wiązką laserową spolaryzowaną liniowo. Praca oparła się na teorii macierzy S zaprezentowanej w publikacjach [E1,E2]. Nowym elementem teoretycznym było zdefiniowanie gruboziarnistych różniczkowych temp kreacji par, które pozwoliły na zbadanie korelacji charakteryzujących rozpatrywany proces.

W pracy porównano mapy gruboziarnistych różniczkowych temp kreacji par dla rozpatrywanej sytuacji uwzględniającej zmianę pędu protonu na skutek kreacji pary elektron-pozyton z przybliżeniem potencjalnym, w ramach którego proton traktuje się jako cząstkę nieskończenie masywną. Pokazano, że przekaz pędu od zderzającego się protonu prowadzi do kreacji bardziej energetycznych par. Zaobserwowano również sygnatury typowe dla procesów ponadprogowych takich jak np. jonizacja; stąd też rozpatrywany reżim ($\mu \sim 1$) w kreacji par indukowanej polem laserowym nazywa się niekiedy reżimem ponadprogowym. Gruboziarniste rozkłady pokazały, że kreacja par zachodzi dla niezerowego przekazu pędu od zderzającego się protonu, przy czym w sposób najbardziej efektywny ma miejsce dla przekazu pędu w zakresie pomiędzy $m_e c$ oraz $2m_e c$. Tendencja ta utrzymuje się zresztą w reżimie perturbacyjnym, co potwierdziły wyniki, jakie zademonstrowałam dla $\mu=0.01$. Podczas gdy dla $\mu=0.01$ dominuje produkcja par w najniższym wielofotonowym kanale zadanym przez zasady zachowania, tak dla silniejszego pola laserowego ($\mu=1$) dominujące są procesy w dalszych wielofotonowych kanałach. W rezultacie, w przypadku silniejszego pola laserowego obserwuje się produkcję bardziej energetycznych cząstek. Warto też zwrócić uwagę, że w przypadku słabego pola laserowego uwzględnienie skończonej masy protonu prowadzi do nieznacznego wzrostu częściowych temp kreacji par, natomiast ta różnica powiększa się dla coraz silniejszych pól laserowych. W sposób naturalny znajduje to odzwierciedlenie w wielkości całkowitych temp kreacji par. Te ostatnie zostały zbadane w [E3] począwszy od reżimu perturbacyjnego a skończywszy na nieperturbacyjnym reżimie w zakresie ponadprogowym. Jeszcze raz znalazło potwierdzenie, że wpływ odrzutu zderzającej się w polem laserowym cząstki na tempo kreacji par elektron-pozyton jest tym większy im silniejsze jest pole laserowe.

Oprócz przeanalizowania efektów odbicia, prace [E1-E3] wskazały na istotną rolę, jaką odgrywa pole laserowe (a dokładniej, takie parametry pola jak jego natężenie i polaryzacja) w procesach kreacji par elektron-pozyton. W związku z tym w dalszej fazie badań skoncentrowałam się już wyłącznie na analizie wpływu pola laserowego na wymuszony nim proces kreacji par e^-e^+ [E4-E6].

(b) Kontrola procesów kreacji par elektron-pozyton za pomocą pola laserowego

W badaniach teoretycznych nad procesami kreacji par elektron-pozyton w silnych polach laserowych przyjmowano zazwyczaj, iż pole laserowe można opisywać jako monochromatyczną falę

płaską. W pracach [E4-E6] wyszliśmy poza to przybliżenie traktując przypadek bichromatycznego pola laserowego, modulowanej fali płaskiej a także przypadek krótkiego impulsu laserowego. Potrzebę tego rodzaju badań wymusza postęp, jaki dokonał się w ostatnich latach w technologii laserowej pozwalając na wytwarzanie krótkich impulsów laserowych o precyzyjnie kontrolowanych kształtach. W konsekwencji, możliwe stało się w laboratorium badanie procesów kwantowych modyfikowanych lub stymulowanych przez pole laserowe, z uwzględnieniem wpływu różnego rodzaju charakterystyk impulsów. Szczególnego znaczenia nabrała analiza kontroli procesów kwantowych z wykorzystaniem faz pola laserowego, takich jak faza obwiedni czy fazy względne pola wielochromatycznego (zobacz, np. [31,32]). Fazami tymi można kontrolować wielorakie procesy, m.in. fotojonizację atomów i cząsteczek, generację wyższych harmonicznych, czy fotoemisję w ciele stałym. Niewiele uwagi poświęcono natomiast efektom fazowym w procesach elektrodynamiki kwantowej zachodzących w silnych polach laserowych.

Jedyne znane mi w tym okresie prace, które poruszały zależność procesu kreacji par elektron-pozyton od fazy wymuszającego pola laserowego dotyczyły sytuacji, w której pary produkowane były w zderzeniach pola laserowego z nie pochodzącym od pola fotonem [33-36]; tzw. nieliniowy proces Breita-Wheelera. W szczególności, wspomniane tu prace poświęcone były sytuacji, w której wiązkę laserową opisuje się jako pole bichromatyczne a, co za tym idzie, mowa w nich była o efektach fazy względnej w kreacji par. Przypadek, gdy oba komponenty pola laserowego spolaryzowane są kołowo stanowił sedno tych rozważań. Prace [33-36] zawierały szczegółową analizę teoretyczną, przy czym w [36] ukazały się też wyniki numeryczne dla sytuacji, gdy jeden z komponentów pola dominuje. Dzięki tym wynikom wywnioskowano, że różniczkowe tempa kreacji par w procesie Breita-Wheelera silnie zależą od fazy względnej pomiędzy składowymi pola laserowego. Jak z kolei argumentowano w [35], całkowite tempa kreacji par takiej zależności nie powinny wykazywać.

W tym miejscu pozwolę sobie na dygresję. Posługując się teorią Diraca elektronu, Sauter [37] i Schwinger [38] wskazali na możliwość kreacji par elektron-pozyton z próżni na skutek przyłożonego stałego pola elektrycznego. Zaobserwowanie tego procesu wymagałoby nieosiągalnych w warunkach ziemskich wartości pola elektrycznego, $E_{cr} = 1.3 \times 10^{16}$ V/cm (tzw. krytyczne pole Sautera-Schwingera). Podobny wniosek nasuwa się, gdy zastąpimy stałe pole elektryczne polem oscylującym w czasie [39,40]. Tymczasem w Centrum Liniowego Akceleratora Stanforda (Stanford Linear Accelerator Center, SLAC) przeprowadzono doświadczenie, w którym zaobserwowano nieliniowy proces kreacji par e^-e^+ z udziałem pola laserowego [41,42]. Mowa tu o słynnym doświadczeniu E-144, które stanowi jedyne jak na razie doświadczenie potwierdzenie przewidywań nieperturbacyjnej elektrodynamiki kwantowej. We wspomnianym eksperymencie wiązka laserowa zderzając się z relatywistyczną wiązką elektronów produkowała energetyczne fotony γ , a następnie w zderzeniach fotonów γ z pierwotną wiązką laserową produkowane były elektrony i pozytony. Ten drugi etap doświadczenia E-144 realizowany był właśnie w oparciu o proces Breita-Wheelera. Zwróćmy uwagę, że ze względu na niewielką produkcję fotonów γ w tym dwustopniowym procesie, równie niewielka była liczba produkowanych par e^-e^+ . Wydaje się zatem, że bardziej efektywnym sposobem generacji par elektron-pozyton byłby proces bezpośredni, w którym produkcja następuje w zderzeniach cząstek naładowanych z wiązką laserową, czyli proces Bethe-Heitlera.

W ramach omawianego cyklu publikacji, moim celem było zbadanie wpływu charakterystyk pola laserowego na procesy indukowanej tymże polem kreacji par elektron-pozyton. Moje badania w tej dziedzinie, w latach 2011-2014, finansuje Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu badawczego „Indukowane polem laserowym procesy kreacji par w elektrodynamice kwantowej”, którego jestem kierownikiem. Wyniki, które teraz przedstawię zaprezentowałam w formie plakatu na konferencji DAMOP'12 a także w formie referatu zaproszonego podczas *Symposium on Strong-Field Quantum Electrodynamics*, jakie odbyło się w trakcie konferencji LPHYS'12.

E4. **K. Krajewska, J. Z. Kamiński**, „*Phase effects in laser-induced electron-positron pair creation*”
Phys. Rev. A **85**, 043404 (2012)

W oparciu o formalizm macierzy S , w pracy wprowadzona została teoria procesu kreacji par elektron-pozyton w sytuacji, gdy pary kreowane są w zderzeniu cząstki naładowanej z polem laserowym w postaci bichromatycznej fali płaskiej o dowolnej polaryzacji, dowolnej fazie i dowolnym natężeniu każdego ze składników pola. Uwzględniono przy tym skończoną masę zderzającej się cząstki, podobnie jak miało to miejsce w badaniach z udziałem pola monochromatycznego [E1-E3].

Wstępne obliczenia pokazały, że własności rozważanego procesu w kontekście efektów odbicia cząstek zderzających się z polem laserowym w pełni korespondują z własnościami diskutowanymi w pracach [E1-E3]. W związku z powyższym zaprezentowane zostały wyniki dla zderzenia protonu, który zyskuje pęd w kierunku propagacji fali laserowej, której oba składniki są spolaryzowane liniowo i oba są równie silne; dotyczy to spoczynkowego układu protonu, asymptotycznie przed zderzeniem. Dla takiej sytuacji zademonstrowałam mapy częściowych rozkładów kątowych produkowanych elektronów. Mapy te wykazały silną zależność od fazy względnej pomiędzy składowymi pola laserowego. Z kolei symulacje Monte Carlo pokazały, że całkowite tempa kreacji par takiej zależności nie wykazują a, co za tym idzie, że nie jest możliwa całościowa kontrola procesu Bethe-Heitlera kreacji par e^-e^+ za pomocą fazy względnej pola laserowego.

Inną możliwość sterowania procesami kwantowymi w polu laserowym oferuje faza obwiedni. Taką fazę można zdefiniować dla pojedynczego impulsu laserowego bądź też dla modulowanej fali płaskiej. Jak pokazaliśmy, dla szczególnego wyboru tej ostatniej [a mianowicie, gdy oprócz fali biegnącej $\sin(k \cdot x + \chi)$ mamy do czynienia z obwiednią typu $\sin^4(k \cdot x)$] możliwe jest przybliżenie polem bichromatycznym. Tym samym wypracowane metody rachunkowe znalazły też zastosowanie przy badaniu efektów fazy obwiedni w procesie Bethe-Heitlera kreacji par e^-e^+ . Dla przypomnienia, za fazę obwiedni uznaje się przesunięcie fazowe fali biegnącej w stosunku do obwiedni, czyli χ . Jednocześnie zdaliśmy sobie sprawę, że aby w sposób miarodajny porównać wielkości temp kreacji par dla różnych faz obwiedni należy nałożyć dodatkowy warunek uboczny na postać pola laserowego. W publikacji [E4] rozpatrzyliśmy dwa warianty tego warunku a mianowicie, gdy (bez względu na fazę obwiedni) ustalona jest energia ponderomotoryczna elektronu oscylującego w polu fali laserowej bądź też, gdy ustalona jest średnia intensywność pola laserowego. Dla każdego z nich zbadaliśmy następnie zależność całkowitych temp kreacji par elektron-pozyton od fazy obwiedni. Dla rozpatrywanego przypadku, zależność ta była szczególnie znacząca dla skalowania pola laserowego względem energii ponderomotorycznej. Rachunki wykonane zostały dla różnych wartości parametru μ , począwszy od reżimu perturbacyjnego ($\mu \ll 1$) a skończywszy na reżimie nieperturbacyjnym ($\mu \sim 1$). Choć jakościowo wyniki dla różnych wartości μ nie różniły się, ilościowo zaobserwowaliśmy dramatyczny (o kilka rzędów wielkości) wzrost całkowitych temp kreacji par przy wzroście parametru μ .

O ile mi wiadomo, [E4] stanowi jak dotąd jedyną pozycję literaturową, gdzie zademonstrowano efekty fazowe w nieliniowym procesie Bethe-Heitlera kreacji par dla przypadku, gdy uwzględniona zostaje skończona masa zderzającej się z polem laserowym cząstki-tarczy. O tym, jak istotne konsekwencje na przebieg procesu kreacji par e^-e^+ może mieć postać wymuszającego pola laserowego traktuje też kolejna praca cyklu [E5].

E5. **K. Krajewska, J. Z. Kamiński**, „*Symmetries in the nonlinear Bethe-Heitler process*”
Phys. Rev. A **86**, 021402(R) (2012)

Praca dotyczy kreacji par elektron-pozyton w zderzeniu wiązki laserowej – modelowanej jako pole bichromatyczne – z protonem, w oparciu o teorię i metody rachunkowe opracowane w [E4]. Tym razem porównano rozkłady kątowe produkowanych cząstek dla dwóch postaci wymuszającego pola laserowego, z których każda charakteryzowała się inną symetrią względem kierunku propagacji pola.

Zadbane przy tym o zachowanie jednakowej energii progowej na zjściu procesu kreacji par, która to energia wiąże się z energią ponderomotoryczną ruchu elektronu w polu laserowym [E4]. Przedstawione rezultaty dotyczyły reżimu nieperturbacyjnego.

Głównym wynikiem pracy było stwierdzenie, że symetria rozkładów kątowych produkowanych cząstek odzwierciedla symetrię potencjału wektorowego, jaki opisuje pole laserowe – a nie symetrię składowej elektrycznej pola. Prawdliwość tę zilustrowano na przykładzie częściowych rozkładów kątowych i gruboziarnistych rozkładów kątowych elektronów [E3,E4]. Tym samym wskazano, że w rozważanym obszarze parametrów nie obowiązuje powszechnie akceptowany mechanizm kreacji par elektron-pozyton przez tunelowanie, wedle którego pary kreowane są z próżni z prawdopodobieństwem zdeterminowanym przez składową elektryczną pola laserowego. Było to o tyle zastanawiające, że w rachunkach numerycznych osiągnęliśmy reżim kwazi-statyczny (rachunki wykonano nawet dla $\mu=10$) i spodziewać się należało, że to składowa elektryczna pola odgrywać będzie decydującą rolę.

Idea przedstawiona w pracy [E5] polega na badaniu korelacji pomiędzy rozkładami kątowymi produkowanych cząstek a postacią pola laserowego (dokładniej, postacią potencjału wektorowego vs. pola elektrycznego) i stwarza możliwość weryfikacji zakorzenionego w literaturze przekonania jakoby tunelowanie było mechanizmem odpowiedzialnym za kreację par cząstka-antycząstka. W tym sensie stanowi propozycję dla przyszłych eksperymentów. Choć aspekt ten nie jest jawnie dyskutowany w [E5], praca wskazuje również na możliwość kontroli procesu kreacji par e^-e^+ poprzez zmianę kształtu wymuszającego pola laserowego. W pracy zilustrowano to na dwóch skrajnych przykładach, kiedy produkcja cząstek zachodzi symetrycznie bądź antysymetrycznie względem kierunku propagacji pola laserowego – zawsze jednak zgodnie z symetrią potencjału wektorowego opisującego pole laserowe.

O roli pola laserowego w procesach kreacji par elektronowo-pozytonowych traktuje też ostatnia pozycja prezentowanego cyklu [E6]. Tym razem skoncentruję się na badaniu wpływu czasu trwania wymuszającego impulsu laserowego na przebieg procesu kreacji par.

E6. **K. Krajewska**, J. Z. Kamiński, „*Breit-Wheeler process in intense short laser pulses*”
Phys. Rev. A **86**, 052104 (2012)

Jak już wspomniałam, kreacja par elektron-pozyton zachodzić może w zderzeniu silnej wiązki laserowej z fotonem nie pochodzącym z pola laserowego, co zostało zrealizowane eksperymentalnie w laboratorium SLAC [41,42]. W pierwszych pracach teoretycznych na ten temat stosowano przybliżenie monochromatycznej [43-48] i bichromatycznej [33-36] fali płaskiej bądź przybliżenie wolno-zmiennej obwiedni [49] w stosunku do wymuszającego impulsu laserowego. Dopiero ostatnio udało się uogólnić dotychczasowe rozważania na przypadek skończonego impulsu laserowego [50-52,E6]. W pracach na ten temat [50-52,E6] posłużono się ideą Neville'a i Rohrlicha [53], która stosuje się, gdy zaniedbać można poprzeczny ruch elektronu (pozytonu) w wiązce laserowej (zobacz, np. [54]); w takiej sytuacji impuls laserowy można opisać jako impuls skończony w kierunku rozchodzenia się wiązki laserowej oraz nieskończoną falę płaską w kierunku poprzecznym. W szczególności, w pracach [51,52] wykonano obliczenia przekrojów czynnych na kreację par elektron-pozyton, dopuszczając przy tym różnorakie przybliżenia mające zastosowanie w przypadku kreacji par w reżimie perturbacyjnym ($\mu \ll 1$). Z kolei wyniki w reżimie nieperturbacyjnym ($\mu \sim 1$) z naciskiem położonym głównie na efekt ubierania masy cząstek relatywistycznych w polu laserowym przedstawiono w [50]. W tym miejscu zwrócę uwagę, że to samo podejście wykorzystuje się ostatnio w badaniach teoretycznych nad nieliniowym procesem Comptona (zobacz, np. [55-64]), który wiąże się z nieliniowym procesem Breita-Wheelerera poprzez symetrię skrzyżowania diagramów Feynmana.

W artykule przedstawiłam teorię procesu kreacji par e^-e^+ w zderzeniu krótkiego impulsu laserowego z nielaserym fotonem. Jednocześnie wprowadziłam teorię dla sytuacji fizycznej, gdy impuls laserowy zastąpiony zostanie modulowaną falą monochromatyczną (rozumianą jako sekwencja iden-

tycznych impulsów). W obu przypadkach oparłam się na metodzie macierzy S . W przypadku kreacji par indukowanej przez ciąg impulsów laserowych, zdefiniowałam różniczkowe rozkłady prawdopodobieństwa kreowanych cząstek na jeden impuls z ciągu. Umożliwiło to porównanie wyników numerycznych w obu rozważanych przypadkach.

W artykule przedstawiłam wyniki dla sytuacji nieperturbacyjnej ($\mu \sim 1$), gdy mamy do czynienia z impulsami spolaryzowanymi liniowo o profilu sinus kwadrat. Nieskończona sekwencja takich impulsów definiowała modulowaną falę monochromatyczną. Porównane zostały rozkłady prawdopodobieństwa cząstek produkowanych przez pojedynczy impuls a także przez ciąg impulsów w zależności od czasu ich trwania. Przyjeliśmy przy tym dodatkowy warunek uboczny (podobnie jak miało to miejsce w [E4]); porównaliśmy bowiem rozkłady prawdopodobieństwa cząstek kreowanych przez impulsy o ustalonej energii. Zaobserwowaliśmy doskonałą zgodność rozkładów prawdopodobieństwa kreowanych cząstek przez pojedynczy impuls i przez ciąg impulsów w sytuacji, gdy impulsy są odpowiednio długie. Wraz ze skróceniem czasu trwania impulsów, zgodność ta zostaje zatracona. Efekt ten zgadza się z intuicją fizyczną, albowiem dla krótkich impulsów laserowych (zawierających zaledwie kilka oscylacji pola) szczególnie ważny staje się rzeczywisty rozkład pola elektromagnetycznego w impulsie. Znalazło to potwierdzenie w zależności badanych charakterystyk procesu od fazy obwiedni wymuszającego ten proces impulsu laserowego. Jak pokazaliśmy dla impulsu składającego się z zaledwie dwóch cykli optycznych, zmieniając fazę obwiedni impulsu można w sposób istotny zmieniać rozkłady kątowe produkowanych pozytonów (elektronów) – od symetrycznych względem kierunku rozchodzenia się fotonu nie pochodzącego z pola laserowego do niesymetrycznych. Tym samym wskazaliśmy na możliwość kontroli procesu kreacji par indukowanej polem laserowym za pomocą fazy obwiedni.

Kolejnym zaobserwowanym efektem było wzmocnienie sygnału generowanych cząstek dla krótszych impulsów laserowych, co ma miejsce albowiem w rozważanym przypadku ustalona została energia pola elektromagnetycznego zawarta w pojedynczym impulsie. Świadczy to też o tym, że czas trwania impulsu stanowi kolejny czynnik umożliwiający sterowanie procesami kreacji par. Czas trwania impulsów determinuje również inne charakterystyki procesu; np. w przypadku odpowiednio długich impulsów laserowych obserwujemy charakterystyczne wielofotonowe maksima w sygnale kreowanych cząstek. Struktura ta zanika jednak dla coraz krótszych impulsów laserowych.

Praca [E6] traktuje nieliniowy proces Breita-Wheelera kreacji par indukowany przez krótkie impulsy laserowe w obszarze nieperturbacyjnym. O ile mi wiadomo, jest to jedyna publikacja w tej tematyce, która w sposób systematyczny dyskutuje zależność sygnału produkowanych cząstek (zarówno ich rozkładów kątowych jak i energetycznych) od czasu trwania wymuszających impulsów laserowych oraz fazy ich obwiedni.

Podsumowanie:

Próżnia kwantowa stanowi jedno z fundamentalnych zagadnień fizyki współczesnej. Można ją próbować ultra-silnymi polami laserowymi z zakresu bliskiego granicy Sautera-Schwingera, która odpowiada natężeniu pola laserowego rzędu 10^{29} W/cm². Zwróćmy uwagę, że mechanizmy kreacji par będące przedmiotem badań prezentowanego cyklu prac [E1-E6] umożliwiają kreację par elektronowo-pozytonowych znacznie poniżej tej granicy (zobacz, dyskusja na stronie 14 oraz publikacje [41,42]). W związku z powyższym są one szczególnie atrakcyjne pod kątem eksperymentalnej realizacji procesu.

W kontekście planowanych eksperymentów, znaczenia nabiera cykl prac [E1-E6] zawierający szereg oryginalnych wyników oraz opartych na nich przewidywań teoretycznych dotyczących własności procesów kreacji par e^-e^+ indukowanych silnym polem laserowym. Cykl ten wyrósł zasadniczo z chęci odpowiedzi na pytanie o zasadność przybliżenia nieskończone ciężkich jąder atomowych w odniesieniu do badanego przez nas uprzednio nieliniowego procesu Bethe-Heitlera [9-12,24]. W ramach prac [E1-E3] dokonaliśmy systematycznej analizy wpływu skończonej masy jąder atomowych na charakterystyki procesu w różnych reżimach oddziaływania pola laserowego z materią [26]. Jednocześnie zaobserwo-

waliśmy, iż znaczący wpływ na charakterystyki procesu ma wymuszające pole laserowe, a w szczególności natężenie pola [E1-E3] oraz polaryzacja [E1]. Ponieważ prace [E1-E3] traktowały zewnętrzne pole laserowe w przybliżeniu monochromatycznej fali płaskiej, dalsze badania dotyczące roli pola laserowego w procesach kreacji par e^-e^+ wymagały wyjścia poza to przybliżenie. W kolejnych pracach cyklu przeanalizowaliśmy wpływ takich parametrów pola laserowego na procesy kreacji par jak faza względna [E4], faza obwiedni [E4,E6], kształt [E5] oraz czas trwania [E6] impulsów laserowych. Prace te dotyczą sytuacji, gdy pole laserowe traktuje się jako bichromatyczną falę płaską [E4,E5], modulowaną falę płaską [E6] czy skończony impuls laserowy [E6]. Wszystkie przedstawione publikacje [E1-E6] wiążą się z kontrolą procesów kreacji par elektronowo-pozytonowych wymuszającym te procesy polem laserowym.

Na zakończenie chciałabym nadmienić, że moim priorytetowym celem w najbliższym czasie jest zbadanie procesu Bethe-Heitlera kreacji par w skończonym impulsie laserowym z uwzględnieniem odrzutu cząstek-tarcz. Wymaga to obliczenia dwuwierzchołkowego diagramu Feynmana ubranego przez impuls laserowy, czyli połączenia metod rachunkowych, na których oparły się przedstawione tu prace [E1-E6]. Problem ten stanowi poważne wyzwanie teoretyczno-numeryczne.

Literatura:

- [1] G. A. Mourou, T. Tajima, S. V. Bulanov, *Rev. Mod. Phys.* **78**, 309 (2006).
- [2] V. Yanovsky, *et al.*, *Opt. Express* **16**, 2109 (2008).
- [3] <http://www.eli-laser.eu>
- [4] <http://www.hiper-laser.org/>
- [5] <http://flash.desy.de/>
- [6] C. Müller, A. B. Voitkiv, N. Grün, *Phys. Rev. A* **67**, 063407 (2003).
- [7] C. Müller, A. B. Voitkiv, N. Grün, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 223601 (2003).
- [8] C. Müller, A. B. Voitkiv, N. Grün, *Phys. Rev. A* **70**, 023412 (2004).
- [9] K. Krajewska, J. Z. Kamiński, F. Ehlotzky, *Laser Phys.* **16**, 272 (2006).
- [10] P. Sieczka, K. Krajewska, J. Z. Kamiński, P. Panek, F. Ehlotzky, *Phys. Rev. A* **73**, 053409 (2006).
- [11] J. Z. Kamiński, K. Krajewska, F. Ehlotzky, *Phys. Rev. A* **74**, 033402 (2006).
- [12] K. Krajewska, J. Z. Kamiński, *Laser Phys.* **18**, 185 (2008).
- [13] C. Deneke, C. Müller, *Phys. Rev. A* **78**, 033431 (2008).
- [14] C. Müller, *Phys. Lett. B* **672**, 56 (2009).
- [15] E. Lotstedt, U. D. Jentschura, C. H. Keitel, *New J. Phys.* **11**, 013054 (2009).
- [16] S. J. Müller, C. Müller, *Phys. Rev D* **80**, 053014 (2009).
- [17] A. Di Piazza, E. Lotstedt, A. I. Milstein, C. H. Keitel, *Phys. Rev. A* **81**, 062122 (2010).
- [18] H. Hu, C. Müller, C. H. Keitel, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 080401 (2010).
- [19] A. Di Piazza, A. I. Milstein, C. Müller, *Phys. Rev. A* **82**, 062110 (2010).
- [20] T.-O. Müller, C. Müller, *Phys. Lett. B* **696**, 201 (2011).
- [21] T.-O. Müller, C. Müller, *Phys. Rev. A* **86**, 022109 (2012).
- [22] C. Müller, C. Deneke, and C. H. Keitel, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 060402 (2008).
- [23] C. Müller, C. Deneke, M. Ruf, G. R. Mocken, K. Z. Hatsagortsyan, C. H. Keitel, *Laser Phys.* **19**, 791 (2009).
- [24] F. Ehlotzky, K. Krajewska, J. Z. Kamiński, *Rep. Prog. Phys.* **72**, 046401 (2009).
- [25] A. Di Piazza, C. Müller, K. Z. Hatsagortsyan, C. H. Keitel, *Rev. Mod. Phys.* **84**, 1177 (2012).
- [26] W celu rozróżnienia różnych reżimów w procesach kreacji par indukowanych polem laserowym wprowadza się relatywistycznie niezmienniczy parametr μ , który jest miarą energii, jaką elektron absorbuje z pola laserowego na długości Comptona mierzonej w jednostkach energii fotonu. W sytuacji, gdy $\mu \ll 1$ pole laserowe można traktować perturbacyjnie, jako że całkowite tempo kreacji par spełnia perturbacyjne prawo potęgowe $W \sim \mu^{2N}$, gdzie N jest minimalną liczbą fotonów, jakie muszą zostać zaabsorbowane z pola laserowego, aby została wyprodukowana para. Dla wartości $\mu \sim 1$ bądź większych,

tego rodzaju prawo potęgowe nie jest spełnione, co oznacza, iż mamy do czynienia z reżimem nieperturbacyjnym.

- [27] S. P. Roshchupkin, *Laser Phys.* **6**, 837 (1996).
- [28] S. P. Roshchupkin, A. A. Lebed', E. A. Padusenko, A. I. Voroshilo, *Laser Phys.* **22**, 1113 (2012).
- [29] V. P. Oleinik, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **52**, 1049 (1967) [*Sov. Phys. JETP* **25**, 697 (1967)].
- [30] V. P. Oleinik, I. V. Belousov, *The Problems of Quantum Electrodynamics of the Vacuum, Dispersive Media and Strong Fields* (Kishinev, Shtiintsa, 1983).
- [31] F. Ehlotzky, *Phys. Rep.* **345**, 175 (2001).
- [32] M. Shapiro, P. Brumer, *Rep. Prog. Phys.* **66**, 859 (2003).
- [33] V. I. Ritus, *Tr. Fiz. Inst. Akad. SSSR* **111**, 5 (1979).
- [34] A. Yu, H. Takahashi, *Phys. Rev. E* **57**, 2276 (1998).
- [35] N. B. Narozhny, M. S. Fofanov, *Phys. Rev. E* **60**, 3443 (1999).
- [36] N. B. Narozhny, M. S. Fofanov, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **117**, 476 (2000) [*JETP* **90**, 415 (2000)].
- [37] F. Sauter, *Z. Phys.* **69**, 742 (1931).
- [38] J. Schwinger, *Phys. Rev.* **82**, 664 (1951).
- [39] E. Brezin, C. Itzykson, *Phys. Rev. D* **2**, 1191 (1970).
- [40] V. S. Popov, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **61**, 1334 (1971) [*Sov. Phys. JETP* **34**, 709 (1972)].
- [41] D. L. Burke, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 1626 (1997).
- [42] C. Bamber, *et al.*, *Phys. Rev. D* **60**, 092004 (1999).
- [43] H. R. Reiss, *J. Math. Phys.* **3**, 59 (1962).
- [44] A. I. Nikishov, V. I. Ritus, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **46**, 776 (1964) [*Sov. Phys. JETP* **19**, 529 (1964)].
- [45] N. B. Narozhny, A. I. Nikishov, V. I. Ritus, **47**, 930 (1964) [*Sov. Phys. JETP* **20**, 622 (1965)].
- [46] D. Yu. Ivanov, G. L. Kotkin, V. G. Serbo, *Eur. Phys. J. C* **40**, 27 (2005).
- [47] D. Yu. Ivanov, G. L. Kotkin, V. G. Serbo, *Acta Phys. Pol. B* **37**, 1073 (2006).
- [48] O. I. Denisenko, *Laser Phys.* **18**, 920 (2008).
- [49] N. B. Narozhny, M. S. Fofanov, *Laser Phys.* **7**, 141 (1997).
- [50] T. Heinzl, A. Ilderton, and M. Marklund, *Phys. Lett. B* **692**, 250 (2010).
- [51] A. I. Titov, H. Takabe, B. Kämpfer, A. Hosaka, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 240406 (2012).
- [52] T. Nousch, D. Seipt, B. Kämpfer, A. I. Titov, *Phys. Lett. B* **715**, 246 (2012).
- [53] R. A. Neville, F. Rohrlich, *Phys. Rev. D* **3**, 1692 (1971).
- [54] S. V. Bulanov, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **660**, 31 (2011).
- [55] M. Boca, V. Florescu, *Phys. Rev. A* **80**, 053403 (2009).
- [56] T. Heinzl, D. Seipt, B. Kämpfer, *Phys. Rev. A* **81**, 022125 (2010).
- [57] F. Mackenroth, A. Di Piazza, and C. H. Keitel, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 063903 (2010).
- [58] D. Seipt, B. Kämpfer, *Phys. Rev. A* **83**, 022101 (2011).
- [59] F. Mackenroth, A. Di Piazza, *Phys. Rev. A* **83**, 032106 (2011).
- [60] M. Boca, V. Florescu, *Eur. Phys. J. D* **61**, 449 (2011).
- [61] K. Krajewska, J. Z. Kamiński, *Phys. Rev. A* **85**, 062102 (2012).
- [62] M. Boca, V. Dinu, V. Florescu, *Phys. Rev. A* **86**, 013414 (2012).
- [63] M. Boca, V. Dinu, V. Florescu, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. B* **279**, 12 (2012).
- [64] K. Krajewska, J. Z. Kamiński, *Laser Part. Beams* (w druku) (2013).

Katarzyna Krajewska