

ӘӨЖ 533.72

## КИЛЬВАТЕРЛЫҚ ҮДЕТУДІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІ

Азаматов Асылхан Азаматұлы

[aaa180896@gmail.ru](mailto:aaa180896@gmail.ru)

Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ магистранты, Нұр-Сұлтан, Қазақстан  
Ғылыми жетекшісі – Сахиев С.

Бөлшектердің үдеткіштері қазіргі ғылымда маңызды рөл атқарады және жоғары энергия физикасының негізгі құралдарының бірі болып табылады. Атап айтқанда, жеделдетілген электрондар лептондық коллайдерлерде, сондай-ақ жету қиын рентген және гамма диапазонында электромагниттік сәуле шығару үшін қолданылады. Дәстүрлі электронды үдеткіштер радиожилік резонаторлардағы электр өрісін пайдалануға негізделген [1,2]. Олардағы жеделдету өрісінің амплитудасы көп факторлы разрядтың дамуымен шектеледі және әдетте бірнеше ондаған МВ/м мәндеріне жетеді [3]. Осыған байланысты электрондарды бірнеше ГэВ ретті энергияға жеделдетуге мүмкіндік беретін қондырғылар айтарлықтай өлшемдерге жетуі мүмкін. Мысалы, қазіргі рекордтық 10 000 ГэВ электронды энергияға қол жеткізу үшін диаметрі 27 км сақиналық үдеткіш LEP (Үлкен электрон – позитронды коллайдер) қолданылды [4]. Сақиналық үдеткіштердегі үдеу ұзындығы бойынша шектеудің жоқтығына қарамастан, энергияның өсуі электрондардың қисық сызықты траектория бойынша қозғалған кездегі синхротрондық сәулеленуінен болатын шығындармен шектеледі. Сызықтық үдеткіштердің мұндай кемшілігі жоқ, оның ең жарқын өкілі Стэнфордтағы SLAC кешеніндегі (Stanford Linear Accelerator Center) сызықтық үдеткіш болып табылады, ол электрондарды 50 ГэВ энергияға дейін үдеу ұзындығы бойынша жеделдетуге мүмкіндік береді. 3,2 км [5,6]. Жеделдетілген бөлшектердің қол жетімді энергиясын одан әрі арттыру үшін қондырғылардың өлшемдерін пропорционалды ұлғайту қажет. Мысалы, International Linear Collider (ILC) жобасында шамамен

30 км үдеткіш өлшемімен 500 ГэВ энергияға қол жеткізу жоспарлануда [7,8]. PeV ретті энергияға жету перспективаларын қарастырған кезде үдеткіштердің қажетті өлшемдері астрономиялық шкалаларға дейін өседі. Дәстүрлі үдеткіштердің үлкен өлшемдері мәселесінің ықтимал шешімдерінің бірі жеделдету үшін плазмалық ояту толқынының бойлық электр өрісін пайдалануға негізделген плазмалық үдеу әдістерін қолдану болып табылады [9–12]. Мұндай толқындағы өрістің тән күші плазманың тығыздығымен анықталады [13]. Плазма тығыздығы үшін бұл интенсивтілік 100 ГВ/м деңгейіндегі мәнге жетеді, бұл қазіргі заманғы үдеткіштердің мүмкіндіктерінен бірнеше ретке асып түседі. Релятивистік электрондар шоғыры ояту толқынының көзі ретінде қызмет ете алады [14-15]. Кулон өрісінің әсерінен ол плазмалық электрондарды бір-бірінен итереді, бұл зарядтардың бөлінуіне және шоғырдың артында плазмалық ояту толқынының пайда болуына әкеледі. Мұндай толқынның фазалық жылдамдығы шоғырдың жылдамдығымен анықталады және жарық жылдамдығына жақын, сондықтан жеделдетілген электрондар оның бойлық өрісінде тиімді үдетіліп, толқынмен ұзақ уақыт синхронизмде бола алады. Сол сияқты, плазма электрондарының кулондық тартылуына байланысты оң зарядталған бөлшектердің (позитрондар, протондар) шоғырлары да ояту толқынын тудыруы мүмкін. Ояну толқынын қоздырудың тағы бір нұсқасы жоғары қуатты қысқа лазерлік импульсті қолдану болып табылады [16]. Шырылдаған импульстарды күшейту әдісіне негізделген заманауи лазерлік қондырғылар петаватт қуат деңгейімен және импульстік ұзындығы бірнеше ондаған фемтосекундтардағы лазерлік импульстарды жасауға мүмкіндік береді. Олар фокусталған кезде өрістің қарқындылығы мәндеріне жетуі мүмкін, бұл бірнеше ондаған ТВ/м өріс кернеулігіне сәйкес келеді. Осындай үлкен лазерлік импульстік өрістерді жеделдету үшін тікелей пайдалануға Вудворд-Лоусон теоремасы тыйым салады [18], ол шексіз бос кеңістікте лазерлік импульс арқылы электронды жеделдету мүмкін еместігі туралы айтады. Бұл шектеуді лазерлік импульстің затпен, атап айтқанда, қатты дене құрылымдарымен әрекеттесуін қолдану арқылы айналып өтуге болады немесе сиректелген плазма. Соңғы жағдайда плазма лазерлік импульстің көлденең және жылдам тербелмелі өрісінің күштілігі төмен болса да ояту толқынының бойлық электр өрісіне айналуын қамтамасыз етеді. Сиректелген плазманы жасау үшін газ нысаналары қолданылады. Алдыңғы жиекте тұрған қуатты лазерлік импульс сутегі немесе гелий сияқты жеңіл элементтердің газдарын толығымен иондандырады. Түзілген плазмада зарядтардың бөлінуі пондеромозды күштің әсерінен жүреді, бұл лазер өрісінің қарқындылығы жоғары аймақтан жеңіл плазмалық электрондарды итеріп жібереді, бірақ ояту толқынының бірнеше кезеңдерінің шкалаларында ауыр иондарға дерлік әсер етпейді. Қалыптасқан ояту плазмалық толқынның фазалық жылдамдығы негізінен лазерлік импульстің топтық жылдамдығымен анықталады. Сиректелген плазмада бұл жылдамдық жарық жылдамдығына жақын, бұл нәтижелі ояту толқынын тиімді жеделдету үшін пайдалануға мүмкіндік береді. Ояну толқынының тиімді генерациялануы үшін драйвердің қысқа ұзақтығы (бөлшектердің шоғыры немесе лазерлік импульс) оңтайлы болып табылады, ол плазмалық толқын ұзындығымен шамасының ретімен сәйкес келеді. Мысалы, плазма тығыздығы үшін плазмалық толқын ұзындығы драйвер ұзақтығы 110 фс сәйкес келеді. Қазіргі заманғы фемтосекундтық лазер қондырғылары бірнеше ондаған fs ұзақтығы бар импульстарды жасауға мүмкіндік береді; олар ояту толқынын тиімді қоздыра алады. Екінші жағынан, зарядталған бөлшектердің осындай қысқа шоғырларын алу әлі де белгілі бір қиындықтарды тудырады. Дегенмен, лазерлік-плазмалық үдеткіштің көмегімен алынған қысқа электронды шоғырлар драйвер ретінде пайдаланылуы мүмкін. Сонымен қатар, плазмадағы әртүрлі тұрақсыздықтардың дамуына байланысты одан да ұзағырақ бөлшектер шоғырлары мен лазерлік импульстар толқындардың пайда болуына әкелуі мүмкін екенін атап өткен жөн [17-18].

Оянған толқындарды және, атап айтқанда, қатты сызықты емес режимді сипаттаудың аналитикалық әдістерін әзірлеу үлкен қызығушылық тудырады. Әртүрлі теориялық тәсілдер ең қарапайым феноменологиялық модельдерді жасауға әкелді [19], плазмалық қуыстың тамаша сфералық пішінін қабылдайды; күшті сызықты емес режимдегі құбылыстарды ішінара сипаттайтын сапалық модельдер [20], ұқсастық теориялары [21-22], бұл осы режимде жалпы заңдылықтарды орнатуға мүмкіндік береді. Негізгі жетістіктердің бірі қарапайым

дифференциалдық теңдеуді пайдалана отырып, біртекті плазмадағы плазмалық қуыс шекарасының пішінін оған жеделдетілген электрондар шоғырының әрекетін ескере отырып сипаттауға мүмкіндік беретін феноменологиялық модельді құру болды. 23–24]. Дегенмен, бұл режимнің өзіндік дәйекті теориясы әлі жоқ. Сонымен қатар, алдыңғы теориялық жұмыстар негізінен біртекті плазма жағдайын қарастырды. Арналары бар плазмадағы ояту толқынының бар теориялық модельдері квазисызықты толқын жағдайына сәйкес келеді, бірақ қатты сызықты емес жағдай үшін мұндай модельдер жоқ. Бұл жұмыстың едәуір бөлігі көлденең біртекті еместігі бар плазмадағы күшті сызықты емес ояту толқыны теориясындамытуға арналған.

### Қолданылған әдебиеттер тізімі

1. Wangler T. P. RF Linear accelerators. — John Wiley & Sons, 2008.
2. Handbook of accelerator physics and engineering / A. W. Chao [et al.]. — Worldscientific, 2013. — DOI: 10.1142/8543. Multipactor discharge on metals and dielectrics: Historical review and recent theories / R. A. Kishek [et al.] // Phys. Plasmas. — 1998. — Vol. 5, no. 5. — P. 2120–2126. — DOI: 10.1063/1.872883.
3. Assmann R., Lamont M., Myers S. A brief history of the LEP collider // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) — 2002. — Vol. 109, no. 2/3. — P. 17–31. — DOI: 10.1016/S0920-5632(02)90005-8.
4. The Stanford linear accelerator polarized electron source / R. Alley [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 1995. — Vol. 365, no. 1. — P. 1–27.
5. SLAC National Acceleration Laboratory, <https://www6.slac.stanford.edu/>.
6. The International Linear Collider Technical Design Report-Volume 1: Executive Summary / T. Behnke [et al.]. — 2013. — arXiv: 1306.6327 [physics.acc-ph].
7. International Linear Collider, <http://www.linearcollider.org/ILC>.
8. Overview of plasma-based accelerator concepts / E. Esarey [et al.] // IEEE Trans. Plasma Sci. — 1996. — Vol. 24, no. 2. — P. 252–288. — DOI: 10.1109/27.509991.
9. Esarey E., Schroeder C. B., Leemans W. P. Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators // Rev. Mod. Phys. — 2009. — Vol. 81, no. 3. — P. 1229–1285. — DOI: 10.1103/RevModPhys.81.1229.
10. Hooker S. M. Developments in laser-driven plasma accelerators // Nature Photon. — 2013. — Vol. 7. — P. 775–782. — DOI: 10.1038/nphoton.2013.234.
11. Костюков И. Ю., Пухов А. М. Плазменные методы ускорения электронов: современное состояние и перспективы // УФН. — 2015. — Т. 185, № 1. — С. 89–96. — DOI: 10.3367/UFNr.0185.201501g.0089.
12. Dawson J. M. Nonlinear Electron Oscillations in a Cold Plasma // Phys. Rev. — 1959. — Vol. 113, issue 2. — P. 383–387. — DOI: 10.1103/PhysRev.113.383. 134
13. Fainberg Ya. B. // Proc. CERN Symp. on High-Energy Accelerators and Pion Physics. — 1956. — P. 84–90.
14. Acceleration of Electrons by the Interaction of a Bunched Electron Beam with a Plasma / P. Chen [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 1985. — Vol. 54, issue 7. — P. 693–696. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.54.693.
15. Experimental observation of plasma wake-field acceleration / J. B. Rosenzweig [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 1988. — Vol. 61, no. 1. — P. 98. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.61.98.
16. Proton-driven plasma-wakefield acceleration / A. Caldwell [et al.] // Nature Phys. — 2009. — Vol. 5, no. 5. — P. 363. — DOI: 10.1038/nphys1248.
17. Demonstration of a positron beam-driven hollow channel plasma wakefield accelerator / S. Gessner [et al.] // Nature Commun. — 2016. — Vol. 7. — P. 11785. — DOI: 10.1038/ncomms11785.
18. AWAKE, The Advanced Proton Driven Plasma Wakefield Acceleration Experiment at CERN / E. Gschwendtner [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2016. — Vol. 829. — P. 76–82. — DOI: 10.1016/j.nima.2016.02.026.
19. Tajima T., Dawson J. M. Laser electron accelerator // Phys. Rev. Lett. — 1979. — Vol. 43, no. 4. — P. 267. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.43.267.

20. Strickland D., Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses // Opt. Commun. — 1985. — Vol. 55, no. 6. — P. 447–449. — DOI: 10.1016/0030-4018(85)901-8.
21. Dubietis A., Jonušauskas G., Piskarskas A. Powerful femtosecond pulse generation bychirped and stretched pulse parametric amplification in BBO crystal // Opt. Commun. — 1992. — Vol. 88, no. 4. — P. 437–440. — DOI: 10.1016/0030-4018(92) 90070-8.
22. The prospects for ultrashort pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplifiers / I. N. Ross [et al.] // Opt. Commun. — 1997. — Vol.144, no. 1. — P. 125–133. — DOI: 10.1016/S0030-4018(97)00399-4.
23. Woodward P. M. A method of calculating the field over a plane aperture required to produce a given polar diagram // J. Inst. Electr. Eng. Part IIIA. — 1946. — Vol. 93, no. 10. — P. 1554–1558. — DOI: 10.1049/ji-3a-1.1946.0262