

АВТОРСКА СПРАВКА ЗА НАУЧНИ ПРИНОСИ

на гл. ас. д-р Камен Козарев,
ИА с НАО, БАН

Конкурс за заемане на академична длъжност „доцент“ в ИА с НАО по темата „Ускоряване на високоенергитични заредени частици от слънчеви коронални ударни вълни и разпространението им в хелиосферата – числено моделиране, базирано на дистанционни наблюдения“

Короналните изхвърляния на маса (Coronal Mass Ejections – CME), едно от най-енергитичните проявления на слънчевата активност, са комплексни събития, съпътствани от множество свързани феномени върху слънчевата повърхност, в слънчевата атмосфера (короната), както и в междупланетното пространство. Те започват с внезапно активиране на глобални плазмено-магнитни структури, и са съпроводени с превръщане на големи количества магнитна енергия в електромагнитна радиация и кинетична енергия. Теоретични и симулационни изследвания показват, че тези грандиозни избухвания са основна част от звездната активност изобщо, и допринасят за структурата и динамиката в звездните астросфери.

CME се формират напълно в слънчевата корона и често биват ускорени до скорости надвишаващи местните магнитозвукови скорости. По този начин, CME могат да причинят ударни вълни при напускането си на слънчевата атмосфера към междупланетното пространство. Тези магнетизирани ударни вълни, от своя страна, ускоряват йони и електрони до енергии няколко порядъка по-високи от термалния пик на разпределението на короналната плазма, създавайки т. нар. слънчеви високоенергитични частици (Solar Energetic Particles – SEP). SEP са едно от основните проявления на краткотрайната слънчева активност, а изучаването им е от голямо значение както за по-доброто разбиране на междупланетното и околопланетните пространства, така и за човешкото изследване на космоса.

Д-р Козарев участва активно в разработването и експлоатирането на специализирана софтуерна система за числено моделиране на космическата радиация в глобалната хелиосфера от слънцето до Марс и отвъд. Системата, наречена Earth-Moon-Mars Radiation Environment Module (EMMREM), създава модели на дозите радиация от високоенергитични слънчеви частици и космически лъчи на различни локации в хелиосферата, за различни човешки органи, и зад различни видове защитни материали, симулиращи скафандри и космически кораби. В основата на цялата система е модерен, гъвкав и стабилен триизмерен модел за изучаването на глобалното разпространение на SEP едновременно по време на големи слънчеви бури, който може да бъде използван както за научни изследвания, така и за предвиждане на космическото време. Моделът Energetic Particle Radiation Environment Module (EPREM; Schwadron et al. 2010, Kozarev et al. 2010) е паралелизиран числен кинетичен код за глобалното ускорение и разпространение на високоенергитични слънчеви заредени частици в хелиосферата. Моделът решава уравнения за ускорение и транспортирането на разпределение на протони успоредно и перпендикулярно на магнитното поле, в зависимост от ъгъла на орбитален наклон на частиците спрямо магнитното поле, скорост, време, както и

позиция. EPREM може да бъде използван в широк диапазон от енергии и видове йони, и бе верифициран спрямо предвижданията на теорията.

Първоначално, моделът беше използван за изучаване разпространението на потоците SEP отвъд 1 AU (Kozarev et al. 2010, Dayeh et al. 2010) при големи слънчеви избухвания, използвайки in situ наблюдения близо до Земята. При тези изследвания беше установено, че резултатите от модела са близки до наблюденията на SEP в близост до Луната, Марс (1.5 а.е.) и Юпитер (5.2 а.е.) (Zeitlin et al. 2010; Schwadron et al. 2012). На базата на така успешните резултати от EPREM се получиха модели на радиалните градиенти на потоците SEP в междупланетното пространство от Земята до Юпитер, които са ценни за определяне на радиационните дози за астронавти и електроника при междупланетни космически мисии (Pourarsalan et al. 2010, 2011). Оценен беше и риска за развитие на лъчева болест и ракови заболявания при астронавтите, ако бъдат изложени на подобни големи SEP събития (Cucinotta et al. 2010). Беше моделирано и въздействието на такива събития върху йоносферата на Марс (Sheel et al. 2012), което показва че те предизвикват значително увеличение на йоносферната плътност.

Следващата стъпка беше да се изучи ускорението на SEP в близост до Слънцето, което предизвиква техните потоци наблюдавани из междупланетното пространство. Преобладаващото виждане до преди 10 години бе, че те биват ускорявани или от слънчеви избухвания в бяла светлина много ниско в слънчевата корона (до 1.1 слънчеви радиуса от центъра на Слънцето), или от коронални изхвърляния на маса във високата корона и междупланетното пространство (над 8 слънчеви радиуса). Наши и други скорошни изследвания обаче показват, че магнетизирани глобални ударни вълни могат да се образуват в цялата ниска и средна корона (1.1-8 слънчеви радиуса), и да са ефикасни ускорители на заредени частици, бидейки основен източник на потоците високоенергитични частици, наблюдавани в междупланетното пространство. Комбинирайки модела EPREM с водещи триизмерни магнитохидродинамични модели на слънчеви изригвания, успяхме да симулираме за пръв път в детайли развитието на големи CME близо до Слънцето, и как те въздействат на ускорението на SEP (Kozarev et al. 2013; Schwadron et al. 2014, 2015). **Показахме, че при големи CME, дори в началните стадии, когато те са по-близо от 8 слънчеви радиуса, се ускоряват големи потоци SEP до енергии над 1000 MeV. Освен това установихме, че градиентите на плътностите в голямо-машабните структури на слънчевата корона модулират ускорението на частиците. Същото се отнася и до областите с рязка промяна в скоростите между ударните вълни и зараждащия се слънчев вятър. С това допринесохме за налагане на новата идея, че ускорението на SEP може да се предизвика 1) основно от ударни вълни, предизвиквани от CME и 2) да се случва много по-близо до Слънцето, отколкото бе смятано преди. Нашата работа показва и, че ударните вълни на CME предизвикват различно по ефикасност ускорение на SEP в различните си области и във времето, което се дължи на променящите се условия в короната. Това може да се случи само близо до Слънцето, където динамиката на короналните структури е най-добре различима.**

Освен числените модели на ускорение на SEP, д-р Козарев работи върху наблюдателно изследване на феномени свързани с ударни вълни в ниската корона. Ултравioletови и радио наблюдения в последните 20 години сочат, че често при слънчеви изригвания се наблюдават съпътстващи голямо-машабни фронтове в слънчевата корона, както и типични за ударни вълни радио излъчвания. Тези изследвания показват, че подобни ударни вълни, способни да ускорят SEP могат да се формират дори само на 0.2 слънчеви радиуса от слънчевата повърхност. **Използвайки**

дистанционни наблюдения с висока времева и пространствена резолюция в далечния ултравиолет на слънчеви изригвания направени с телескопа **Advanced Imaging Assembly (AIA)**, част от орбиталната обсерватория **Solar Dynamics Observatory (SDO)**, ние изследвахме над **10** различни ултравиолетови вълни, разкривайки кинематичните и морфологичните им свойства (Kozarev et al. 2011, 2015, 2017). Успяхме да определим силата на тези компресивни фронтове чрез моделиране на плътностите на плазмата базирано на наблюденията, и да установим едновременно наличие на ударни вълни на короналните височини на фронтовете, използвайки радио наблюдения на т. нар. радио избухвания от 2-ри тип. На базата на тези резултати успяхме да потвърдим, че в голямата си част короналните фронтове свързани с СМЕ са слаби ударни вълни. За да изпълним тези задачи, създадохме специализираната софтуерна система **Coronal Analysis of SHock and Waves (CASHeW)**; Kozarev et al. 2017) за характеризиране на короналните ударни вълни чрез комбинация от наблюдения и модели на короната базирани на наблюдения.

Ранното детектиране, характеризиране, и предвиждане на първоначалното ускорение и хелиосферно разпространение на СМЕ и SEP е от важно значение за хелиофизиката и междупланетните изследвания. Периодът между началото на слънчево изригване и стигането на първите значителни потоци SEP с вредни енергии до разстоянието на земната орбита е няколко часа, което често е много кратко време за да бъдат предупредени астронавтите и сателитните оператори. По тази причина една от важните приложни цели на хелиофизиката е разработването на оперативни възможности за оценка и предвиждане на междупланетните SEP потоци и СМЕ динамика колкото може по-рано след началото на изригването на Слънцето.

След като показахме с наблюдения, че едромасщабни ударни вълни свързани със слънчеви изригвания могат да се обособят много ниско в короната скоро след началото на изригванията, следващата цел беше да проверим дали те могат да ускоряват частици в началните си стадии, и как се разпространяват. **Комбинирани с модели на короналното магнитно поле, температура, и плътност, наблюденията ни позволяват да се определят в детайли силата и способността на ударните вълни ниско в короната да ускоряват значими потоци от протони и йони до енергии поголеми от 1 MeV чрез механизма на дифузионното ускорение на частици.** За тази цел, разработихме и приложихме аналитичен модел на ускорение в ударни вълни (Kozarev & Schwadron 2016; Kozarev et al. 2019), захранен от дистанционни наблюдения на ударни вълни между 1.1 и 1.5 слънчеви радиуса. Изследвайки **10** ударни вълни, успяхме да покажем, че при някои от тях протони могат да се ускорят до над **50 MeV** енергии само в първите **10** минути на изригването, докато при други не следва значително увеличаване на енергиите на моделираните частици. Освен това установихме, че взаимодействието на ударните вълни с короналните магнитни полета модулира динамично хелиографските ширини и дължини на разпространение на високоенергитичните частици в слънчевата система. Тази работа показва значителен потенциал за ранно прогнозиране на SEP при слънчеви изригвания.

Следващите стъпки в работата на д-р Козарев са 1) да се разшири областта на наблюдения и характеризиране на ударните вълни до 6 слънчеви радиуса, като се използват коронографски наблюдения; 2) да се моделира ускорението на потоци частици от ударните вълни от ниската до средната корона, и 3) да се симулира разпространението им до околоземна орбита и други точки на хелиосферата (използвайки моделът EPREM), където да бъдат сравнени с in situ наблюдения. За целта

ще бъде разработена и тествана иновативна верига от аналитични и числени симулации базирани на телескопични наблюдения на слънчевата корона.

Цитирани работи:

- F. A. Cucinotta et al.** “Space radiation risk limits and Earth-Moon-Mars environmental models.” 2010, *J. Space Weather*, 8, 9
- M. A. Dayeh et al.** “Modeling proton intensity gradients and radiation dose equivalents in the inner heliosphere using EMMREM: May 2003 solar events.” 2010, *J. Space Weather*, 8, 7
- K. A. Kozarev et al.** “Modeling the 2003 Halloween events with EMMREM: Energetic particles, radial gradients, and coupling to MHD.” 2010, *J. Space Weather*, 8, 8
- K. A. Kozarev et al.** “Off-limb Solar Coronal Wavefronts From SDO/AIA EUV Observations – Implications For Particle Production.” 2011, *Astrophys. J. Lett.*, 733, 25
- K. A. Kozarev et al.** “Global Numerical Modeling of Energetic Proton Acceleration in a CME Traveling Through the Solar Corona.” 2013, *Astrophys. J.*, 778, 43
- K. A. Kozarev et al.** “Properties of a Coronal Shock Wave as A Driver of Early SEP Acceleration”, 2015, *Astrophys. J.*, 799, 167
- K. A. Kozarev, N. A. Schwadron.** “A Data-Driven Analytic Model for Proton Acceleration by Large-Scale Solar Coronal Shocks”, 2016, *Astrophys. J.*, 831, 120
- K. A. Kozarev, M. A. Dayeh, A. Farahat.** “Early-Stage SEP Acceleration by CME-Driven Shocks with Realistic Seed Spectra: I. Low corona”, 2019, *Astrophys. J.*, 871, 1
- M. PourArsalan et al.** “Estimates of Radiation Exposures for Human Crews in Deep Space from the January 15, 2005, Solar Energetic Particle Event Using the Earth-Moon-Mars Radiation Environment Module.” 2011, *Nuclear Technology*, 175:1, 202-209
- M. PourArsalan et al.** “Time-dependent estimates of organ dose and dose equivalent rates for human crews in deep space from the 26 October 2003 solar energetic particle event (Halloween event) using the Earth-Moon-Mars Radiation Environment Module.” 2010, *J. Space Weather*, 8, 5
- N. A. Schwadron et al.** “Galactic cosmic ray radiation hazard in the unusual extended solar minimum between solar cycles 23 and 24.” 2010, *J. Space Weather*, 8, 4
- N. A. Schwadron et al.** “Earth-Moon-Mars Radiation Environment Module framework.” 2010, *J. Space Weather*, 8, 2
- N. A. Schwadron et al.** “Lunar radiation environment and space weathering from the Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation (CRaTER).” 2012, *J. Geophys. Res.*, Volume 117, CiteID E00H13
- N. A. Schwadron et al.** “Synthesis of 3-D Coronal-Solar Wind Energetic Particle Acceleration Modules’, 2014, *J. Space Weather*, 12, 6
- N. A. Schwadron et al.** “Particle Acceleration at Low Coronal Compression Regions and Shocks”, 2015, *Astrophys. J.*, 810, 97
- V. Sheel et al.** “Numerical simulation of the effects of a solar energetic particle event on the ionosphere of Mars”, 2012, *J. Geophys. Res.*, 117, 05312
- C. Zeitlin et al.** “Mars Odyssey measurements of galactic cosmic rays and solar particles in Mars orbit, 2002-2008.” 2010, *J. Space Weather*, 8, 6