

РЕЗУЛТАТИ ОТ СПЕКТРАЛНИ И ФОТОМЕТРИЧНИ НАБЛЮДЕНИЯ НА ВЪТРЕШНАТА КОРОНА НА СЛЪНЦЕТО ПО ВРЕМЕ НА ПЪЛНОТО СЛЪНЧЕВО ЗАТЪМНЕНИЕ НА 02 ЮЛИ 2019 Г. В АРЖЕНТИНА

Пенка Стоева¹, Алексей Стоев¹, Сергей Кузин², Бешир Марзук³, Андрей Перцов²,
Мохамед Семеида³

¹Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките

²Физически институт "Лебедев" – Руска академия на науките

³Национален изследователски институт по астрономия и геофизика – Кайро, Египет
e-mail: penm@abv.bg, kuzin@mail1.lebedev.ru, bmarzoke@yahoo.com

Ключови думи: Бяла и монохроматична корона, пълно слънчево затъмнение

Резюме: В работата показваме основните резултати, получени по време на наблюдение на пълното слънчево затъмнение на 2 юли 2019 г., преминало по територията на Тихия океан, Чили и Аржентина. Специалистите на Института за Космически Изследвания и Технологии, БАН и Астрономическата Обсерватория "Юрий Гагарин", гр. Стара Загора, организирали експедиция в гр. Кинес, Република Аржентина са част от Международен изследователски екип, който включва учени от Франция (Институт по астрофизика, Париж), Русия (Физически институт „Лебедев“, Москва) и Египет (Институт по астрономия и геофизика, Хелуан). Изследвани са бялата и монохроматична корона на слънцето в зелената линия на 14-кратно йонизираното желязо (Fe XIV - 5303 Å), осветеността на небето и динамиката на основните микрометеорологични параметри на приземния атмосферен слой.

RESULTS OF SPECTRAL AND PHOTOMETRIC OBSERVATIONS OF THE INNER SOLAR CORONA DURING THE JULY 2, 2019 TOTAL SOLAR ECLIPSE IN ARGENTINA

Penka Stoeva¹, Alexey Stoev¹, Sergey Kuzin², Beshir Marzouk³, Andrey Pertsov²,
Mohamed Semeida³

¹Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences

²Lebedev Physical Institute – Russian Academy of Sciences

³National Research Institute of Astronomy and Geophysics - Helwan, Cairo, Egypt
e-mail: penm@abv.bg, kuzin@mail1.lebedev.ru, bmarzoke@yahoo.com

Keywords: White light and monochromatic corona, total solar eclipse

Abstract: In this paper, we show the main results obtained during the observation of the total solar eclipse on July 2, 2019, transiting the Pacific, Chile and Argentina. Specialists from the Space Research and Technology Institute, BAS and the Astronomical Observatory "Yuri Gagarin", Stara Zagora, who organized an expedition to the city of Quines, Republic of Argentina are part of an International research team that includes scientists from France (Institute of Astrophysics), Russia (Lebedev Physical Institute, Moscow) and Egypt (National Research Institute of Astronomy and Geophysics, Helwan, Cairo, Egypt). The white light and monochromatic corona of the sun in the green line (Fe XIV - 5303 Å), the illumination of the sky, and the dynamics of the basic micrometeorological parameters of the ground atmospheric layer were investigated.

Въведение

Все още се счита, че слънчевите затъмнения дават уникална възможност за изследване на вътрешната корона на слънцето, която е най-важна от гледна точка на физиката на слънцето и слънчево-земните връзки. Избухването на слънчева маса и ускорението на слънчевия вятър стават в нейната най-вътрешна част, която е трудна за наблюдение и изследване.

Короната в бялата светлина е резултат от разсейване на светлината от фотосферата от електроните в короната и праха в междупланетното пространство. Орбиталните хелиосферни обсерватории SoHO и STEREO, както и спътниците Yohkoh, TRACE и CORONAS дават възможност за непрекъснато изследване на слънчевата корона и действащите там процеси, но те са по-близо до Земята отколкото Луната и закриват слънцето, изпускайки от погледа си точно вътрешната корона.

Висококачествените изображения на бялата корона по време на затъмнение, обработени с компютър ни позволяват да различим малко-машабни структури, около 5 дъгови секунди или по-малко, контрастът между които е много малък и се губи при стандартни експозиции [1, 2]. Формата на короната, със стримерите и полярните лъчи, управлявани от короналното магнитно поле варира с цикъла на слънчевата активност и може да се прогнозира с пресмятания на основата на наблюдаваните повърхнинни магнитни полета [3].

Изследването на емисионните линии на йони с различна степен на йонизация позволява измерването на температурите, нетермалните скорости, доплеровите отмествания, необходими за изясняване на механизмите на нагряване на короната и произхода на потоците, водещи до слънчевия вятър.



Фиг. 1. Линията на тоталитета в Република Аржентина

На 2 юли 2019 г. по територията на Тихия океан, Чили и Аржентина премина сянката на единственото през 2019 г. пълно слънчево затъмнение. Частичната фаза започна в 16:29 местно време, пълната фаза бе от 17:41 до 17:43 мстно време, а продължителността на пълното слънчево затъмнение - 2m 18s.

За наблюдението на затъмнението специално бе организирана експедиция до град Кинес, Сан Луис, Аржентина, разположен в линията на тоталитета (Фиг. 1). Мястото бе избрано поради прогнозите за отлична метеорологична обстановка - прозрачна атмосфера и липса на облаци.

Географските координати на площадката за наблюдение между градовете Кинес и Канделария са:

Географска ширина $\varphi = 32^{\circ} 12' 00.9''$ S
 Географска дължина $\lambda = 65^{\circ} 48' 59.9''$ W
 Надморска височина $h = 471\text{m} \pm 9\text{m}$

Международният изследователски екип включва учени от България (Института за Космически Изследвания и Технологии, БАН и Астрономическата Обсерватория "Юрий Гагарин", гр. Стара Загора), Франция (Институт по Астрофизика, Париж), Русия (Физически институт „Лебедев“, Москва) и Египет (Национален Изследователски Институт по Астрономия и геофизика, Хелуан, Кайро).

Затъмнението бе специално по няколко причини: Първо, то протича в период на много ниска слънчева активност - все още не е достигнат минимума на низходящия склон на Цикъл 24. Освен това, в линията на тоталитета се оказват главните обсерватории за астрономически изследвания - Американската обсерватория Серо Тололо, Джемани юг и Европейската Южна Обсерватория Ла Сила (Cerro Tololo Inter-American Observatory, Gemini South, European Southern Observatory's La Silla Observatory). Френският екип под ръководството на проф. Серж Кучми, по време на затъмнението направи измервания на силната зелена емисионна линия на 14-кратно йонизираното желязо FeXIV 5303 Å в избрани области от вътрешната слънчева корона със спектрограф с висока резолюция, монтиран на новия технологичен телескоп в Ла Сила (La Silla NTT - New Technology Telescope) с диаметър на огледалото 3.6 m.



Фиг. 2. Апаратура за наблюдение на пълното слънчево затъмнение на 2 юли 2019 г., разположена до памучните полета между градовете Кинес и Канделария, Сан Луис, Аржентина

Друга особеност на това затъмнение е това, че по време на много ниска слънчева активност короната е силно изтеглена и подробно могат да се изучат полярните лъчи, иначе скрити в големите коронални структури по време на максимум в активността на слънцето.

Нещо, което затруднява наблюдението е това, че затъмнението започва в късните следобедни часове и слънцето и луната са близо до хоризонта, където атмосферата е по-плътна.

Нашата програма подължава изследванията на структурата и динамиката на бялата и монохроматична корона в зелената линия на 14-кратно йонизираното желязо ($\text{Fe XIV} - 5303 \text{ \AA}$), осветеността на небето, динамиката на основните микрометеорологични параметри на приземния атмосферен слой и оптичните ефекти. Особено интересна за нас е формата на короната, която се изменя в хода на цикъла на слънчевата активност и се характеризира с индекса на сплеснатост (елиптичност) на слънчевата корона (коефициента на Лудендорф). Спаснатостта е по-голяма по време на слънчев минимум и индексите от затъмненията през 2017, 2019 и 2020 могат да послужат за прогноза за силата на идващия 25-ти слънчев цикъл, който следва низходящия склон на наскоро изминалия цикъл и неговите два предшественика - 22-ри и 23-ти [4, 5, 6, 7, 8].

Наблюдения и методи на изследване

За фотографии на короната на слънцето в бяла светлина бе използван фотоапарат Canon 700D с 300 mm обектив и неутрален филтър. Монохроматична корона е изследвана в емисионната линия на $\text{Fe XIV} - 5303 \text{ \AA}$ (зелена коронална линия). Фотографиите са направени с фотоапарат Canon 80D с 600 mm обектив и 5303 \AA интерференчен филтър с полуширина $\text{FWHM} = 10 \text{ \AA}$ (Фиг. 2). Осветеността на небето е измерена с фотометър LUX Pu 150. Динамиката на температурата и влажността на приземния атмосферен слой по време на затъмнението са измерени с термометър - хигрометър TA218C.

Резултати

Короната на слънцето в бяла светлина

Както е известно, бялата корона - разсеяната от свободни електрони (разсейване на Томсън) светлина на фотосферата е много добър индикатор за магнитните полета на Слънцето, които генерират различни структури на слънчевата корона като каскадни стримери, примки, коронални дупки, полярни лъчи и др., с различен размер и яркост. На фиг. 3 се вижда короната в бяла светлина, с елиптична форма, типична за слънчев минимум. Полярните лъчи

са ясно изразени в северната и южна хемисфера. Вижда се и протуберанс в хромосферата на слънцето на средни хелиографски ширини.



Фиг. 3. Слънчевата корона в бяла светлина по време на пълното слънчево затъмнение на 2 юли 2019 г., Аржентина (Фотоапарат Canon 700D с 300 mm обектив и неутрален филтър)

Монохроматична корона

Зелената коронална линия е една от най-силните линии, излъчвани от слънчевата корона във видимия спектър. Профилът на емисиите от забранени преходи на Fe XIV (5303 Å) и Fe X (6376 Å) съдържа информация за физическите параметри, като температура, движение на масата, турбулентност. Червената корона е по-слаба от зелената в период на максимум на слънчевата активност. Двете линии добре се наблюдават в екваториалната област през 2006 г. и 2008 [10]. Те намаляват в период на слънчев минимум, но зелената линия се променя в по-голям диапазон и затова стойностите им почти се изравняват. Червената линия е разположена равномерно около лимба, а зелената - в активни региони, разположени в близост до екватора (Фиг. 4).



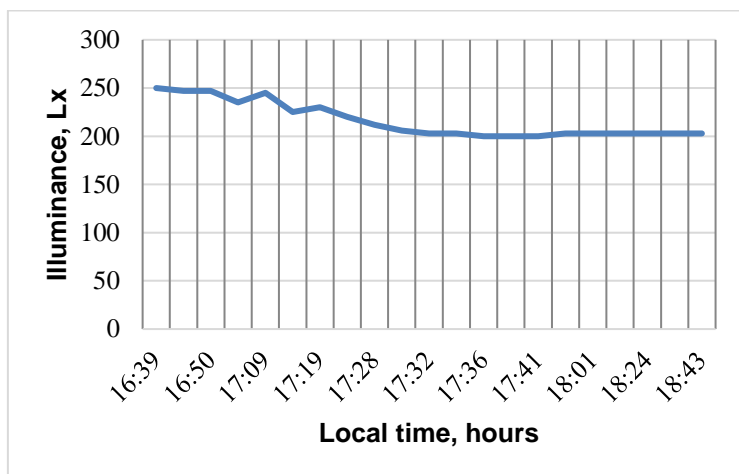
Фиг. 4. Слънчевата корона в зелена светлина (Fe XIV - 5303 Å) по време на пълното слънчево затъмнение на 2 юли 2019 г., Аржентина (Canon 80D с 600 mm обектив и 5303 Å интерференчен филтър с полуширина FWHM = 10 Å)

Механизмът на възбуждане (начините, по които атомите поглъщат енергия при сблъсък, което води до излъчване на фотони при специфични дължини на вълната) не е много добре известен, особено по отношение на относителния принос на колизионните и радиационните процеси при различни височини над слънцето (разстояния до центъра на слънцето, измерени в слънчеви радиуси R_{\odot}) и позиционни ъгли. Raju и колектив [9] изследват механизма на възбуждане от измерените съотношения между интензивностите на излъчване в линията и

континуум в различни азимут и стига до извода, че механизмът на възбуждане на доминиращата линия е сблъсък във вътрешните области короната (до около $1.4 R_{\odot}$).

Осветеност на небето

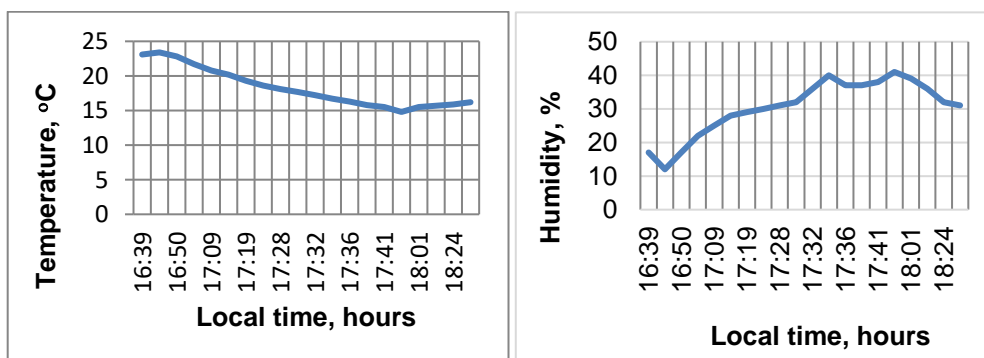
Фотометричните наблюдения на осветеността на небето в околзенитната област са проведени с фотометър LUX Pu 150. Осветеността постепенно намалява, тъй като затъмнението е в следобедните часове, преди залез. Регистрирана е минимална осветеност 5 минути преди пълната фаза - 200Lx. Три минути след това осветеността достига предишната си стойност от 203Lx и остава такава до края на измерванията (Фиг. 5).



Фиг. 5. Осветеност на небето в околзенитната област, проведени с фотометър LUX Pu 150

Реакция на приземния атмосферен слой

Минимум в температурата на въздуха по време на затъмнението (14.8°) е измерен с TA218C термометър - хидрометър, в 17:44 LT или 1 минути след края на пълната фаза (17:43 LT). Температурата спада с 8.6°C (от 23°C). С намляването на слънчевата радиация, относителната влажност на въздуха постепенно се увеличава от 17% до 41%, достигнати 1 минута след края на пълната фаза. Увеличението на влажността е 24% (Фиг. 6).



Фиг. 6. Температура и относителна влажност на въздуха по време на пълното слънчево затъмнение на 2 юли 2019г., Аржентина, измерена с термометър - хидрометър TA218C

Дискусия

И накрая - какво е бъдещето на наземните наблюдения на пълните слънчеви затъмнения? Следващата година - 2020 - слънчевият телескоп Даниел К. Иноуйе (Daniel K. Inouye Solar Telescope - DKIST) на Хавайските острови ще започне работа, позволявайки непрекъснато изследване на слънчевата корона. Той ще бъде най-големият слънчев телескоп в света, оборудван с широка гама от сензори, способни да превъзможат яркостта на слънцето и да наблюдават неговата структура и динамика. Освен това, ще бъде снабден и с адаптивна оптика за компенсиране на смущенията в земната атмосфера. Дори великолепните възможности на DKIST и надморската височина на Haleakala, обаче, не могат да се сравнят с тъмното небе по

време на пълно слънчево затъмнение. . "Така че, подробните наблюдения на вътрешната и средна корона, които се правят по време на затъмненията, ще останат уникални в обозримото бъдеще. Новият телескоп също не може да генерира широкоъгълни изображения по начина, по който по-малките телескопи могат по време на затъмненията, което позволява изучаване на най-отдалечените краища на короната. Освен това, той не може да съответства на разделителната способност на апаратурата в Слънчевата и Хелиосферната обсерватория (SoHO), която сега е в орбита около Земята", казва Джей Пасачоф, професор по астрономия в Колежа "Уилямс", САЩ [11].

Изследванията на слънцето и движението на луната по време на пълното слънчево затъмнение на 2 юли 2019 в цял свят бяха посветени на 100-годишнината на Международния Астрономически Съюз и 100-годишнината от прочутото затъмнение на 29 май 1919 г., което позволи да се провери едно от предсказанията на Общата Теория на Относителността: На 29 май 1919 г. група учени, водени от Артур Едингтън, инсталирали на остров Принс (тогава принадлежащ на Португалия, а сега част от Сао Томе и Принс, в залива на Гвинея) телескопи и камери и направили поредица от наблюдения, които осигуряват експерименталната проверка на теорията. Експедицията, заедно с тази, проведена на Собрал, Бразилия, се счита за най-голямото постижение на науката през 20-ти век. Сравнявайки позициите на звездите в звездния куп на Хиади по време на затъмнението с тези, определени по-рано, гравитационното отклонение от 1,75 дъгови секунди, предвидено от теорията на относителността на Алберт Айнщайн, е потвърдено!

Благодарности

Експедицията за наблюдение на пълното слънчево затъмнение на 2 юли 2019 г. бе подкрепена от ИКИТ, БАН, Община Стара Загора, Фирма "Скай тур", Стара Загора, Фирма "Актив", Стара Загора, Фирма "Ексбит", Стара Загора, Фирма "Фотосинтезис", София и Астрономическа Асоциация, София.

Литература:

1. Koutchmy, O., Koutchmy, S., Nitschelm, C. H., Sýkora, J., and Smartt, R.N. "Image processing of coronal pictures," in *Solar and Stellar Coronal Structure and Dynamics; A Festschrift in Honor of Dr. John, W. Evans*, eds R. C. Altrock (Nat. Solar Observatory/Sacramento Peak, Sunspot, N. M.), 1988, pp. 256–266.
2. Druckmüller, M., Rušin, V., and Minarovjech, M. A new numerical method of total solar eclipse photography processing. *Contr. Astron. Obs. Skalnaté lesy* 36, 2006, pp. 131–148.
3. Pasachoff, J. M. Science at the Great American Eclipse. *Astron. Geophys. Roy. Astron. Soc.* 59, 4.19–4.23. doi: 10.1093/astrogeo/aty191, 2018.
4. Stoev, A., Y. Shopov, P. Muglova, N. Kiskinova, Yu. Varbanova, Zl. Michaylova, R. Velkov, "Structure of the solar corona during the 1999 total solar eclipse", In *First Results of 1999 Total Solar Eclipse Observations*, Edited by D.N. Mishev and K.J.H. Phillips, Professor Marin Drinov Publishing House, Sofia, 2002, pp. 143–150.
5. Stoev, Alexey D., Penka V. Stoeva, Nadya Kiskinova, and Nikolay Stoyanov, Evolution of the basic micrometeorological parameters during the total solar eclipse of 29 March 2006 at Manavgat, Turkey, Fourteenth International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics / Atmospheric Physics, 24 - 30 June 2007, Buryatia, Russia, Gennadi G. Matvienko and Victor A. Banakh Editors, Proceedings of SPIE, Atmosphere Physics, ISSN 0277-786X, Vol. 6936, 2008, pp. 517–521.
6. Stoeva, P., A. Stoev, S. Kuzin, Y. Shopov, N. Kiskinova, N. Stoyanov, A. Pertsov, "Investigation of the white light coronal structure during the total solar eclipse on March 29, 2006", International Symposium on Recent Observations and Simulations of the Sun-Earth System, Varna, Bulgaria, 17 – 22 September 2006, doi:10.1016/j.jastp.2007.08.051, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* v. 70, 2008, pp. 414–419
7. Stoeva, P., A. Stoev, S. Kuzin, "White light corona at different phases of the solar cycle", *Sun and Geosphere*, 6(1), ISSN 1819-0839, 2011, pp. 33–35.
8. Stoeva, Penka, Alexey Stoev, Influence of the solar activity on cave air temperature regimes, 41st Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", March 12-16, 2018, Apatity, Russia, Proceedings of the 41st Annual Seminar, <http://pgia.ru/seminar>, 2018, pp. 168–171.
9. Raju, K., Desai J., Chandrasekhar T. and Ahsok N. The excitation mechanism of Fe XIV 5303 Å line in the inner regions of the solar corona, *J. Astrophys. Astr.*, 12, 1991, pp. 311–317.
10. Voulgaris, A., Athanasiadis, T., Seiradakis, J.H. et al., A comparison of the red and green coronal line intensities at the 29 March 2006 and the 1 August 2008 total solar eclipses: considerations of the temperature of the solar corona, *Sol Phys* (2010) 264: 45. <https://doi.org/10.1007/s11207-010-9575-7>.
11. Adams, Eric, Science, 07.01.2019 09:12 PM, <https://www.wired.com/story/the-blazing-science-of-this-years-total-solar-eclipse/>.