

SENS ' 2 0 0 6

Second Scientific Conference with International Participation
SPACE, ECOLOGY, NANOTECHNOLOGY, SAFETY

14 – 16 June 2006, Varna, Bulgaria

GALACTIC AND LOW-ENERGY ANOMALOUS COSMIC RAY TRANSPORT IN THE HELIOSPHERE: A BRIEF REVIEW

M. Buchvarova¹, P.I.Y. Velinov²

¹Space Research Institute, BAS, 6 Moskovska Str., Sofia 1000, Bulgaria, marusjab@space.bas.bg

² Solar-Terrestrial Influences Laboratory, Bulgarian Academy of sciences, Sofia, Bulgaria,

pvelinov@bas.bg

Keywords: Heliosphere, Cosmic Ray Transport, Galactic and Anomalous Cosmic Rays

Abstract. The modulation of galactic cosmic rays in the heliosphere is dominated by four major mechanisms: convection, diffusion, drifts and adiabatic energy losses. The four mechanisms are well understood individually, but in combination, the complexity increases significantly. As galactic and anomalous cosmic rays are propagated into the quiet heliosphere, their intensity is decreased due in part to their energy change as they drift and diffuse into the heliosphere. Particle transport during high solar activity is much less understood. Various transient events form outward moving barriers that cause depressions in the level of cosmic rays [1].

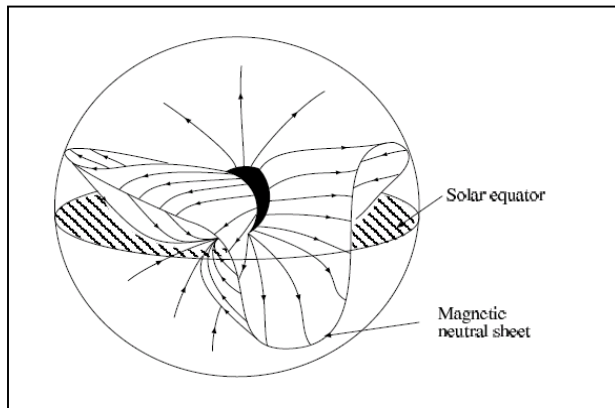
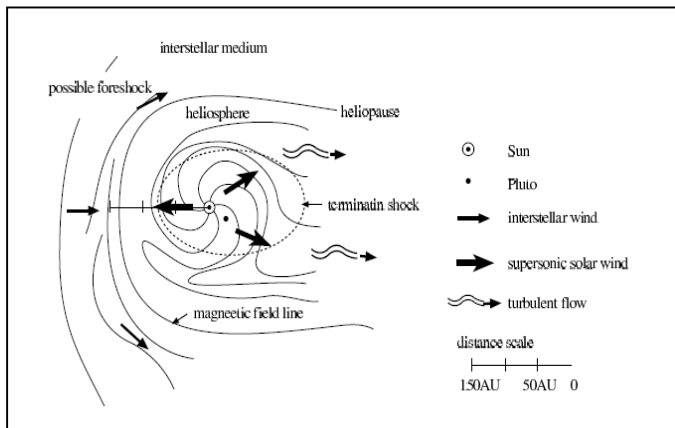
1. Въведение

Хелиосферата е областта, която включва нашата Слънчева система, слънчевия вятър и междупланетното магнитно поле. Тя се разширява извън орбитата на Плутон. На Фиг. 1 е дадена схема на хелиосферата.

Електрическите токове на Слънцето генерират сложно магнитно поле, което се пренася в междупланетното пространство и формира междупланетно магнитно поле. Тъй като магнитното поле е ориентирано навън от Слънцето в едната полусфера и навътре в другата, това води до противоположни посоки на полето. Тънкия слой между полетата с различна ориентация се описва като неутрален токов слой (NCS - neutral current sheet). Слънчевата ротация навива магнитното поле в ротационна спирала, т.н. Паркерова спирала. На всеки ~ 11 години магнитното поле на Слънцето се обръща – северния магнитен полюс става южен и обратно. Тази смяна на полярността се наблюдава при слънчев максимум, като процеса отнема от няколко месеца до година.

Слънчевият цикъл обикновено се представя със среден месечен брой на слънчевите петна. Слънчевата активност нараства от своя минимум към своя максимум относително бързо в продължение на 3-4 години. Активността остава пикова за относително една година, преди по-бавното връщане към спокойни условия. Близко

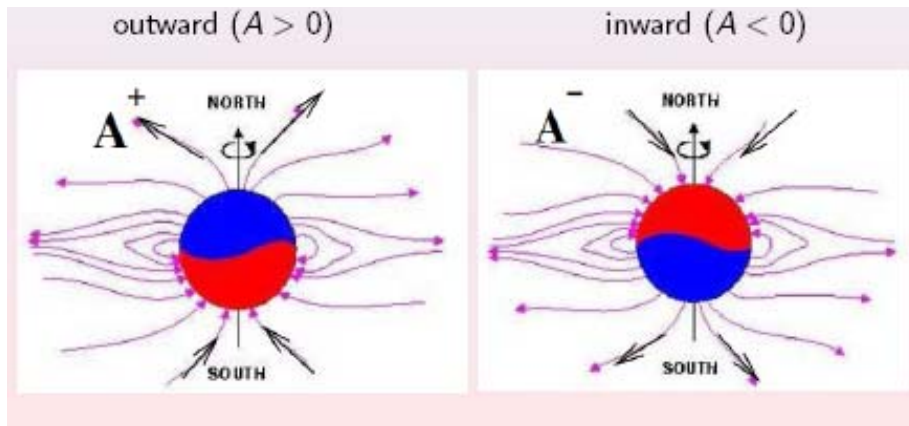
до слънчев максимум полето става много сложно и неутралният токов слой може да се простре почти до полюсите за кратки периоди. По този начин имаме естествено 22 - годишно слънчево явление. Ориентацията на полето обръща своята полярност и е положителна, означена с $A > 0$, когато полето е ориентирано навън в северната полусфера на Слънцето и съответно отрицателна, означена с $A < 0$, когато полето е ориентирано навътре в северната полусфера на Слънцето.



Фиг. 1. Схема на хелиосферата

Фиг. 2. Неутрален токов слой, формиран от слънчевия вятър

На Фиг.2 се вижда защо неутралният токов слой е често наричан "ballerina skirt". При минимална слънчева активност неутралния слой е относително равнинен, но с нарастване на слънчевата активност става по-вълнист, разширявайки се към по-високи и все по-високи ширини [2]. На Фиг. 3 е дадено изображението на междупланетното магнитно поле за цикли $A > 0$ (ляво) и $A < 0$ (дясно).



Фиг.3. Изображение на междупланетното магнитно поле. Ляво: цикъл $A > 0$ с положителна полярност на полето. Дясно: магнитното поле при отрицателната магнитна фаза $A < 0$.

2. Компоненти на модулацията

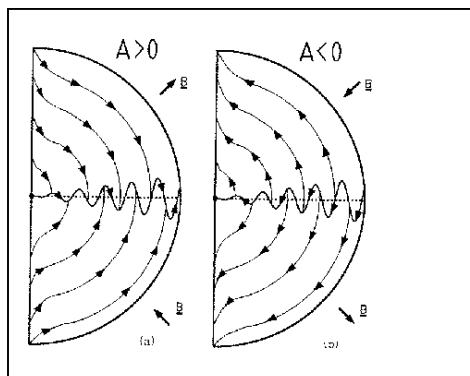
Енергетичният спектър на космическите лъчи следва степенен закон в широка област от енергии над около 100 GeV и е резултат от Ферми механизъм на ускорение. Структурата на спектъра под 100 GeV се дължи на влиянието на хелиосферата. Като

допълнение към спектъра на галактическите космически лъчи, които навлизат в хелиосферата от междузвездното пространство, е аномалната компонента. Важно е да се отбележи, че частиците на аномалната компонента, която се наблюдава в областта до 100 MeV, са ускорени до енергиите на космическите лъчи в нашата хелиосфера [3].

Смята се, че плътността на космическите лъчи извън хелиосферата е почти изотропна. Космическите частици преминават хелиосферните граници в резултат на случайни движения. Разпространявайки се навътре по линиите на междупланетното магнитно поле, те се разсейват от малки по мащаб нееднородности. Този процес е известен като дифузия. Той не зависи от полярността на полето, но зависи от слънчевата активност, поради по-силното поле и по-големия брой магнитни нееднородности близо до слънчевия максимум.

В резултат на градиента и кривината на междупланетното магнитно поле, движението на космическите частици се наблюдава като дрейф и зависи от слънчевата полярност (Фиг.4), която се променя на всеки 11 години. През част от слънчевия цикъл, означен с $A > 0$, положително заредените космични лъчи дрейфат от полксите към екватора и радиално навън по неутралния токов слой, докато електроните дрейфат в обратна посока. Ситуацията се обръща при следващия цикъл, когато $A < 0$.

Накрая разширяващото се магнитно поле има тенденция да конвектира частиците навън. Конвекцията не зависи от полярността, но зависи от нивото на слънчевата активност, тъй като слънчевия вятър и силата на полето са по-високи при слънчев максимум. Обединяването на трите модулационни компоненти води до наблюдаваните ефекти на космическите лъчи в хелиосферата [4].



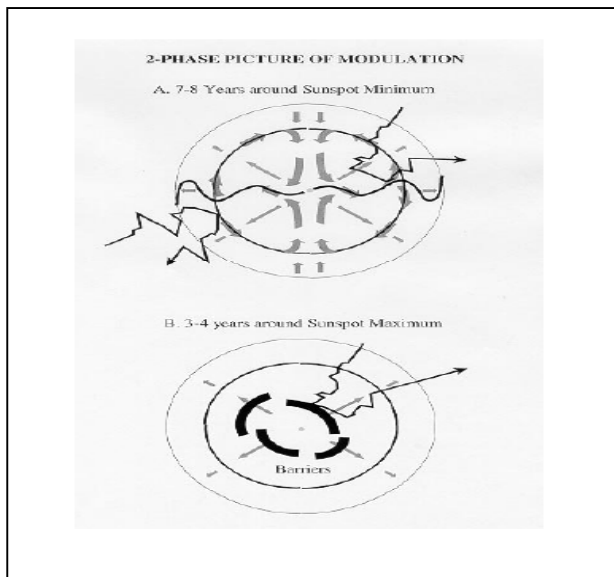
Фиг.4 . Схема на дрейф на космическите лъчи по протежението на неутралния токов слой, в резултат на градиента на магнитното поле около този слой и обръщането на посоката на магнитното поле от едната страна към другата. При положителна (ляв панел) /отрицателна полярност (десен панел) на слънчевото магнитно поле положително заредените частици дрейфат навън от / навътре по токовия слой.

3. Глобален модел на хелиосферна модулация

Potgieter и Ferreira [5] идентифицират четири периода на модулация: минимум ($\alpha = 0^{\circ}-30^{\circ}$), умерен ($\alpha = 30^{\circ}-55^{\circ}$), клонящ към максимум ($\alpha = 55^{\circ}-75^{\circ}$), т.е. висока слънчева активност) и максимум ($\alpha > 75^{\circ}$), т.е. екстремна степен на слънчева активност. Настоящото разбиране е, че транспорта на космичните лъчи в хелиосферата е управляван от различни процеси през периодите на висока и ниска слънчева активност. Фиг. 5 илюстрира двете различни фази. Глобалният механизъм на транспорта на космическите лъчи е добре разбран за периодите на слънчев минимум, когато хелиосферата е спокойна и добре организирана. Основна роля в този случай играе дрейфа на частиците, породен от кривината и градиента на едромасщабното магнитно поле.

Поради различните пътища на разпространение космическите лъчи показват системни разлики между два последователни слънчеви минимума. Йоните са чувствителни към структурата на неутралния токов слой и тяхното разпределение е близко до екваториалната област при цикъл $A < 0$, когато те проникват в хелиосферата по NCS. При цикъл $A > 0$, йоните достигат вътрешната хелиосфера основно през полярните области, така че те са по-малко чувствителни към структурата на неутралния слой [3].

Транспорта на частици по време на висока слънчева активност е много по-малко разбран. Стабилната картина на коротация и добре структурирания едромасщабен дрейф са смутени от различни временни събития. Разпространяващите се в средата огромни маси изхвърлени от Слънцето (Coronal Mass Ejections – CMEs) и взаимодействащите си области от различен характер (Global Merged Interaction Regions – GMIRs) са определящи за модулацията около слънчев максимум. Тези събития формират движещи се навън бариери, които причиняват понижаване на нивото на космическите лъчи [1, 3]. За състоянието на теоретичните модели виж Potgieter (1998) [6].



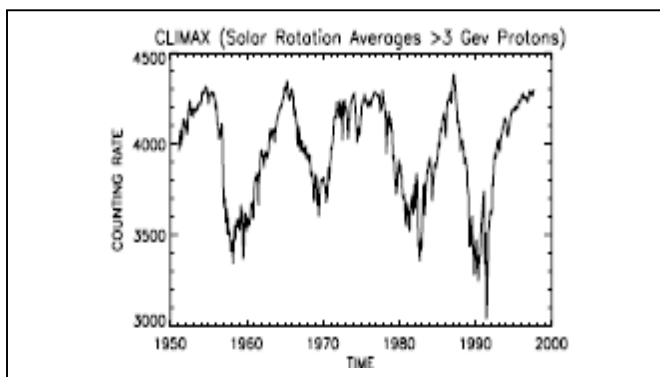
Фиг. 5. Схематична илюстрация на режимите на слънчева модулация

На Фиг. 5 е дадена схематична илюстрация на двата режима на слънчева модулация. Дрейфът на частици (удебелените стрелки) има важно значение около слънчев минимум, когато спокойната хелиосфера е добре структурирана (картинката горе). При слънчев максимум моделът на дрейф е разрушен и се наблюдава доминиращо разпространение на преходни бариери (картинката долу). С тънките радиални черти са означени скоростите на слънчевия вятър.

4. Наблюдения и моделни пресмятания

4.1. Галактически космически лъчи

Разликата между двете противоположни полярности, обусловени в 22 - годишния магнитен цикъл определя системно различие между последователните 11- годишни цикли. Изменението на потока на галактическите космически лъчи показва ясна



Фиг.6. Вариации на потока протони с енергии $E > 3$ GeV, получен с неутронен монитор за различните слънчеви цикли. На фигурата ясно се различават асиметриите между четните и нечетни слънчеви цикли.

асиметрия между четен и нечетен цикъл. От Фиг. 6 се вижда, че циклите $A < 0$ между 1960–1970 и 1980–1990 имат заострен максимум на интензитета, докато $A > 0$ цикли (т.е. 1950–1960, 1970–1980) се характеризират с подчертан плато-подобен максимум. Настоящият цикъл следва същия системен образец. Спектрите за четните години на слънчев максимум са по-високи и много по-резки отколкото за нечетните години. Освен това има значителни разлики в спектрите на слънчев максимум за различните цикли.

4.2. Аномални космически лъчи

Ударната вълна на границата на хелиосферата - хелиопаузата е основният източник на йонизация за аномалните космически лъчи (ACRs) [7].

Съществени са два аспекта на феномена ниско-енергетични (0.5–30 MeV/nucleon) аномални космични лъчи:

Първо, за ниско енергетичната ($R \leq 2$ GeV) компонента дрейфа от частиците е пренебрежим и транспорта е почти радиален [8].

Второ, във външните области на хелиосферата аномалните космически лъчи са с енергии под пика на модулирания спектър, но над областта където адиабатните енергетични загуби са съществени. Тяхното движение е обусловено от процесите на конвекция – дифузия, докато движението на по-високо енергетичната компонента се разглежда в границата на дрейф-конвекция.[9, 10].

5. Заключение

Спокойната хелиосфера въздейства на космическите лъчи по два основни начина [11]:

Първо, когато галактическите и аномалните космически лъчи навлезат във вътрешните части на хелиосферата, тяхната интензивност намалява, тъй като част от енергията им се променя поради дрейфа и дифузията. Пряко следствие от адиабатните енергетични загуби на космическите лъчи са спектралните функции (пропорционални на кинетичната енергия) и много малкия градиент по ширина на ниско енергетичната галактическа компонента във вътрешната хелиосфера. При спокойни условия се очаква разпределението на космическите лъчи да е в много по-голяма степен сферично-симетрично. Поради различните пътища на разпространение, вследствие на градиента и кривината при дрейфа на частиците, последователните периоди на ниска слънчева активност показват системни разлики породени от противоположния знак на междупланетното магнитно поле. Ето защо вариациите между заострени и платовидни профили в интензитета на последователните 11-годишни слънчеви цикли за положителната компонента на космическото лъчение намира лесно обяснение.

Второ, като допълнение към всеобщата цялостна модулация трябва да се отбележи, че квази-равновесните области на коротация (CIRs - corotating interaction regions) причиняват периодично повтарящи се спадове в интензитета на космическите лъчи. Наблюдава се също и квази-периодично нарастване на интензитета на ниско-енергетичните заредени частици, които са ускорени в коротиращите ударни вълни асоциирани с CIRs. Двата вида вариации и тяхната зависимост от хелиосферната ширина са важен ключ за връзката между едромасщабната структура на междупланетното магнитно поле и параметрите, които описват разпространението на енергетичните частици.

Поведението на космическите лъчи през годините на активно Слънце се очаква да бъде съвсем различно и вероятно много по-сложно. При активно Слънце се наблюдава преход към хелиосфера, в която преобладават неустойчивости, дължащи се на различни смущения. Това е илюстрирано на Фигура 5 /долната картинка/. По времето на слънчев максимум се наблюдава разпространение на ударни вълни и други краткотрайни явления на повърхността на Слънцето. Те формират различни типове взаимодействащи си области, водещи до последователни намалявания на потока космични лъчи. Комплексното влияние на тези области може да бъде основната причина за модулацията на потока космически лъчи в активната хелиосфера [11].

Ние предлагаме полу-емперичен модел, който обобщава диференциалния и интегрален спектър на галактичните и аномалните космически лъчи през 11 – годишния слънчев цикъл [12]. Този модел дава възможност за изследване на експерименталните данни от измерванията на космичните лъчи при различни нива на слънчевата активност и изчисляване на йонизационните профили за различни географски ширини на Земята.

Литература:

1. Burlaga, L.F., F.B. McDonald, M.L. Goldstein and A.J. Lazarus, Cosmic Ray Modulation and Turbulent Interaction Regions Near 11 AU, *J. Geophys. Res.*, **90**, 12, 027, 1985.
2. Solar Physics Course, Seminar Spring, Lecture Notes, Chapter 9, Solar Wind and the Heliosphere, 2004, Helsinki. http://theory.physics.helsinki.fi/~sol_phys/Sol0609.pdf.
3. Jokipii, J.R., J. Kóta, Galactic and Anomalous Cosmic Rays in the Heliosphere, *Astrophysics and Space Science* **274**, 1/2 77–96, 2000.
4. Duldig, M.L., Heliospheric modulation: Theory and Underground Observations, ANARE Research Notes, **102**, 145-161, 2000.
5. Potgieter, M. S., S. Ferreira, Modulation of Cosmic Rays in the Heliosphere: Theory and Models, ICRC2001, 27th International Cosmic Ray Conference Hamburg, Germany 07-15 August 2001.
6. Potgieter, M.S., The Modulation of Galactic Cosmic Rays in the Heliosphere: Theory and Models, *Space Sci. Rev.* **83**, 159–167, 1998.
7. Pesses, M. E., Jokipii, J. R., and Eichler, D., Cosmic Ray Drift, Shock Wave Acceleration, and the Anomalous Component of Cosmic Rays, *Astrophys. J. Lett.*, **246**, L85–L89, 1981.
8. Hill, M.E., Investigating the Heliosphere with Low Energy Anomalous Cosmic Rays, in *Physics of the Outer Heliosphere: Third International IGPP Conference*, American Institute of Physics, CP719, 156-161, 2004.
9. Reinecke J.P.L. and H. Moraal, On the Form of the 1987 Hydrogen Spectrum in the Outer Heliosphere, *Astrophys. J.* **392**, 272-276, 1992.
10. Caballero-Lopez, R. A., H. Moraal, Limitations of the Force-Field Equation to Describe Cosmic Ray Modulation, *J. Geophys. Res.*, 109(A1), 01101, doi:10.1029/2003JA010098, 2004.
11. Jokipii, J.R., G. Wibberenz, Galactic and Anomalous Cosmic Rays in the Heliosphere, *Space Science Reviews*, **83**, 365-368, 1998.
12. Velinov, P.I.Y., Expressions for Differential Spectrum of Primary Cosmic Rays with Smoothing Function Tangens Hyperbolicus, *C. R. Acad. Bulg. Sci.* **55** (1), 51-54, 2002.

