



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ



**ИНСТИТУТ ЗА КОСМИЧЕСКИ ИЗСЛЕДВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ
СЕКЦИЯ „СЛЪНЧЕВО – ЗЕМНА ФИЗИКА”**

Красимир Николаев Кръстев

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАДИАЦИОННИТЕ УСЛОВИЯ ПО ТРАСЕТО И В ОРБИТА
ОКОЛО МАРС ПО ДАННИ ОТ АПАРАТУРАТА “ЛЮЛИН-МО” НА БОРДА НА
СПЪТНИКА “ЕКЗОМАРС” TRACE GAS ORBITER**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд за присъждане на
образователна и научна степен „доктор”

в област на висшето образование: 4. Природни Науки, математика и информатика;
професионално направление 4.1. Физически науки; научна специалност: 01.04.08.
“Физика на океана, атмосферата и околоземното пространство”

Научен ръководител: Проф. дфн Йорданка Семкова

София, 2023 г.

Настоящото изследване е извършено в рамките на задочна докторантура по научна специалност: 01.04.08. “Физика на океана, атмосферата и околоземното пространство“ в секция „Слънчево – земна физика“ към Институт за космически изследвания и технологии при Българска академия на науките /ИКИТ-БАН/.

Дисертационният труд е обсъден на заседание на еднократно разширен научен семинар на секция „Слънчево – земна физика“ при ИКИТ-БАН и е предложен за разглеждане от специализирано жури.

Дисертацията съдържа 139 стр., в които 132 фигури, 30 таблици и 17 стр. литература, включваща 122 заглавия.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на открито заседание пред научно жури, утвърдено от Научния съвет и назначено от Директора на ИКИТ-БАН (Заповед № П4/ 09.11.2023) на12.2023г..... г. от часа в зала на бл. 1, ет. 3 в Научния комплекс на БАН – ул. „Шипченски проход“, гр. София на заседание на научното жури в състав:

Вътрешни членове:

1. Проф. дфн Йорданка Семкова, ИКИТ – БАН
2. доц. д-р Симеон Асеновски, ИКИТ – БАН

Резервен член:

Проф. дфн Цветан Дачев, ИКИТ – БАН

Външни членове:

1. Чл. -кор. дфн Петър Велинов – БАН
2. Проф. дфн Кирил Крежов – ИЯИЯЕ – БАН
3. Проф. дфн Дора Панчева – НИГГГ – БАН

Резервен член:

доц. д-р Поля Добрева – ИМех – БАН

Автор: *Красимир Николаев Кръстев*

Заглавие: **ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАДИАЦИОННИТЕ УСЛОВИЯ ПО ТРАСЕТО И В ОРБИТА ОКОЛО МАРС ПО ДАННИ ОТ АПАРАТУРАТА “ЛЮЛИН-МО” НА БОРДА НА СПЪТНИКА “ЕКЗОМАРС” TRACE GAS ORBITER**

Забележка: Номерата на разделите, формулите, таблиците, фигурите и литературата в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

Contents

Увод	6
1. Актуалност на темата	7
2. Цел и задачи на изследването	7
Глава 1. Източници на космическа радиация	9
1.1 Въведение	9
1.2 Източници на йонизираща радиация в междупланетното пространство	9
1.3 Източници на йонизираща радиация в орбита около Марс	10
1.4 Значение на йонизиращата радиация за бъдещите пилотиран полети до Марс	10
1.5 Проект “Екзо-Марс ”	10
1.6 Състояние на изследванията на йонизиращата радиация при полет до Марс до момента	11
Глава 2. Методи за изследване на радиационната обстановка по трасето Земя-Марс и около Марс по проекта “Екзо-Марс”	12
2.1 Спектрометър за измерване на заредени частици “Люлин- МО”	12
2.2 Цел и задачи на експеримент “Люлин- МО”	12
2.2.1 Дизайн и характеристики на научната апаратура “Люлин- МО”	12
2.2.2 Измервани величини	13
2.2.3 Метод на измерване със спектрометъра на заредени частици “ Люлин- МО” и определяне на дозиметричните величини	13
2.3 Калибровки на спектрометъра за измерване на заредени частици “Люлин- МО”	14
2.3.1 Електронни калибровки	14
2.3.2 Калибровки с радиоактивни източници	15
2.3.3 Определяне на пълния спектър на депозираните енергии, дозата и потока в единичните детектори по данните от измерванията в отделните детектори в режим на съвпадение и несъвпадение	15
2.4 Основни резултати от Глава 2	15
Глава 3. Изследване на дозата, потока космическа радиация, спектъра на линейно поглъщане на енергията и дозовия еквивалент по трасето и в орбити около Марс	17
3.1 Резултати от измерване на мощности на дозите и потоците радиация по трасето до Марс, във високоелиптична и кръгова орбита около Марс	17
3.2 Изследване на екраниращия (засенчващ) ефект на Марс върху измерените потоци и мощности на дозите	18
3.3 Определяне на спектъра на линейно поглъщане на енергията, определяне на $\langle Q \rangle$ фактора и дозовия еквивалент по данните от пълния спектър на депозираните енергии в единичните детектори	19
3.4 Резултати от измерване на спектъра на линейно поглъщане на енергията, определяне на Q фактора по данните от телескопите и изводи	20
3.5 Изводи и резултати от Глава 3	21

Глава 4. Моделиране на екранировката на детекторите на Люлин-МО и на процеса на измерване на спектъра на линейно поглъщане на енергията в телескопите.	23
4.1 Цел и задачи на моделирането	23
4.1.2 Описание на софтуера	23
4.2 Моделиране на детекторната система на Люлин-МО при нулева защита. Описание на модела. Анализ на получените данни. Определяне на моделния спектър на линейно поглъщане на енергията.	23
4.2.1 Описание на модела	23
4.2.2 Анализ на получените данни	24
4.2.3 Определяне на моделния спектър на линейно поглъщане на енергията	28
4.3 Моделиране на екранировката на детекторите на Люлин-МО от конструкцията на Люлин-МО, FRIEND и TGO. Определяне на моделния спектър на линейно поглъщане на енергията и сравнение с измерванията.	28
4.3.1 Описание на модела	28
4.3.2 Анализ на получените данни за телескопа АВ	30
4.3.3 Анализ на получените данни за телескопа CD	33
4.3.4 Определяне на моделния спектър на линейно поглъщане на енергията. Сравнение на моделни и експериментални резултати за LET спектри и $\langle Q \rangle$	34
4.3.5 Допълнителни резултати	36
4.3.6 Изводи и резултати	36
Глава 5	38
5.1 Благодарности	38
5.2 Авторски приноси	39
5.3. Бъдещи планове за развитие на тематиката	40
5.4 Списък на публикациите на автора, използвани в дисертацията	40
5.5 Списък на публикациите, използвани и цитирани в автореферата	41

Списък на съкращенията

на кирилица

ВНИИФТРИ - Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений

ГКЛ – Галактични космични лъчи

НИО – научно – исследовательский отдел

РПЗ – Радиационни пояси на земята

СКЛ – Слънчеви космични лъчи

на английски

ACS – Atmospheric Chemistry Suite

CaSSIS – Colour and Stereo Surface Imaging System

CME – Coronal Mass Ejection

DAN – MSL - The Dynamic Albedo of Neutrons Mars Science Laboratory

FREND – Fine Resolution Epithermal Neutron Detector

HEND – High Energy Neutron Detector

HZE – high (H) atomic number (Z) and energy (E)

ICRP – International Commission on Radiological Protection

LEO – Low Earth Orbit

LET – Linear Energy Transfer

MARIE - The Mars Radiation Environment Experiment

MEPA – Mars Energetic Particle Analyzer

MSL – Mars Science Laboratory

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NOMAD – Nadir and Occultation for MArS Discovery

OLTARIS – On-Line Tool for the Assessment of Radiation in Space

RAD – The Radiation Assessment Detector

SEP – Solar Energetic Particles

TGO – Trace Gas Orbiter

Увод

Инстинктът за усвояване на нови жизнени пространства и научни познания, е една от основните причини, които карат човечеството да насочи своето внимание към овладяване на космическото пространство. Безспорно е огромното научно, икономическо и културно значение на космическите изследвания и технологии. Още в зората на космическата ера става ясно, че в космоса съществува силно радиационно поле, което оказва нежелан ефект върху апаратурата и космонавтите. Космическата дозиметрия се развива и превръща в едно от основните направления на космическите изследвания. Оценката на радиационния риск е важен и задължителен етап от планирането на всеки експеримент или мисия в космическото пространство.

В междупланетното пространство радиационното поле се формира основно от галактическите космически лъчи (ГКЛ) и слънчевите космически лъчи (СКЛ). ГКЛ са непрекъснат източник на йонизираща радиация и са силно проникващи. Тяхната енергия достига 10^{21} eV. ГКЛ се състоят главно от протони (85%–90%), алфа частици (около 11%) с около 1% електрони и 1% тежки йони – оголени ядра на литий и всички по-тежки елементи. Тежките йони имат много важна роля в космическата дозиметрия, тъй-като са дълбоко проникващи и силно въздействат върху биологичните обекти и хората. Потокът и спектърът на ГКЛ демонстрират модулация, която анти-корелира със слънчевата активност. Приема се, че ГКЛ са изотропно разпределени в междузвездното и междупланетно пространство. В орбита около масивен космически обект или на повърхността му част от потока ГКЛ се екранира (засенчва) от тялото на обекта.

Слънчевите космични лъчи (наричани още слънчеви енергетични частици СЕЧ, solar energetic particles SEPs) са случайно разпределени събития, но те могат да доведат до много високи йонизационни дози за кратък интервал от време, включително летални дози. Те представляват интензивни потоци заредени частици (главно протони, малко алфа частици и тежки йони) с енергии до няколко GeV и интензитет до $10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. СКЛ се наблюдават предимно около слънчевите максимуми, но понастоящем тези събития са непредсказуеми.

Заредените частици депозират енергия в дадена среда главно поради йонизационни енергетични загуби. Линейно предаване (поглъщане) на енергията (ЛПЕ, Linear Energy Transfer, LET) е стойността на йонизационните загуби на енергия на единица път във веществото. В практиката, за оценка на биологически значимата доза от комплексно радиационно поле в космоса се използва величината дозов еквивалент. Той се изчислява с помощта на качествения фактор – еднозначна функция на ЛПЕ (LET) във вода. Дозовият еквивалент е функция на погълнатата доза и качествения фактор.

Космическите лъчи си взаимодействат с апаратурата на космическите кораби, като по този начин се пораждаат широк набор от вторични частици и ефекти. Оценката на радиационния риск включва отчитането и на тези ефекти. Сложността на така поставените задачи налага прилагането на числено моделиране за тяхното решаване. В настоящата работа се използва софтуер базиран на Geant4.

Geant4 е рамка на езика C++, която е основата за писане на програми за моделиране на процеси във физиката на високите енергии и физиката на елементарните частици. Рамката включва както готови модели на физически процеси, базирани на

експериментални данни и основните теории на физиката на елементарните частици, така и инструменти за описание на собствени физически модели.

1. Актуалност на темата

В настоящата дисертационна работа са представени резултатите от обработката и анализа на данни, получени от апаратурата “Люлин-МО” на борда на спътника “ЕкзоМарс” Trace Gas Orbiter (TGO) при изследването на радиационната обстановка по трасето и на орбита около Марс. За оценка на радиационния риск при космически мисии се използват няколко общоприети модела на ГКЛ. Точността на тези модели е ограничена от непълнотата на експерименталните данни за радиационното поле в междупланетното пространство. Друго обстоятелство, което ограничава точността на оценката за радиационния риск е, че съществуващите модели дават осреднени резултати (примерно за година) и не позволяват да се направят точни краткосрочни прогнози за конкретен времеви интервал. Изброените обстоятелства показват, че всеки експеримент, свързан с измерване на радиационната среда в междупланетното пространство, е от голямо значение. Повишеният интерес в света към изследване на Марс и Луната, включително чрез пилотируеми полети, прави настоящото изследване особено актуално.

2. Цел и задачи на изследването

Основна цел на настоящата дисертационна работа е да се изследват радиационните условия по трасето и в орбита около Марс по данни от апаратурата “Люлин-МО” на борда на спътника “ЕкзоМарс” Trace Gas Orbiter и да се даде максимално точна оценка за компонентите на дозите и потоците космическа радиация (включително вторичната радиация) в междупланетното пространство за съответния период на измервания. Тази цел се постига чрез решаването на две основни задачи:

➤ **Първата основна задача на дисертацията е анализ и интерпретация на данните за основните дозиметрични величини от Люлин– МО, получени по трасето и в орбити около Марс. Подзадачи:**

- Да се изследва зависимостта на потоците, мощностите на дозите и дозовия еквивалент от развитието на цикъла на слънчевата активност;
- Да се изследва засенчващия ефект на Марс във високоелиптична и кръгова орбити на TGO върху измерените потоци и мощности на дозите;
- Да се моделират двете събития на СКЛ от октомври 2021 г. и февруари 2022 и резултатите да се сравнят с експерименталните данни;
- Да се направят сравнения на основните дозиметрични величини, получени по трасето до Марс с резултатите от измерванията в други мисии;
- Да се изведе аналитично средната дължина на пътя, който изминава частица в единичния детектор и в дозиметричния телескоп с цел правилно определяне на спектъра на линейно предаване (поглъщане) на енергията (LET спектъра) от тези детекторни системи и качествения фактор на радиацията.

➤ **Втората основна задача на дисертацията е да се изследва влиянието на вторичните частици при формиране на отклика на детекторната система на прибора Люлин-МО. Подзадачи:**

- Да се създаде числен модел, който възпроизвежда радиационното поле в междупланетното пространство по време на полета до Марс на мисията “ЕкзоМарс” Trace Gas Orbiter, а така също и съответния отклик на детекторната система на прибора;
- Моделът да се приложи за няколко различни защити, имитиращи конструкцията на Люлин-МО и тази на TGO;
- Да се направи сравнение между получените резултати за различните случаи;
- Да се получи оценка за приноса, който имат вторичните частици при формирането на LET спектъра и съответно качествения фактор на радиацията;
- За всяка компонента от спектъра на ГКЛ да се получи съответния отклик на детекторната системата;
- Да се изследва приноса при формиране на допълнителни (фалшиви) сигнали от вторични частици в LET спектъра;
- Да се определи приносът към сумарната доза на всяка компонента от спектъра на ГКЛ. На базата на създадената методология за скрининг на фалшиви вторични сигнали в LET спектрите на дозиметричните телескопи на Люлин-МО и съответно в LET спектрите на ГКЛ, да се разработи алгоритъм и да се приложи за изчистване на фалшивите вторични сигнали в експериментално получените LET спектри от телескопите на Люлин-МО (реконструиране на LET спектрите);
- Изчислените от реконструираните LET спектри качествени фактори на радиацията да се сравнят с получените от единичните детектори на Люлин-МО, както и с тези от други експерименти в междупланетното пространство.

Глава 1. Източници на космическа радиация

1.1 Въведение

През 1785 година Ш. О. Кулон представя доклад по електричество и магнетизъм пред Френската кралска академия на науките, в който се посочва, че изолирани наелектризирани тела спонтанно се разреждат [Coulomb С., 1785]. Тези резултати намират своето продължение в множество по-късни и усъвършенствани експерименти, които показват, че причина за спонтанното разреждане на изолирани заредени тела, е неизвестен източник на радиация, под чието въздействие въздухът се йонизира. На 7 август 1912 е извършен последният от седемте полета с балони на Виктор Хесс, които той прави през 1912 година. В резултат от изследванията Хесс предполага, че йонизиращата радиация най-вероятно има космически произход [Hess V., 1912]. За откриването на космическите лъчи Виктор Хесс е удостоен с Нобелова премия през 1936 година, която той разделил с Карл Андерсън - открил позитрона в космическите лъчи 4 години по-рано [Anderson, С., 1933]. Космическите лъчи дълго време остават поле за нови открития. През 1937 е открит мюонът (μ -мезон) [Neddermeyer and Anderson, 1937], през 1947 - пионът (π -мезон) и каонът (K-мезон) [Rochester G. and Butler С., 1947], през 1951 г. - Λ -хиперонът [Armenteros et al., 1951] и т.н. Появата на изкуствени спътници полага началото на цяла индустрия за направата на детектори за изследване на космическото пространство. От 60-те години на миналия век детектори на космическо лъчение, регулярно се монтират на спътници и космически станции за дългосрочен и систематичен мониторинг.

1.2 Източници на йонизираща радиация в междупланетното пространство

В междупланетното пространство радиационното поле се формира основно от галактическите космични лъчи (ГКЛ, GCR) и слънчевите космически лъчи (СКЛ, SEP), а на околоземна орбита и от частиците на радиационните пояси на Земята (РПЗ) [Мирошниченко, Петров. 1985; Cucinotta, et al, 2010; Durante, Cucinotta 2011; ICRP, 2013]. ГКЛ и РПЗ образуват локализиращи в пространството бавно изменящи се радиационни полета, докато СКЛ са спорадични и импулсивни събития, които са резултат от слънчеви изригвания и/или изхвърляне на коронална маса (CME) [Reames, 2013; Velinov et al, 2013].

Спектърът на ГКЛ е широк както по състав (от протони до най-тежките ядра), така и по енергии - от няколко keV до 10^{21} eV [Velinov, 1966; Usoskin, Desorgher, 2009; Matthiä et al, 2013; Kuznetsov et al, 2017; Slaba & Withman, 2020]. Потокът ГКЛ е бавно изменяща се величина с голяма степен на изотропност. Основният тренд на потока се определя от циклите на слънчевата активност.

СКЛ се появяват много по-често по време на нарастваща фаза на слънчевия цикъл. Известно е, че типичните СКЛ представляват сравнително малък риск за здравето на астронавтите и могат да бъдат ефективно смекчени чрез използване на подходящи екраниращи материали. Въпреки това, големи събития на СКЛ могат да бъдат смъртоносни, макар че са редки [Committee for Evaluation of Space Radiation Cancer Risk Model, 2012 г.].

Най-интензивните слънчеви протонни потоци, наблюдавани близо до Земята, са тези през август 1972 г. и октомври 1989 г [Dachev et al, 1992, 1998; Бенгин и др., 1991, 1992; Lobakov et al, 1992; Petrov et al, 1994; Shurshakov et al, 1999]. Изригването, съдържащо

най-големия пиков поток от силно проникващи частици, е открито от неутронни монитори на 23 февруари 1956 г. На негова основа е съставено така нареченото най-лошо събитие (worst case), което се смята, че се случва веднъж на век, но статистиката е изключително лоша [Letour and Clearwater, 1986; Letaw et al, 1989]. Наскоро, на 28 октомври 2021 г. СМЕ с висок интензитет на потока, бе наблюдавано едновременно на земята и Марс [Guo et al, 2023; Velinov 2022].

1.3 Източници на йонизираща радиация в орбита около Марс

Радиационното поле на Марс се формира основно от ГКЛ и СКЛ. Марс има остатъчна магнитосфера и има тънка атмосфера (<1% от земната). Поради това, Марс е силно изложен на космическа радиация и през последните две десетилетия бяха направени редица изследвания върху радиационната среда, предизвикана от ГКЛ на Марс [Saganti et al., 2004; De Angelis et al., 2006; Schwadron et al., 2010; Ehresmann et al., 2011; McKenna-Lawlor et al., 2012; Gronoff et al., 2015; Guo et al., 2015; Matthiä et al., 2016; Matthiä & Berger, 2017; Röstel et al., 2020; Da Pieve et al., 2021; Gonçalves et al., 2022; Guo et al., 2021]. ГКЛ достигайки повърхността на Марс пораждаат вторични частици, породените вторични частици преминават обратно през атмосферата и създават допълнителна радиация на орбита около Марс, така нареченото алbedo. Алbedo частиците се състоят от неутрони, протони, хелиеви йони, електрони, позитрони, фотони и по-малка част от тежките заредени йони [Dartnell et al. 2007].

1.4 Значение на йонизиращата радиация за бъдещите пилотирани полети до Марс

Освен върху електрониката на летателния апарат, космическата радиация оказва вредно влияние и върху космонавтите. Най-голям радиационен риск има за кръвотворната система, очите и кожата. Границите на всяка от космическите агенции, опериращи на Международната космическа станция (МКС), за позволена натрупана доза за цялата кариера на астронавти/космонавти в ниска околоземна орбита (LEO) са между 0,6 Sv (НАСА) и 1 Sv (другите агенции). Ограничения, специфични за възрастта и пола са наложени в лимитите на някои от тези агенции [Shavers et al, 2023]. Граници (лимита) за допустимата доза при полет до Марс не са установени все още, но ориентировъчно се използват горните стойности. За потенциална човешка мисия до Марс рисковете, предизвикани от излагане на космическа радиация, са класифицирани като един от главните рискове и ограничаващи продължителността на мисията фактори [Walsh et al. 2019; Cucinotta et al. 2017].

1.5 Проект “Екзо-Марс ”

Екзо-Марс е съвместна астробиологична програма на Европейската космическа агенция ESA и Роскосмос за изследване на Марс. Програмата включваше изстрелване на автоматичните междупланетни станции ЕхоMars-2016 и ЕхоMars-2022, като изстрелването на последната не бе осъществено.

На Trace Gas Orbiter се намират следните научни прибори:

- [NOMAD](#) (Nadir and Occultation for MArS Discovery) – система от спектрометри за високочувствителна идентификация на компонентите на марсианската атмосфера.
- [ACS](#) (Atmospheric Chemistry Suite) – набор от спектрометри за изучаване химията и структурата на атмосферата на Марс.
- [CaSSIS](#) (Colour and Stereo Surface Imaging System) – камера с високо разрешение.

- **FREND** (Fine Resolution Epithermal Neutron Detector) – детектор на неутрони, който трябва да потвърди наличието на водород в реголита на Марс. Liulin- MO - дозиметър на космическа радиация, е отделен модул на **FREND**.

1.6 Състояние на изследванията на йонизиращата радиация при полет до Марс до момента

През 2012 г., стартира Марсианска научна лаборатория MSL [Grotzinger et al. 2012]. Детекторът за оценка на радиацията RAD [Hassler et al. 2012], който е част от MSL, извършва измервания на радиацията на енергийни частици по време на пътуването и на повърхността на Марс . В орбита около Марс са работили/работят три прибора за радиационни измервания:

- Марсианският експеримент за изследване на радиационна среда MARIE [Badhwar, 2004] на борда на Mars Odyssey Orbiter, изстрелян през април 2001 г. и въведен в орбита около Марс през октомври 2001 г.
- Приборът за измерване на космическа радиация Люлин – MO [Semkova et al., 2018], който е част от мисията EхоMars 2016 Trace Gas Orbiter (TGO). Люлин – MO е вторият (след RAD), който направи измервания на радиационната среда по време на полета до Марс. През април 2018 г. TGO беше въведен на научна орбита (на височина приблизително 400 км) около Марс и оттогава Люлин – MO изпраща почти непрекъснато данни за радиационното поле в орбита около Марс.
- Анализаторът на енергийните частици на Марс MEPA [Tang et al., 2020 г.] на борда на първата китайска мисия за изследване на Марс (Tianwen-1), която стартира през юли 2020 г. Данните, получени на тази орбита, са в процес на обработка и не са оповестени.

Освен това, данни за неутронната компонента на йонизиращата радиация по трасето, в орбита и на повърхността на Марс дават неутронните детектори HEND – Mars Odyssey [Litvac et al, 2020, 2021] и DAN - MSL [Mitrofanov et al, 2023].

Глава 2. Методи за изследване на радиационната обстановка по трасето Земя-Марс и около Марс по проекта “Екзо-Марс”

2.1 Спектрометър за измерване на заредени частици “Люлин- МО”

За мисията ЕхоMars бяха предвидени два дозиметъра и дозиметрични експерименти. Първият е дозиметърът за заредени частици и експериментът Liulin MO за измерване на радиационната среда на борда на ЕхоMars 2016 TGO. Люлин-МО е част от неутронния детектор с висока разделителна способност FRENД [<https://iki.cosmos.ru/research/missions/exomars>] на TGO. Дозиметричният модул Люлин-МО от прибора FRENД, осигурява информация за радиационната среда по време на полета до Марс и на орбита около Марс [Semkova et al, 2018].

Вторият дозиметричен експеримент предвиждаше изследвания с дозиметъра Люлин-МЛ на борда на спускаемата платформа върху Марс на мисията ЕхоMars 2022. Люлин-МЛ беше създаден, тестван, калибриран и квалифициран за космически полет от колектива, създаде и Люлин-МО, но мисията ЕхоMars 2022 не беше осъществена.

2.2 Цел и задачи на експеримент “Люлин- МО”

Основната цел на дозиметричния експеримент Люлин-МО е изследване на радиационните условия в хелиосферата на разстояния от 1 до 1,5 AU от Слънцето. По-подробно научните задачи могат да се класифицират по следния начин:

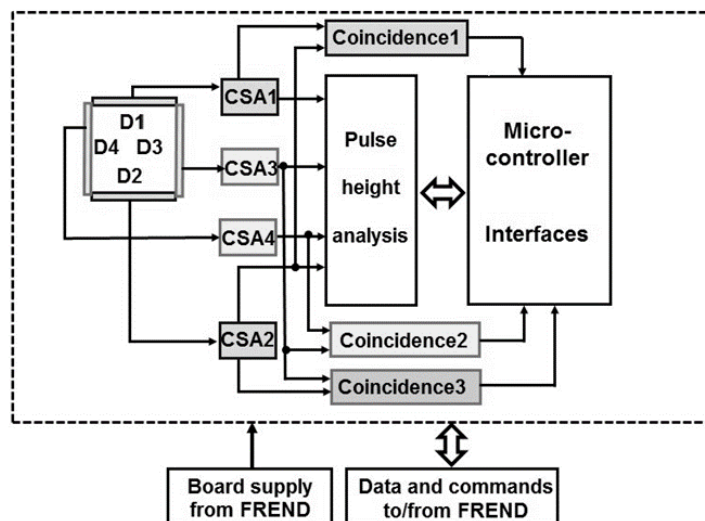
- ✓ Непрекъснати измервания на спектрите на депозираните енергии, мощност на дозата и потока частици. Наблюдение на техните промени във времето (например спрямо хода на цикъла на слънчевата активност).
- ✓ Измервания на GCR поток и мощност на дозата в зависимост от хелиоцентричното разстояние.
- ✓ Изследване на зависимостта на радиационните параметри на GCR в орбитата на Марс относно разстоянието и ориентацията спрямо Марс.
- ✓ Едновременна регистрация на SEP събития заедно с други прибори, предоставящи радиационни данни.

2.2.1 Дизайн и характеристики на научната апаратура “Люлин- МО”

Спектрометърът на заредени частици Liulin-МО съдържа два дозиметрични телескопа – АВ и CD, разположени в две перпендикулярни посоки [Semkova et al, 2018]. Всяка двойка дозиметрични телескопи се състои от два правоъгълни Si PIN фотодиода с дебелина 300 μm и площ 20x10 mm. Разстоянието между паралелните Si PIN фотодиоди е 20,8 mm. Геометричният фактор [Sullivan, 1971] на телескоп за изотропно лъчение е $\sim 1,38 \text{ cm}^2 \text{ sr}$. Геометричният фактор на един детектор е $\sim 12,56 \text{ cm}^2 \text{ sr}$. Детекторите А, В, С и D (обозначавани по-долу и като D1, D2, D3, D4), зарядочувствителните предусилватели-усилватели, праговите дискриминатори и веригите за постоянно напрежение са монтирани в отделен обем на детектора вътре в кутията на инструмента Liulin-МО и са свързани към печатни платки, които съдържат схеми за анализ на амплитудата на импулса от зарядочувствителните усилватели, DC-DC преобразуватели, микроконтролери и интерфейси към FRENД. Целият пакет Liulin-МО е с маса 0,7 kg и консумира 2,2 W. Всички основни звена на Люлин-МО са дублирани с цел повишаване на надеждността на дозиметъра.

2.2.2 Измервани величини

Основните измервани параметри са амплитудите на импулсите на напрежение на изходите на предусилвателите-усилватели формиратели CSA1–CSA4 (виж Фигура 2.4). Амплитудата на импулса на напрежение е пропорционална на енергията, депозирана в съответния детектор от частица или фотон, преминаващ през детектора, както и на съответната доза. Чрез 8-битов аналогово цифров преобразувател ADC тези амплитуди се дигитализират, като попадат в един от каналите на 256 каналния енергиен спектър за всеки един от детекторите.



Фигура 2.4: Функционална схема на телескоп за заредени частици Люлин – МО.

Коефициентът на усилване на предусилвателите-усилватели формиратели на Liulin-MO, CSA1 до CSA4 е компромис между противоречивите цели на измерване на гама лъчи, електрони и високоенергийни протони (които имат много нисък LET и следователно изискват голямо усилване) и покриване на високоенергийния HZE спектър (който изисква ниски усилвания за измерване на силно йонизиращи частици като желязо).

2.2.3 Метод на измерване със спектрометъра на заредени частици “ Люлин- МО” и определяне на дозиметричните величини

За получаване на LET спектъра се прилага методът на съвпадение на електрическите сигнали, свързани с всеки от телескопите. Спектрите на депозираната енергия, измерени в детекторите D1 и D2 в режим на съвпадение се регистрират отделно. Спектрите на депозираната енергия в D2 в диапазона 0,08–15,9 MeV и в D1 в диапазона 16–190 MeV по-късно се сумират за получаване на спектъра на депозираната енергия в посока D1–D2. Депозираната енергия се превръща в dE/dx в силиций чрез формулата:

$$dE_i/dx = EL_i/hD, \quad (2.1)$$

където dE_i/dx [keV μm^{-1}] е депозираната енергия на единица дължина в силиций за i -я канал, EL_i [keV] е депозираната енергия в i -я канал, hD [μm] е дебелината на детектора. При прехода от dE/dx в силиций към LET във вода и от доза в силиций към доза във вода се използва фактор 1.3 ± 0.08 :

$$LET(H_2O) = (1/\rho) \cdot (dE/dx) \cdot 1,3, \quad (2.2)$$

където ρ е плътността на силиция. $\rho = 2,33 \text{ g/cm}^2$.

Този фактор беше избран, за да позволи сравнение на спектрите на LET, получени от инструментите Liulin – MO и RAD (RAD използва коефициент от 1,38 за преобразуване на dE/dx в силиций в LET във вода) [Guo et al, 2015]. Качествените фактори $Q(L)$ като функция на $LET(H_2O)$ се изчисляват въз основа на получените $LET(H_2O)$ спектри. ICRP-60 дефинира различни качествени фактори за всяка стойност на $LET(H_2O)$, така че средният качествен фактор $\langle Q \rangle$ в съответствие с дефиницията на ICRP-60 се определя като:

$$\langle Q \rangle = \int Q(L)D(L)dL/D, \quad (2.3)$$

където D е абсорбираната доза от всички частици.

По определение дозата D [Gy] е енергията в Джаул [J], която е депозирана в 1 килограм материя. Абсорбираната доза D_{Si} [Gy] в силициевия детектор се получава, като разделим сумарната депозирана енергия в джаули на масата на детектора измерена в килограми.

$$D_{Si} = \sum_{i=1}^{256} \frac{EL_i}{MD} = 1,6 \cdot 10^{-16} \sum_{i=1}^{256} \frac{(n_i A_i / k)}{MD} = [k1 \sum_{i=1}^{256} \frac{(n_i i)}{MD}] \times 1,6 \cdot 10^{-16} \quad (2.7)$$

където EL_i е енергията депозирана в i -я канал в [J], MD е масата на детектора в килограми. Депозираната енергия в keV от една частица е пропорционална на амплитудата A_i на импулса на напрежението за i -я канал и респективно на номера на канала i : $EL_i = (n_i A_i) / k$ [$VkeV^{-1}$] $\times 1,6 \cdot 10^{-16}$, където n_i е броят импулси (частици) в i -я канал, k е коефициент, който зависи от чувствителността на предусилвателя-усилвател формирова тел. $k1$ е коефициент, който конвертира номера на канала в енергия депозирана от единичната частица или фотон, коефициентът $1,6 \cdot 10^{-16}$ превръща депозираната енергия от [keV] в [J] [Dachev et al, 2002].

Значенията на величините $\sum_{i=1}^{256} n_i$ и $\sum_{i=1}^{256} n_i i$, са пропорционални на потока и дозата. Те се пресмятат за всеки детектор на борда на спътника от измерените данни и се предават като част от телеметричните данни. Мощностите на дозата и потоците се определят на всяка минута, докато спектрите на депозираната енергия и LET спектрите се определят на всеки час.

Мощността на дозовия еквивалент се изчислява по формулата:

$$H = \langle Q \rangle \cdot D(H_2O) \quad (2.8)$$

2.3 Калибровки на спектрометъра за измерване на заредени частици “Люлин-МО”

2.3.1 Електронни калибровки

Електронните калибровки на дозиметъра Люлин-МО са извършени с помощта на електрически тестови импулси подавани през неголям кондензатор (1–2pF) на входа на всеки зарядочувствителен предусилвател. Измерва се амплитудата на импулса на напрежение A_i на изхода за всеки предусилвател-усилвател формирова тел и се привързва към съответния спектрален канал i . По този начин се получава коефициентът $k1$, който преобразува номера на спектралния канал в енергия, депозирана от отделната частица или фотон.

2.3.2 Калибровки с радиоактивни източници

Физическите калибровки на Люлин – МО бяха проведени в Научно-изследователския отдел по метрология на йонизиращите лъчения (НИО-4) на Научно-изследователския институт за физико-технически и радиоизмервания (ВНИИФТРИ)-Русия. Извършени са две групи измервания: 1) зависимост на дозовата чувствителност на детектора от ъгъла; 2) измерване на дозовата чувствителност от дозата. Тези калибровки потвърждават големите динамични диапазони за измерване на потока (до 10^4 частици $cm^{-2} s^{-1}$) и мощността на дозата ($10^{-7} Gy h^{-1}$ до $0,1 Gy h^{-1}$), които позволяват на Liulin-МО да измерва потоците и мощностите на дозата както на ГКЛ с относително нисък интензитет, така и на случайните мощни SEP

2.3.3 Определяне на пълния спектър на депозираните енергии, дозата и потока в единичните детектори по данните от измерванията в отделните детектори в режим на съвпадение и несъвпадение

За определяне на пълните спектри на депозираната енергия, дозата и потока, се построява спектърът за единичния детектор. Този спектър е сума от спектрите на депозираните енергии в режими на съвпадение и не-съвпадение, измерени в ниския (0.08-15.9 MeV) и високия (16-190 MeV) диапазони на измерване на паралелните детектори В и А в едната посока, съответно D и С в перпендикулярната посока.

Потокут F [$particles/s \cdot cm^2$] се получава от получения спектър по формулата:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{256} n_i}{St} \quad (2.11)$$

където t [s] е времето за натрупване на импулсите, n_i е броят импулси в i -я канал, а S е площта на детектора в квадратни сантиметри.

Пълната доза се определя като сума от дозите, определени за всяка от компонентите на пълния спектър на депозираните енергии, изчислени по формула 2.7.

Пълният поток се определя като сума от потоците, определени за всяка от компонентите на пълния спектър на депозираните енергии, изчислени по формула 2.11.

Получен е израз за преходния коефициент, по който трябва да се умножи дозата измерена от телескопа, за да се получи дозата в единичния детектор. За калибровъчния коефициент се получава формулата:

$$K = \frac{\Delta E_1}{\Delta E} = \frac{h \cdot \int_{-X_1}^{X_1} \int_{-Y_1}^{Y_1} \int_{-X_2}^{X_2} \int_{-Y_2}^{Y_2} \frac{dx_1 dy_1 dx_2 dy_2}{\{h^2 + (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2\}^{3/2}}}{Z \cdot \int_{-X_1}^{X_1} \int_{-Y_1}^{Y_1} \int_{-X_2}^{X_2} \int_{-Y_2}^{Y_2} \frac{dx_1 dy_1 dx_2 dy_2}{\{Z^2 + (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2\}^{3/2}}} \quad (2.17)$$

Пресмятайки горния израз числено с пакета Mathematica 12, за калибровъчния коефициент се получава $K = 15$.

2.4 Основни резултати от Глава 2

Основните резултати, които могат да се синтезират от изследванията и разработките, представени в тази глава са следните:

1. Описани са научните задачи, конструкцията, принципа и методологията на измерване на основните дозиметрични величини от спектрометъра за измерване

на заредени частици Люлин- МО на спътника TGO на Екзо-Марс. Представени са основните резултати от проведените електронни калибровки и калибровки с радиоактивни източници на Люлин- МО.

2. Описана е методологията за конструиране и изчисление на спектрите на депозиран енергии, спектъра на линейно поглъщане на енергията във вода, средният качествен фактор на радиацията, погълнатата доза, потока частици и дозовия еквивалент.
3. Разработена е методика и е изчислен калибровъчния коефициент, по който трябва да се умножи дозата, получена от телескопа на Люлин- МО, за да се получи пълната доза в единичния детектор.

Глава 3. Изследване на дозата, потока космическа радиация, спектъра на линейно поглъщане на енергията и дозовия еквивалент по трасето и в орбити около Марс

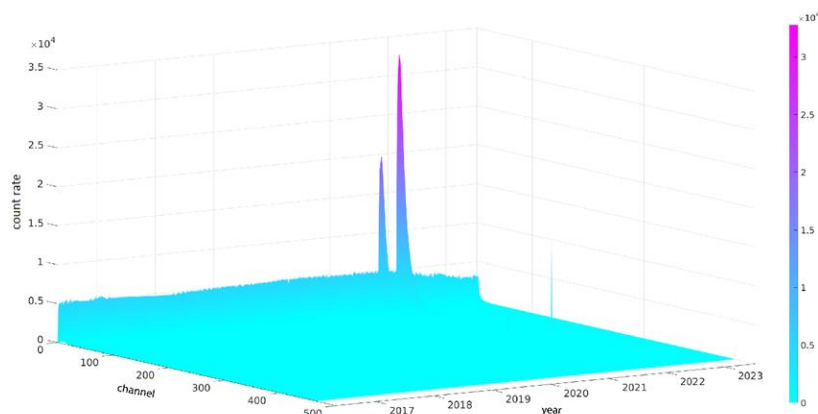
3.1 Резултати от измерване на мощности на дозите и потоците радиация по трасето до Марс, във високоелиптична и кръгова орбита около Марс

Обобщените данни за дозите и потоците ГКЛ измерени за пътуването до Марс, високоелиптична и нискоелиптична орбити са показани на Таблица 3.2 [Semkova et al, 2018].

Таблица 3.2. Измерените дози (D), качествени фактори ($\langle Q \rangle$) и дозови еквиваленти (H) от единичните детектори AB и DC на ЛЮЛИН – МО, за различни фази от научната програма на TGO.

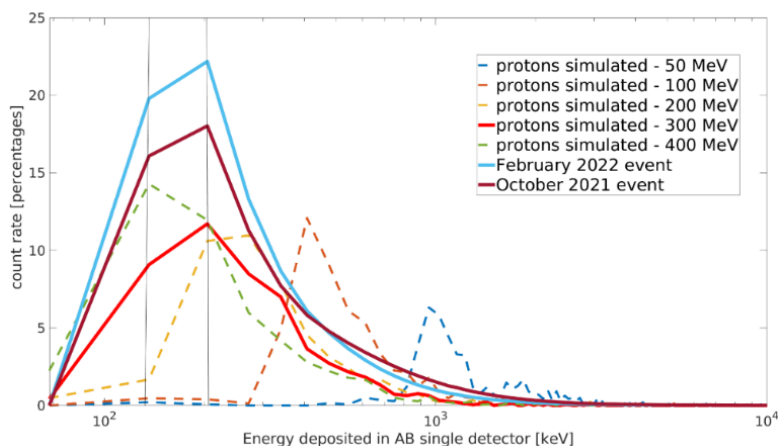
Time Frame	D (Si) (AB) D (Si) (DC) $\mu\text{Gy d}^{-1}$	$\langle Q \rangle$ (AB) $\langle Q \rangle$ (DC)	H (AB) H(DC) mSv d^{-1}
22.04- 15.09.2016 Cruise	372 ± 37 390 ± 39	4.08 ± 0.3 4.02 ± 0.3	1.97 ± 0.4 2.04 ± 0.4
01.11.2016- 17.01.2017 MCO1	405.6 ± 41 422.4 ± 42	4.23 ± 0.3 4.12 ± 0.3	2.23 ± 0.5 2.26 ± 0.5
24.02- 07.03.2017 MCO2	410 ± 41 425 ± 42.5	4.31 ± 0.3 4.17 ± 0.3	2.3 ± 0.55

В научна (кръгова) орбита на Марс в периода май 2018-декември 2019 средната мощност на дозата в детектор B(A) е $14,7 \pm 1,5 \mu\text{Gy h}^{-1}$, в детектор D(C) е $15,3 \pm 1,5 \mu\text{Gy h}^{-1}$. Средният поток е $3,08 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ в B(A) и $3,18 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ в D(C) [Semkova et al, 2020]. Пониските стойности на тези величини в сравнение с измерените по трасето до Марс се дължат на екраниращия ефект на Марс, който е разгледан по-долу.



Фигура 3.7: Зависимост на скоростта на броене от датата и канала за единичния детектор AB.

На Фигура 3.7 са представени всички налични данни за потока частици получени от Liulin-MO от 2016 досега. Отчетливо се виждат двете събития на слънчени енергийни частици (SEP), породени от слънчеви избухвания от октомври 2021 г. и февруари 2022 г. За да се анализират двете събития на SEP се използва числено моделиране. По-долу са изложени основните резултати от [Krastev et al., 2023a]. Направени са серия от числени симулации за протони с различни енергии. Генерирани са 10^8 протони за всяка от енергиите 50, 100, 200, 300, и 400 MeV. Резултатите от симулацията са показани на Фигура 3.8. От фигурата се вижда, че имаме най-добро съвпадение между реалните измервания и симулираните потоци протони с енергии 200 и 300 MeV.



Фигура 3.8: Сравнение между измерените и симулирани count rate.

3.2 Изследване на екраниращия (засенчващ) ефект на Марс върху измерените потоци и мощности на дозите

Получените стойности за потоците ГКЛ измерени във високоелиптична и научни орбити са показани на Фигура 3.13 [Krastev et al, 2019]. И в двата случая се наблюдават резки краткотрайни спадове в данните за потока. Естественото обяснение на тези спадове е ориентацията на плоскостта на детектора, относно Марс. В случай на високоелиптична орбита имаме периодични спадове, които са свързани с преминаването на TGO през перицентъра на орбитата. Колкото по-близо се намира приборът до повърхността на Марс толкова по-голямо е засенчването и по – силен екраниращ ефект има Марс.

В случай на високоелиптична орбита разстоянието до Марс играе по-голяма роля от ориентацията. При научна орбита имаме спорадични спадове, които се дължат изключително на ориентацията на детекторите относно Марс.

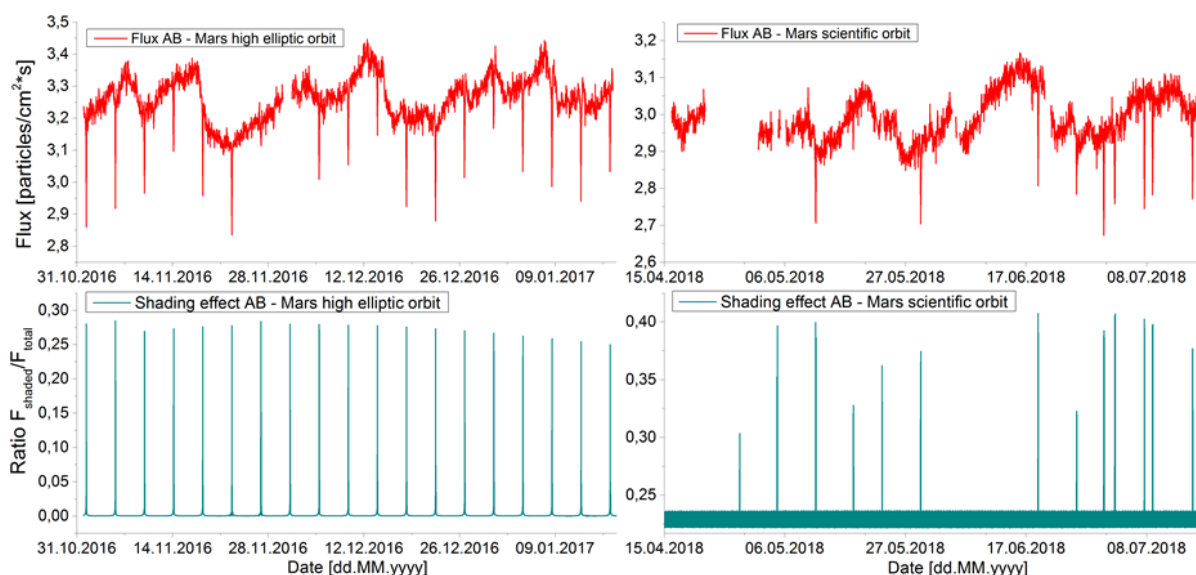
За оценка на изброените ефекти се използват прости геометрични съображения. Когато изчисляваме ефекта от засенчването, пренебрегваме размера на детектора и вземаме предвид само неговата ориентация и разстоянието до Марс. Нека $J(\theta, \varphi)$ обозначава диференциалния поток на ГКЛ, а F_{sh} - частта от потока ГКЛ, засенчена от Марс.

За засенчения поток и съответния коефициент се получава:

$$F_{sh} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_1} J(\theta, \varphi) |\cos \theta'| \sin \theta d\theta d\varphi, \quad K_{sh} = \frac{F_{sh}}{2\pi J(\theta, \varphi)} \quad (3.1)$$

където θ' е ъгълът между нормалата на равнината на детектора и диференциалния поток. $\sin \theta_1 = \frac{\text{Mars radius}}{\text{Distance to Mars}}$, θ_0 е ъгълът между нормалата и направлението към Марс, $2\pi J(\theta, \varphi)$ пълният поток, който би трябвало да регистрира детекторът, ако нямаше екранировка от Марс, K_{sh} – коефициент на засенчване.

Подобни разглеждания за мощностите на дозата показват, че няма зависимост на измерените стойности от коефициента на засенчване.



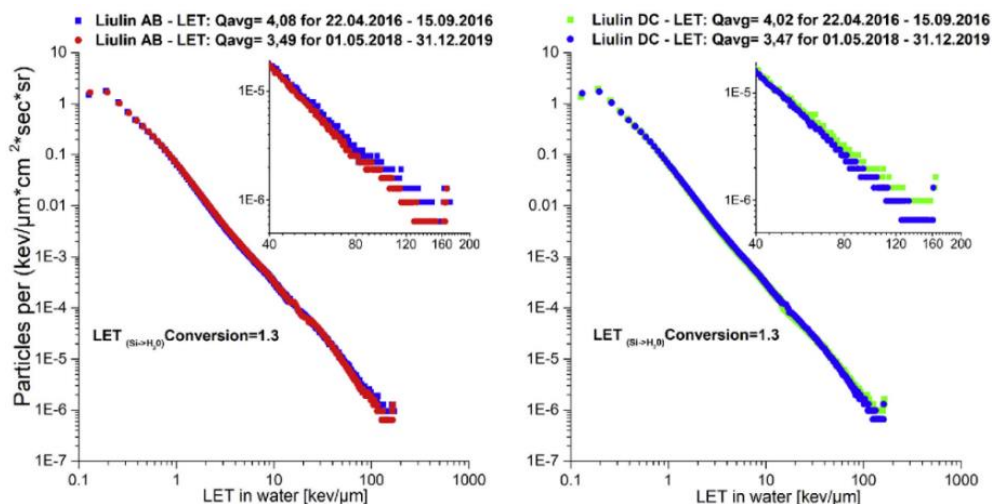
Фигура 3.13: Сравнение между измерените потоци на високоелиптична (леви панели) и научна (десни панели) орбити.

3.3 Определяне на спектъра на линейно поглъщане на енергията, определяне на $\langle Q \rangle$ фактора и дозовия еквивалент по данните от пълния спектър на депозираните енергии в единичните детектори

На Фигура 3.19 са показани LET спектрите и съответните качествени фактори за пътя до Марс и научна орбита [Semkova et al, 2020]. От фигурата се вижда, че качественият фактор пресметнат за времето, през което TGO е на научна орбита, е с 12% по-малък от този за етапа на пътуването.

От уголемените картинки на фигурата се вижда, че разликите в LET спектрите са основно във високия диапазон на спектрите. Като причина отново може да се посочи екраниращия ефект от Марс.

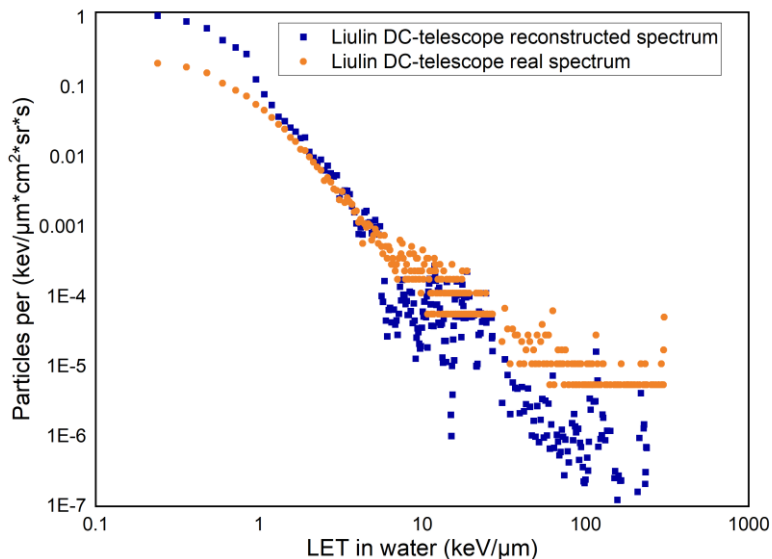
При построяване на LET спектъра за средния път изминат от частиците в детектора се приема стойността 600 μm . Тази стойност е получена от изведена за целта формула.



Фигура 3.19: Построените LET спектри и пресметнатите качествени фактори за единичните детектори AB и DC. Данните са за пътя до Марс (22.04-15.09.2016) и научна орбита (01.05.2018-31.12.2019).

3.4 Резултати от измерване на спектъра на линейно поглъщане на енергията, определяне на Q фактора по данните от телескопите и изводи

При определяне на качествения фактор с помощта на телескопа на Liulin-МО за средната дебелина на детектора, през която преминават ГКЛ се приема стойността 327 μm . При изводът на тази стойност се използват същите идеи както и при единичен детектор.



Фигура 3.25: Измерен и реконструиран спектър за телескопа DC.

Изследванията [Semkova et al, 2018] показват, че ако използваме директно измерените спектри на съвпадение в AB и CD телескопи за оценка на LET спектрите, получаваме твърде високи стойности за качествения фактор на радиацията $\langle Q \rangle$ от GCR (по-високи от 10), което води до нереалистични оценки на дозовия еквивалент. Поради това, до неотдавна за определяне на $\langle Q \rangle$ се използваше LET спектъра от единичните детектори. Беше направено заключение, че при пресмятане на LET спектрите и съответно

качествения фактор от телескопите, трябва да се вземат под внимание ефекти, свързани главно с регистрирането на фалшиви сигнали, получени от съвпадения с вторични частици в спектрите на съвпадение, измерени от телескопите, които са разгледани подробно в глава 4. При анализа и оценката на тези ефекти са проведени поредица от числени симулации, методиката на които е описана в глава 4.

Разработен е алгоритъм, по който се реконструира измереният спектър на депозираните енергии в телескопа (LET спектър), като се изчиства от вторичните ефекти. Реконструираният спектър за телескопа DC е показан на Фигура 3.25.

3.5 Изводи и резултати от Глава 3

Основните резултати и изводите, които могат да се синтезират от изследванията и разработките, представени в тази глава са следните:

Получени са уникални резултати за мощността на дозата и потока частици в междупланетното пространство и в орбити около Марс по данни от апаратурата Liulin-МО (Люлин-МО) на борда на спътника Trace Gas Orbiter на мисията ExoMars.

1. Потоците и мощностите на дозите, регистрирани от 22 април до 15 септември 2016 г. по време на междупланетното пътуване са $15,5 \pm 0,15 \mu\text{Gy h}^{-1}$ и $16,2 \pm 0,16 \mu\text{Gy h}^{-1}$, и съответно $3,12 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ и $3,29 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ в перпендикулярните детектори на апаратурата [Semkova et al, 2018]. В научна (кръгова) орбита на Марс в периода май 2018-декември 2019 средната мощност на дозата е съответно $14,7 \pm 1,5 \mu\text{Gy h}^{-1}$, и $15,3 \pm 1,5 \mu\text{Gy h}^{-1}$. Средният поток е $3,08 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ и $3,18 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ в перпендикулярните детектори на апаратурата. [Semkova et al, 2020]. Изучена е зависимостта на потоците и мощностите на дозите от развитието на цикъла на слънчевата активност. Показано е добро съответствие с измерванията на други апаратури в космоса. Обобщени са всички налични данни за потока частици получени от Liulin-МО от 2016 досега.
2. Моделирани са двете събития на SEP от октомври 2021 г. и февруари 2022 г. и е показано, че основен принос при формиране на двете SEP събития имат протони с енергии между 200 и 300 MeV [Krastev et al, 2023]. Показано е, че геометричните фактори за протони с енергии между 200 и 400 MeV са с 10% по-ниски от аналитично пресметнатите, т.е. измерените потоци от Liulin-МО са с около 10% по-ниски от реалните [Krastev et al, 2023].
3. Изследван е засенчващия ефект на Марс във високоелиптична и кръгова орбити върху измерените потоци и мощности на дозите. Изведени са аналитични зависимости за коефициентите на засенчване на потока и дозата. Изследвана е зависимостта на засенчване от разстоянието до Марс и ориентацията на спътника. Показано е, че засенчването от Марс е основна причина за по-ниските стойности на потоците и мощностите на дозите в орбита около Марс в сравнение с тези в свободното междупланетно пространство [Krastev et al, 2019].

4. Аналитично е изведена средната дължина на пътя ($600 \mu\text{m}$), който изминава частица в единичния детектор с дебелина $300 \mu\text{m}$ с цел правилно определяне на LET спектъра и $\langle Q \rangle$ от спектъра на депозираните енергии в единичен детектор.
5. Построени са спектърът на линейно поглъщане на енергията, определен е $\langle Q \rangle$ факторът и дозовият еквивалент по данните от пълния спектър на депозираните енергии в единичните детектори за етапите на пътуването до Марс ($\langle Q \rangle = 4,08 \pm 0,34$ и $4,02 \pm 0,3$; $H = 1,97 \pm 0,4 \text{ mSvd}^{-1}$ и $2,04 \pm 0,4 \text{ mSvd}^{-1}$ в перпендикулярните детектори) и в орбита около Марс ($\langle Q \rangle = 3,49 \pm 0,29$ и $3,47 \pm 0,29$; $H = 1,6 \pm 0,33 \text{ mSv d}^{-1}$, и $1,65 \pm 0,34 \text{ mSv d}^{-1}$ в перпендикулярните детектори) [Semkova et al, 2018; 2020]. Показано е добро съвпадение (в рамките на неопределеностите на величините) с измерените от апаратурата RAD на NASA MSL по време на нейното пътуване до Марс.
6. Аналитично е изведена средната дължина на пътя $327 \mu\text{m}$, който изминава частица в детектора на телескопа на Люлин-МО с цел правилно определяне на LET спектъра и $\langle Q \rangle$ от спектъра на депозираните енергии в телескопа.
7. Разработен е алгоритъм, базиран на числени симулации, описани в Глава 4 [Krastev et al, 2022], по който се реконструира експериментално получения LET спектър от телескопа и се изчиства от фалшиви сигнали, предизвикани от съвпадения с вторични частици. Алгоритъмът е приложен за определяне на $\langle Q \rangle$ по експерименталните данни за LET спектъра от телескопите за етапа на пътуването. Получените $\langle Q \rangle = 3,9 \pm 0,29$ за телескопа АВ и $\langle Q \rangle = 3,7 \pm 0,27$ за телескопа СD са в добро съвпадение (в рамките на неопределеностите на величините) с определените от единичните детектори стойности. Това демонстрира коректността и надеждността на създадения алгоритъм за реконструиране на измерения LET спектър.
8. Част от резултатите в тази глава са отразени в 1 публикация с импакт фактор и в 4 сборника с доклади от международни конференции. В 3 от докладите в пълен текст докторантът е водещ автор.

Глава 4. Моделиране на екранировката на детекторите на Люлин-МО и на процеса на измерване на спектъра на линейно поглъщане на енергията в телескопите.

4.1 Цел и задачи на моделирането

Основната задача, която е разгледана в настоящата работа е моделирането на Люлин – МО (и на прибори от този тип) в среда на изотропно лъчение на галактични космични лъчи. Целта на тази глава е да представи разработената методология за идентифициране и отсяване на фалшивите сигнали за съвпадение в спектрите на LET на ГКЛ, измерени в режим на съвпадение от дозиметъра Liulin-МО по време на транзита към Марс на TGO.

4.1.2 Описание на софтуера

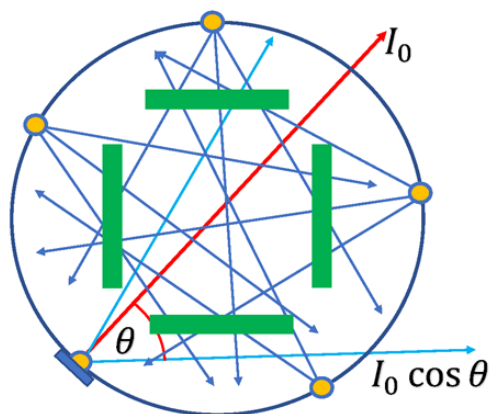
Geant4 е рамката върху която се базира софтуерът, използван при численото моделиране. Geant4 е един от най-мощните пакети, който включва голям набор от възможности и дава голяма свобода при моделирането на най - различни задачи [Agostinelli et al. 2003]. Той е разработен от Geant4 Collaboration (CERN и други институти) на обектно ориентирания език C++. Областта на приложение на Geant4 включва физика на елементарните частици и изследване на ядрените реакции, медицина, ускорители на частици и космически изследвания.

4.2 Моделиране на детекторната система на Люлин-МО при нулева защита.

Описание на модела. Анализ на получените данни. Определяне на моделния спектъра на линейно поглъщане на енергията.

4.2.1 Описание на модела

Основните идеи при създаването на числения модел са взети от статии [Zhao et al.,2013; Pak et al, 2018]. На Фигура 4.5 е показана принципната схема на симулацията. Детекторната система е обозначена със зелен цвят. Системата от детектори се намира във вътрешността на сфера с радиус 15 см.



Фигура 4.5: Принципна схема на модела

Точките от сферата служат като източници на генерирани частици, разпределението на генерираните частици се явява косинусово [Zhao et al., 2013]. Центърът на детекторната система съвпада с центъра на сферата. За всяка частица и съответната ѝ енергия от спектъра на галактичните космични лъчи се генерира потокът частици с еквивалентни на дадената частица характеристики. Периодът от време, който разглеждаме, е полетът до Марс от мисията ExoMars-2016 [Semkova et al, 2018]. Съответното разпределение за потока ГКЛ се взема от базата данни на NASA OLTARIS (<https://oltaris.larc.nasa.gov/>).

Използува се моделът на ГКЛ на Badhwar O'Neil (BON 2020) [Slaba & Withman, 2020]. За всяка от компонентите на ГКЛ се генерират 10^6 частици.

Откликът на детекторната система може да бъде описан чрез геометричния фактор. Дефиницията за геометричен фактор се дава от [Zhao et al.,2013]:

$$G = \frac{C}{J}, \quad (4.1)$$

където C е count rate (скорост на броене) на детектора [s^{-1}], J е диференциалният поток ГКЛ [$s^{-1}cm^{-2}sr^{-1}$].

За симулирания геометричен фактор имаме [Zhao et al.,2013]:

$$G = \frac{n_0}{J}, \quad (4.2)$$

тук n_0 е броят попадения в детектора получен от симулацията, J е симулираният диференциален поток, стойностите на който за всяка компонента на ГКЛ задаваме от NASA OLTARIS. Симулираният count rate C се пресмята от следния израз:

$$C = \frac{4\pi^2 R^2 n_0}{N} J. \quad (4.5)$$

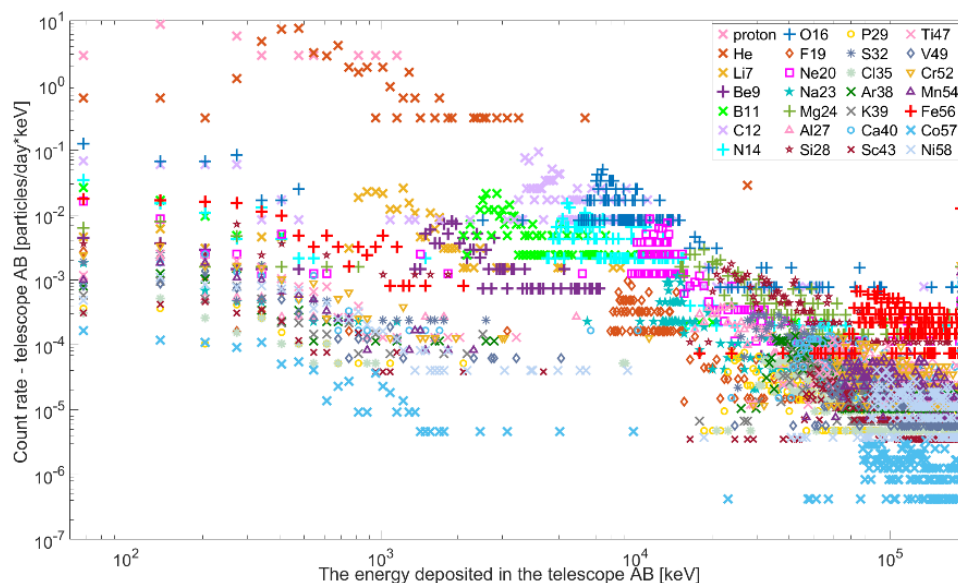
Входните данни на симулацията – геометрията на източника и разпределението на потока по енергии за всяка компонента на ГКЛ от Фигура 4.6, се задават в маско файл. Изходните данни от симулацията се записват във формат .csv. За всеки от четирите детектора записваме номера на симулираната частица, при положение че тя или вторичните частици породени от нея, попаднат в чувствителната област на детектора. Други данни, които съдържа изходният .csv файл са енергията на регистрираната частица (първична или вторична), вида на частицата, брой взаимодействия и т.н.

4.2.2 Анализ на получените данни

Моделът, който бе описан в предишния параграф се прилага за всяка една от компонентите на ГКЛ, взети от NASA OLTARIS.

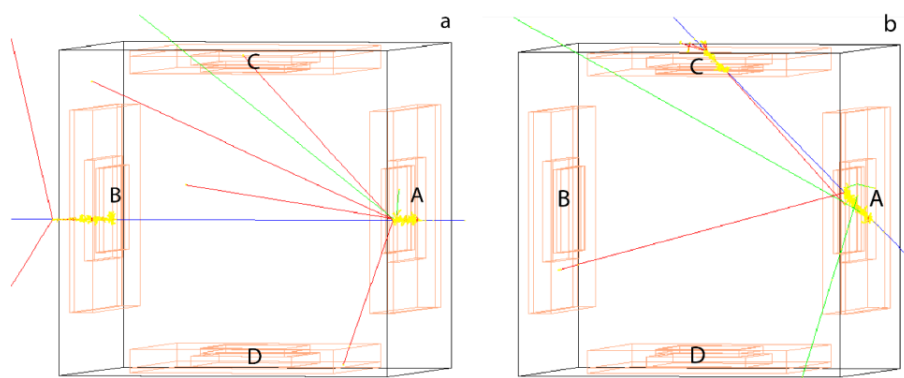
Резултатите са представени на Фигура 4.8, която показва симулацията на депозираната енергия за всяка една от компонентите на ГКЛ, регистрирани в телескопа АВ при нулева защита на детекторите. Симулациите и резултатите за телескопа АВ при нулева защита, описани по-долу, се отнасят и до телескопа СD, тъй като двата телескопа са еднакви. От фигура 4.8 се вижда, че най-голям принос във високоенергийната част имат йоните на желязото Fe56. Нискоенергийната част се определя основно от показанията на протоните и alpha частиците.

На Фигура 4.9 са показани двата типа фалшиви сигнали, които формират ниския и високия енергиен диапазон на депозираните енергии. Фалшивите сигнали, които се формират при регистрация на вторични частици във всеки от двата детектора попадат в ниския диапазон. Фалшивите сигнали, при които първична частица се регистрира само в единият детектор съставляващ телескопа, а в другия детектор се регистрира вторична частица, попадат във високоенергийния диапазон.



Фигура 4.8: Count rate за всяка една компонента на ГКЛ пресметнат от симулацията при нулева защита на детекторите.

Въвежда се понятието *изчистен спектър*. Под изчистен спектър се разбира спектърът, получен при условие, че и в двата детектора се регистрират типът частици, чиито отклик моделираме. Друг термин, който се въвежда, е *идеална геометрия*. Тук под идеална геометрия разбираме случая, при който генерираните частици не променят направлението на своето движение при преминаването си през веществото.



Фигура 4.9: Примери за истински и фалишив сигнал: а) Тежка частица (показана в синьо) преминава през всеки от детекторите А и В, съставляващи телескопа АВ. Това е пример за истинско съвпадение. Тук фалишивият сигнал се формира от DC телескопа. Детекторите D и C регистрират в режим на съвпадение вторични електрони и дават фалиливо съвпадение; б) Тежка частица (в синьо) преминава само през един от детекторите (детектор А), регистрира се съвпадение, предизвикано от попадането на вторични частици (в червено) в детектор В. В случая имаме фалиливо съвпадение.

Стойността за геометричния фактор на телескопа АВ, получена аналитично е $1,38 \text{ cm}^2 \text{ sr}$. Тази стойност се приема за геометричен фактор на телескопа при идеална геометрия. Направени са подробни симулации за шест различни ядрени компоненти от спектъра на ГКЛ, чиито депозиранни енергии в детектора попадат в три различни енергийни диапазона (нисък, среден и висок). Различните компоненти, за които е направен подробен анализ

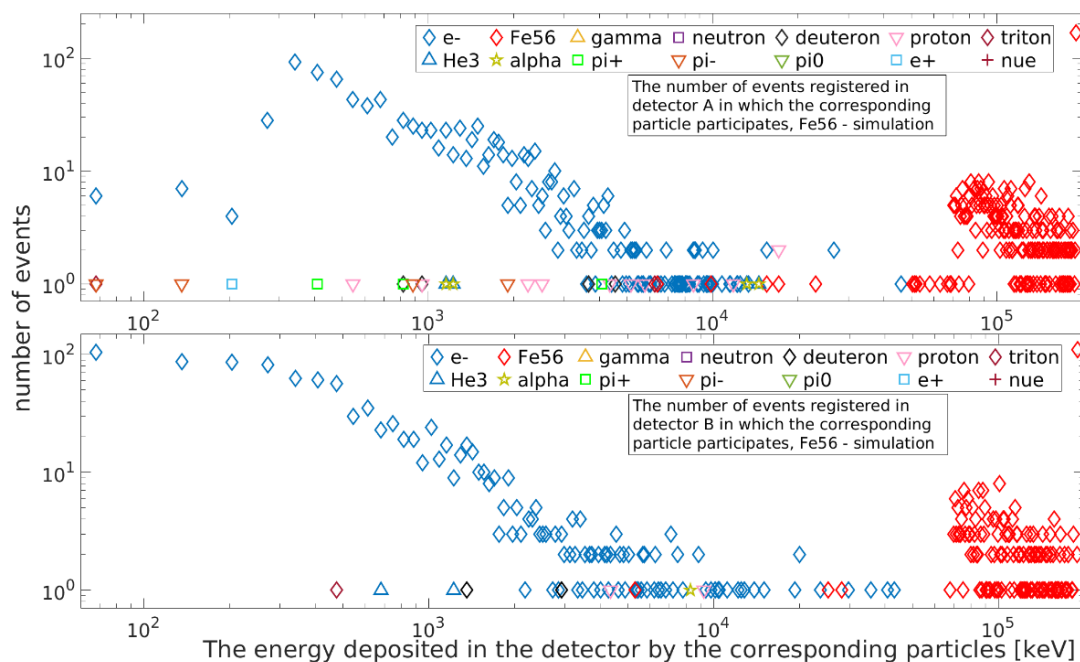
са: протони, alpha частици, йоните на кислорода O16, йоните на магнезий Mg24, йоните на желязото Fe56 и йоните на никела Ni58.

Table 4.8 Показания на детекторите A и B и на телескопа AB при входен поток от йони на желязото Fe56.

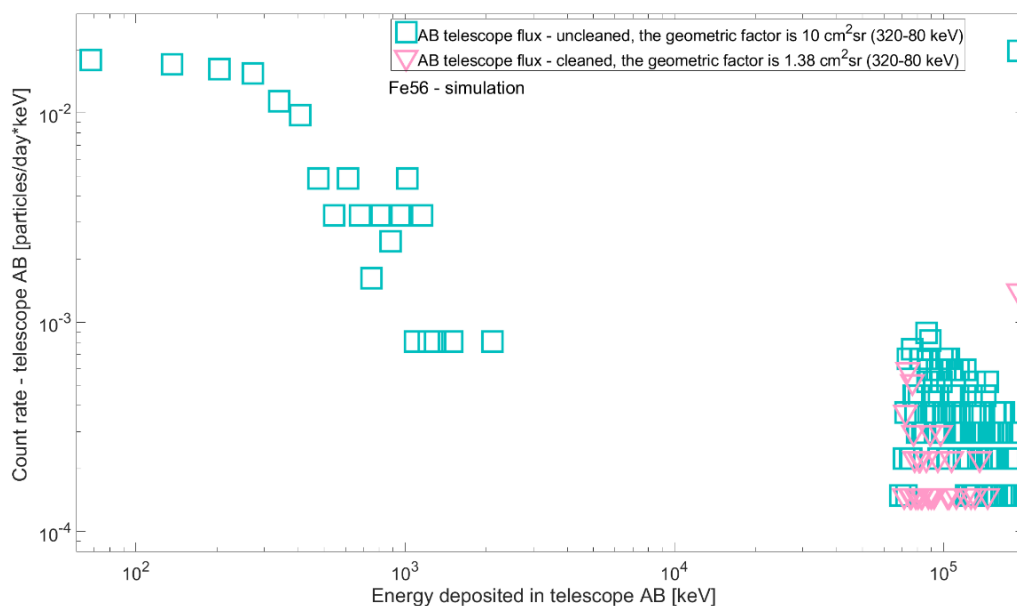
вид частица	Брой рег. събития A	Брой рег. събития B	брой рег. събития A&B	средна деп. енергия A [keV]	средна деп. енергия B [keV]	Общ брой Рег. събития
Fe56	633	386	157	1.91E+05	2.25E+05	1017
e-	999	998	996	1.80E+03	1.29E+03	
gamma	202	143	38	0.0151	0.0182	
neutron	11	4	4	0	0	
deuteron	6	2	2	1.71E+03	2.19E+03	
proton	13	2	2	6.03E+03	6.82E+03	
triton	5	2	2	3.86E+03	2.70E+02	
He3	2	2	1	3.18E+03	1.00E+03	
alpha	4	1	0	7.56E+03	8.34E+03	
pi+	4	1	1	1.36E+03	66.4001	
pi-	4	1	1	7.61E+02	30.0639	
pi0	3	1	0	0	0	
e+	3	0	0	1.04E+02	0	
nu_e	4	0	0	0	0	

В таблица 4.8 са представени данните получени при симулацията на йоните на желязото. При генерирани 10^6 йони на Fe56, регистрираните събития са 1017. Броят събития, при които в детектор A попадат йони на Fe56 е 633, а броят събития, в които йони на Fe56 попадат в детектор B е 386. Събитията, при които имаме регистрация на йони на желязо в детектор A и B едновременно е 157. Събитията, при които йоните на желязото не са регистрирани в никой от двата детектора са $1017 - (633 + 386 - 157) = 155$. Имаме $1017 - 157 = 860$ фалшиви събития. Процентът на фалшивите от всички събития е 84%. Процентът на броя събития, при които електрони попадат в даден детектор, от съответния брой събития за йони на желязото Fe56, е 157% за детектор A и 258% за детектор B. Същият процент за останалите вторични частици е пренебрежимо малък. Наличието на пи-мезони, деутрони и други вторични частици показва, че част от йоните на желязото са участвали в ядрени реакции при преминаването си през детекторите.

На Фигура 4.20 е показано в кои енергийни диапазони се позиционират различните частици от таблица 4.8. На Фигура 4.21 е показан симулирания count rate за неизчистения и изчистения спектри на Fe56. Съответните стойности за геометричния фактор са 10 и $1,38 \text{ cm}^2 \text{ sr}$. Геометричен фактор $10 \text{ cm}^2 \text{ sr}$ означава, че регистрираните сигнали са 724% от тези за идеална геометрия. При сравнението на фигури 4.20 и 4.21 се вижда, че нискоенергийния диапазон за неизчистения спектър, е получен главно от регистрация на електрони и в двата детектора. При същото сравнение се вижда, че фалшивите сигнали във високоенергийния диапазон, се получават при регистрация на йони на желязото от детектор A и регистрация на вторични частици, основно електрони, от детектор B.



Фигура 4.20: Брой регистрирани събития за всяка от частиците, които са регистрирани в детектор А (горен плот) и детектор В (долен плот) при симулация на желязо Fe56



Фигура 4.21: Count rate пресметнат за желязо Fe56 от спектъра на ГКЛ, за неизчистен и изчистен спектри.

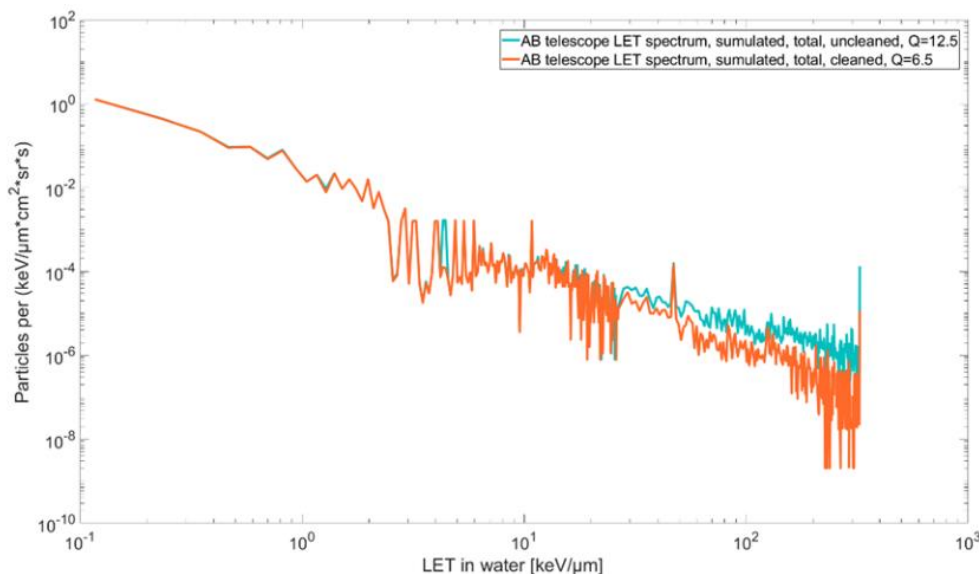
Получените резултати в този параграф може да се обобщят по следния начин:

- Праг на сработване 320 на 80 keV за сигналите от детекторите А (С) и В (D) оказва влияние само върху спектъра на протоните.
- За протони и alpha частици, вторичните частици породени при взаимодействието с детектора нямат значителен принос при формирането на фалшиви сигнали. Реално изчистеният и неизчистен спектър съвпадат.

- с) При симулация с тежки йони се поражда по-широк спектър от вторични частици. Имаме голям брой фалшиви събития, във формирането на които решаваща роля имат електроните.

4.2.3 Определяне на моделния спектър на линейно поглъщане на енергията

На Фигура 4.28 са построени LET спектрите за изчистения и неизчистен спектър, и са показани получените от тях $\langle Q \rangle$.



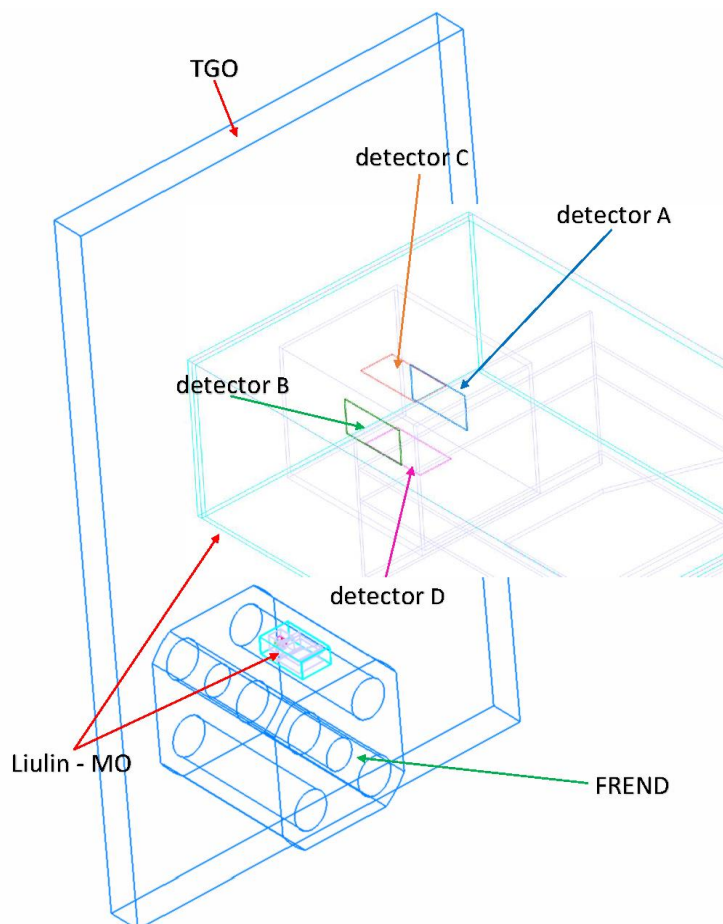
Фигура 4.28: Неизчистен и изчистен LET спектър за телескопа AB получен при праг на сработване 80-80 keV

Основният извод, който може да се направи от получените резултати в този параграф е, че стойностите получени за качествения фактор, са силно завишени за неизчистения LET спектър в сравнение с тези на изчистения. Това потвърждава, че при пресмятането на качествения фактор не може да ползваме директно неизчистения LET спектър, определен от телескопа.

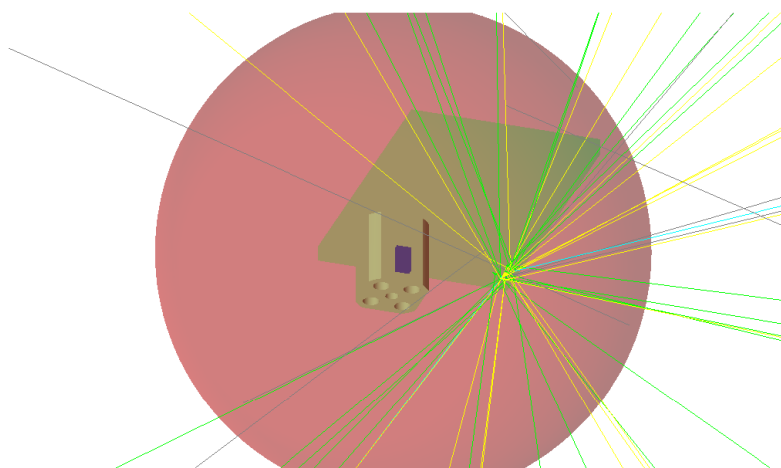
4.3 Моделиране на екранировката на детекторите на Люлин-МО от конструкцията на Люлин-МО, FRENД и TGO. Определяне на моделния спектър на линейно поглъщане на енергията и сравнение с измерванията.

4.3.1 Описание на модела

Моделът, който се използва в този параграф е идентичен на този, който бе разгледан в предишните раздели. Единствената разлика е, че в този случай се отчита сумарният екраниращ ефект от конструкциите на Люлин-МО, FRENД и TGO (Фигура 4.31) Източникът на генерирани частици отново се явява сфера. Центърът на сферата съвпада с центъра на детекторната система на Liulin – MO. Радиусът на сферата е 150 см (Фигура 4.33). Броят на генерираните частици е 10^8 за протони и също толкова за α частици. За всяка от останалите компоненти от спектъра на ГКЛ, броят генерирани частици е 10^7 . На фигура 4.31 е показан CAD - моделът, който имитира сумарната защита. За TGO се използва максимално опростена геометрия.



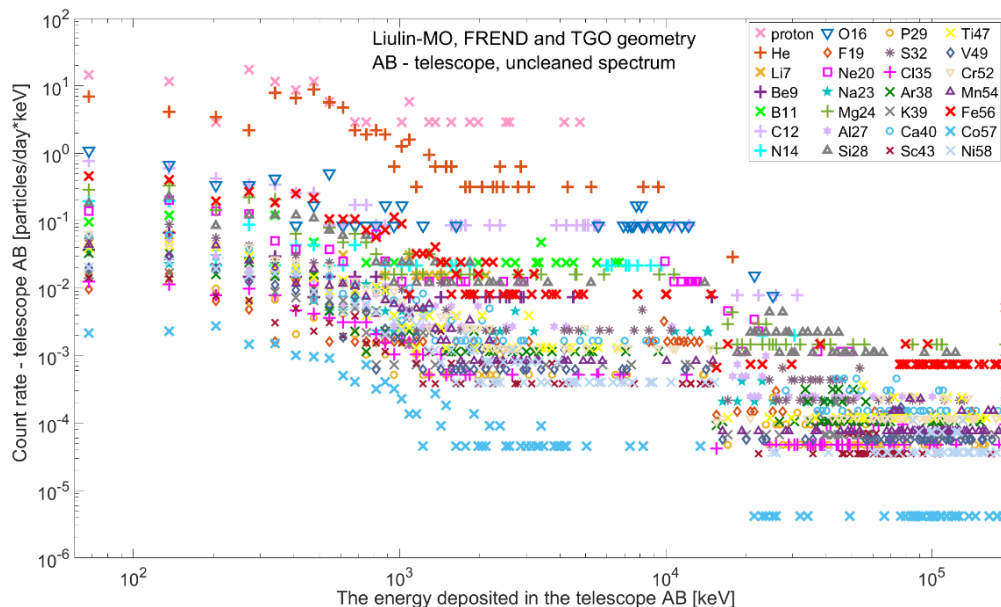
Фигура 4.31: Геометрия на модела, който отчита екранировката от конструкцията на Liulin-MO, FREND и TGO. В увеличен мащаб е показана детекторната система на Liulin-MO.



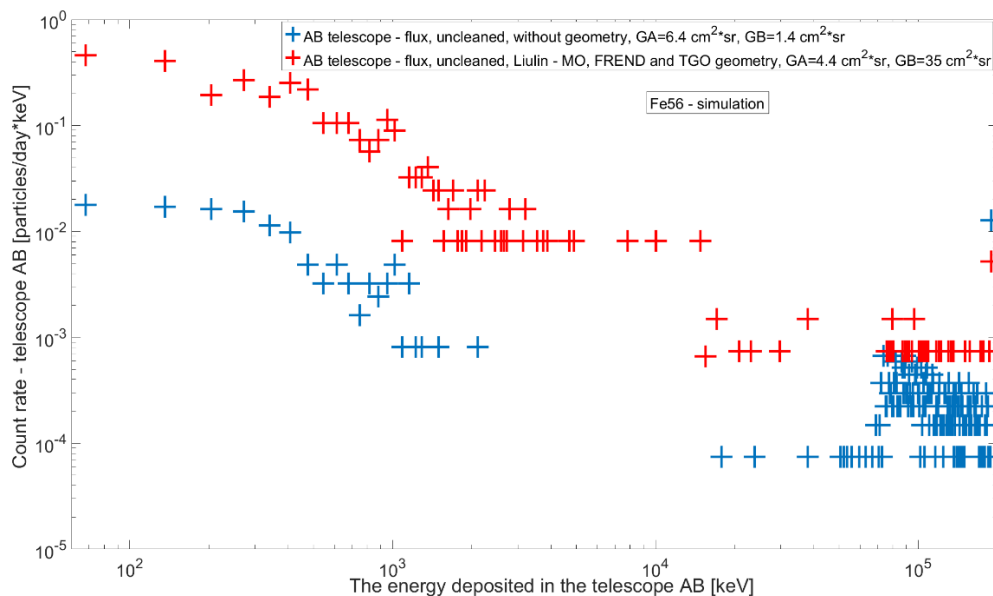
Фигура 4.33: Сферата оцветена в червено, служи като източник на генерирани частици. FREND и TGO са оцветени в зеленикав цвят. Liulin – MO е оцветен в тъмносин цвят. Центърът на детекторната система съвпада с центъра на сферата.

4.3.2 Анализ на получените данни за телескопа АВ

На фигура 4.34 за всяка компонента от спектъра на ГКЛ получен от OLTARIS са представени симулираните спектри, регистрирани от телескопа АВ. Фигурата представя неизчистените count rate. За да се види по-ясно разликата между резултатите показани на фигури 4.8 и 4.34, спектърът на желязото от двете фигури е изобразен на общата Фигура 4.35.



Фигура 4.34: Count rate (неизчистен) на телескопа АВ, за всяка една компонента на ГКЛ, пресметнат от симулацията. Защитата включва Люлин-МО, FRENД и TGO.



Фигура 4.35: Count rate (неизчистен) на телескопа АВ, за Fe56 от спектъра на ГКЛ, пресметнат от симулацията за случаите без защита и със защита от конструкцията. Защитата включва Люлин-МО, FRENД и TGO.

От фигура 4.35 се вижда, че геометричният фактор GB за нискоенергийния диапазон, получен в случай на защита е $35 \text{ cm}^2 \text{ sr}$, а същият този фактор GB при случай на нулева защита е $1.4 \text{ cm}^2 \text{ sr}$. Може да се каже, че ролята на електроните при регистрация на събития рязко нараства в случай на защита на детекторната система. Напротив във високоенергийния диапазон геометричният фактор в случай на защита е по-малък от този за нулева защита. Това може да се обясни с екранирането на част от потока ГКЛ от конструкцията на Люлин-МО, FRENД и TGO.

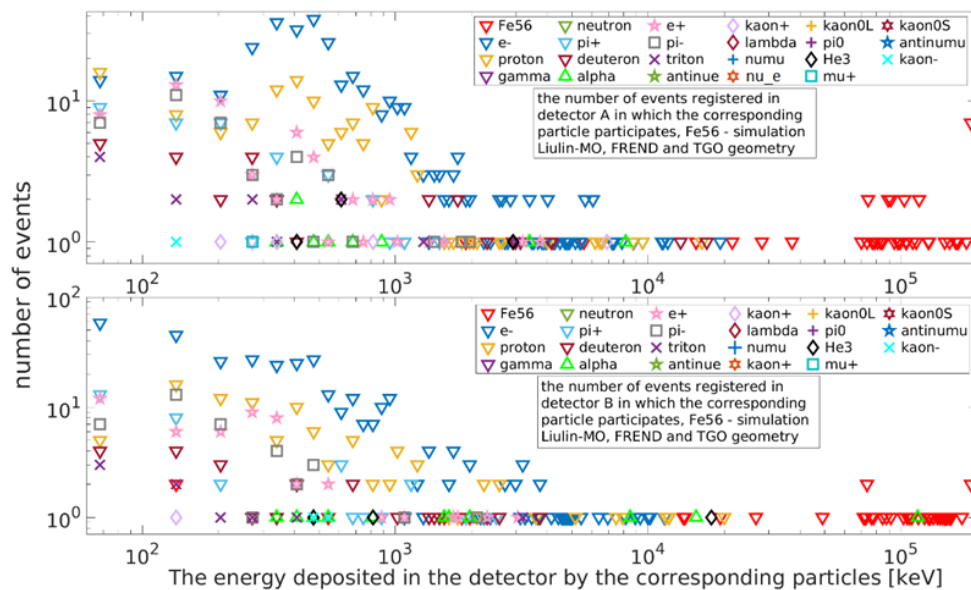
Резултатите от симулацията с йоните на желязото са показани на Таблица 4.14. При генерирани 10^7 желязни йони, общият брой регистрирани събития е 475. Имаме 58 събития, при които йони на желязото се регистрират в детектор А, броят събития, при които йони на желязото се регистрират в детектор В е 48. Броят събития, при които йони на желязото се регистрират едновременно и в двата детектора е 8. Броят събития, при които йони на желязото не попадат в никой от двата детектора е $475 - (58 + 48 - 8) = 377$.

Таблица 4.14: Показания на детекторите А и В и телескопа АВ при входен поток от йони на Fe56. Защитата включва Люлин-МО, FRENД и TGO.

вид частица	брой рег. Събития А	брой рег. събития В	брой рег. събития А&В	средна деп. енергия А [keV]	средна деп. енергия В [keV]	общ брой рег. събития
Fe56	58	48	8	1.14E+05	9.17E+04	475
e-	368	367	328	1.18E+03	9.18E+02	
proton	138	103	76	1.07E+03	1.21E+03	
gamma	293	301	223	0.006463276	0.005	
neutron	108	105	64	0	0	
pi+	38	38	13	3.45E+02	492	
deuteron	29	24	9	1.95E+03	767	
alpha	9	11	2	1.73E+03	1.36E+04	
e+	61	53	24	502	431	
pi-	42	39	15	376	309	
triton	13	10	2	557	544	
anti_nu_e	10	3	0	0	0	
kaon+	5	1	0	1.73E+03	188	
lambda	3	0	0	0	0	
nu_mu	2	1	1	0	0	
nu_e	5	2	0	0	0	
kaon0L	3	0	0	0	0	
pi0	1	0	0	0	0	
He3	4	3	0	1.17E+03	6.51E+03	
mu+	1	0	0	308	0	
kaon0S	2	0	0	0	0	
anti_nu_mu	2	0	0	0	0	
kaon-	5	2	0	1.73E+03	522	

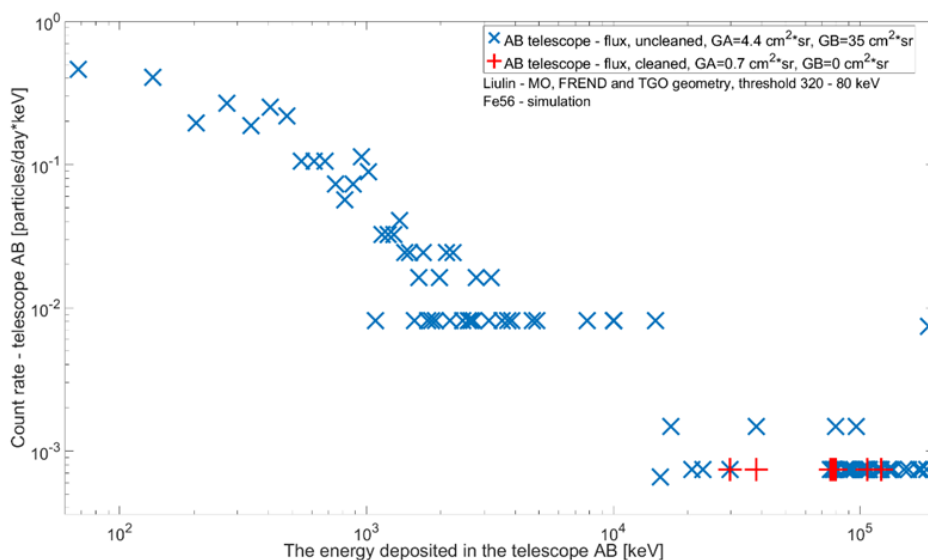
На Фигура 4.47 е показано в кои енергийни интервали се регистрират различните частици. Нискоенергийният спектър се формира основно от електрони, протони, позитрони и пи-мезони. На Фигура 4.48 са показани неизчистеният и изчистеният count

rate за желязната компонента на ГКЛ. Съответните геометрични фактори са $GA=4.4\text{ cm}^2\text{sr}$ и $GB=35\text{ cm}^2\text{sr}$ за неизчистения спектър и $GA=0.7\text{ cm}^2\text{sr}$ и $GB=0\text{ cm}^2\text{sr}$.



Фигура 4.47: Брой регистрирани събития за всяка от частиците, които са регистрирани в детектор А (горен плот) и детектор В (долен плот) при симулация на йони на желязото. Защитата включва Люлин-МО, FRENД и TGO.

Геометричен фактор $GB=35\text{ cm}^2\text{sr}$ за неизчистен спектър означава, че регистрираните събития в нискоенергийния диапазон са 2500% от тези за идеална геометрия. Геометричен фактор $GA=2.6\text{ cm}^2\text{sr}$ означава, че регистрираните събития във високоенергийния интервал са над 188% от тези за идеална геометрия. За изчистения спектър сумарният геометричен фактор $GA+GB=0.7\text{ cm}^2\text{sr}$, което означава, че 50% от потока на йоните на желязото са погълнати от защитата.



Фигура 4.48: Count rate пресметнат за йони на желязото от спектъра на ГКЛ, за неизчистен и изчистен спектри. Защитата включва Люлин-МО, FRENД и TGO.

4.3.3 Анализ на получените данни за телескопа CD

Анализът на резултатите от този параграф се припокрива напълно с този направен в 4.3.2. Основната разлика е повишеният процент спрени от защитата първични частици.

Таблица 4.22: Обобщени данни от симулациите

	GHU	GLU	GHC	GLC	% stoping	% e (AorC)	% e (BorD)	% NON(HorL)	%falce
proton	0	0.11	0	0.1	?	8	9	0	8
He	0.01	1.37	0.01	1.26	1	13	11	0	7
O16	0.56	1.65	0.2	1.115	4	74	100	0.7	40
Mg24	2.66	0.27	1.22	0.11	3	100	160	3	57
Fe56	6.4	1.38	1.38	0	0	157	258	15	84
Ni58	7.6	1.87	1.24	0	10	165	278	17	88
proton	0	0.38	0	0.23	?	30	39	16	39
He	0.01	1.98	0	1.11	20	44	50	38	44
O16	0.27	6.3	0.01	1.42	?	203	284	59	77
Mg24	2.57	10.56	0.8	0.18	40	294	411	64	91
Fe56	4.43	35	0.7	0	50	634	764	79	98
Ni58	6	43	0.98	0.09	22	675	902	82	97
proton	0	0.39	0	0.2	?	50	50	26	48
He	0	1.96	0	0.7	50	71	77	56	64
O16	0.6	7.4	0	0.7	50	250	518	70	91
Mg24	3.4	10	0.44	0.44	36	220	721	63	93
Fe56	4.8	38	0.62	0.09	50	656	1142	83	98
Ni58	5.4	48	0.44	0.08	62	828	1450	86	99

На таблица 4.22 са представени обобщените данни за трите разгледани случаи-при нулева защита на детекторите и при защита от Люлин-МО, FRENД и TGO за всеки от двата телескопа АВ и CD. В първа колонка са означенията на шестте разгледани представители от спектъра на ГКЛ. Обозначенията са в същия ред, в който са разгледани при трите симулации - съответно нулева защита за АВ, защита от Люлин-МО, FRENД и TGO за АВ, и защита от Люлин-МО, FRENД и TGO за CD.

Втората колонка съдържа геометричните фактори, получени от детекторите, които мерят във високоенергийния диапазон. Трета колонка съдържа геометричните фактори, получени от детекторите, които мерят в нискоенергийния диапазон. Втора и трета колонка се отнасят за неизчистените спектри. Четвърта колонка съдържа геометричните фактори, получени от детекторите, които мерят във високоенергийния диапазон. Пета колонка съдържа геометричните фактори, получени от детекторите, които мерят в нискоенергийния диапазон. Четвърта и пета колонка се отнасят за изчистените спектри. Шеста колонка дава какъв процент от падащия поток йони, се спира от защитата. Седма и осма колонка дават процента на броя събития, при които електрони попадат в дадения детектор, от броя събития за съответната частица от първа колонка. Девета колонка дава процента регистрирани събития, при които типът първоначални частици не попада в никой от двата детектора на телескопа. Последната колонка дава процента на фалшиви сигнали от общия брой регистрирани събития. **От последните две колонки се вижда, че с нарастване на заряда на йона, нараства и броят на**

фалшивите сигнали. При най-тежките ядра процентът на фалшиви сигнали се приближава плътно до 100%.

Тук се въвеждат понятията *фалшиви сигнали от I и II род*. Под фалшив сигнал от I род разбираме тези сигнали, които се формират при регистрация на изследваната частица от само един от детекторите, а съвпадение дава попадение на вторична частица в другия детектор. Фалшиво събитие от II род е това събитие, при което и в двата детектора попадат само вторични частици. **Анализът на данните показва, че в случай, когато няма защита, фалшивите сигнали са основно от I род, в случай на защита фалшивите сигнали са основно от II род. Фалшиви сигнали от II род се получават основно при регистрация на електрони и попадат в нискоенергийния диапазон на депозираните енергии. Тези сигнали нямат значителен принос при определяне на стойността на качествения фактор.**

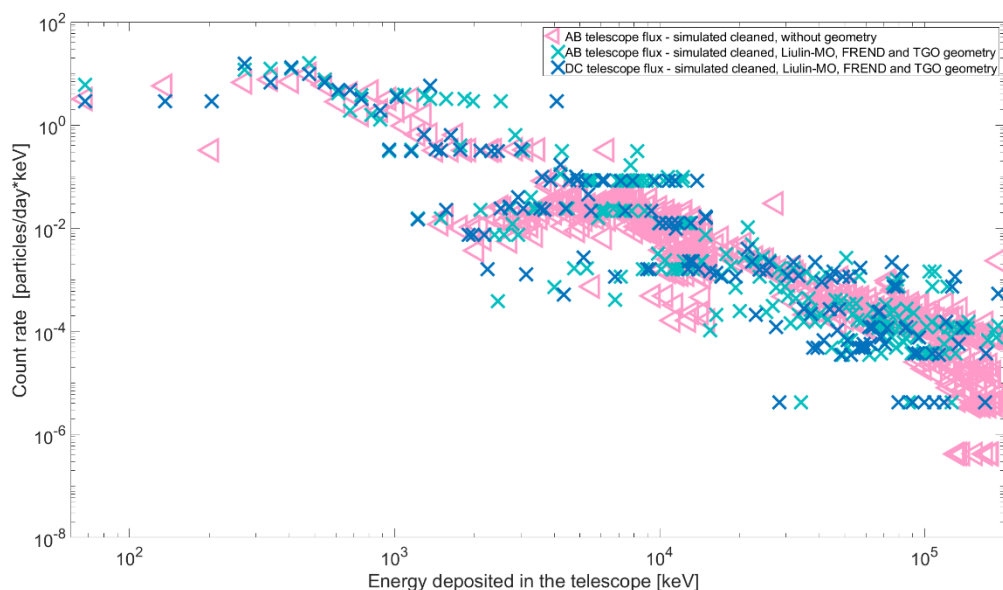
4.3.4 Определяне на моделния спектър на линейно поглъщане на енергията.

Сравнение на моделни и експериментални резултати за LET спектри и $\langle Q \rangle$

Построени са LET спектрите (изчистени и неизчистени) за телескопите AB и CD, получени от симулацията за нулева защита, а така също в случай на защита, включваща конструкциите на Люлин – MO, FRENД и TGO. От получените LET спектри са получени съответните качествени фактори.

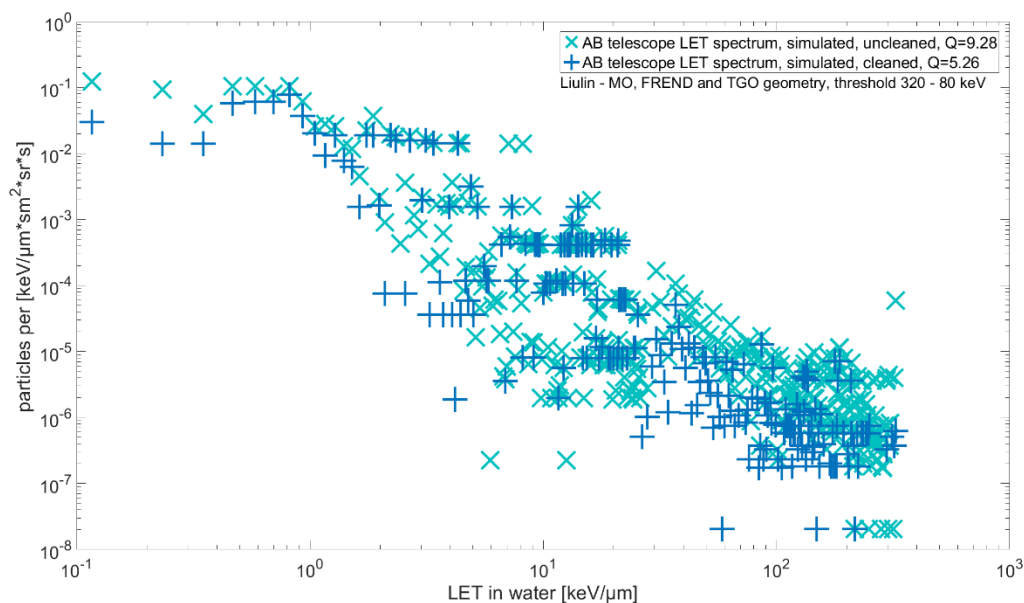
Получената стойност за качествения фактор $\langle Q \rangle = 4,43$ от изчистените спектри, е средно със 16 % по-висока от експериментално получените $\langle Q \rangle = 3,9 \pm 0,29$ от дозиметъра Liulin-MO по време на транзита на ExoMars до Марс [Semkova, J., et al, 2018] и $\langle Q \rangle = 3,82 \pm 0,28$, получена от инструмент RAD на борда на NASA MSL по време на пътуването му до Марс [Zeitlin, C., et al. 2013]. Ако причислим събитията, които са депозирали енергии по-ниски от йонизационния минимум към фалшивите събития, то за $\langle Q \rangle$ се получава стойност 3.6, близка до експериментално получените величини в рамките на техните погрешности.

Фигура 4.69 представя сумарните изчистени спектри за случаите на нулева защита (за телескопа AB) и за защита от конструктивните елементи (и за двата телескопа AB и CD). Вижда се разликата между спектрите получени при отчитане на защитата и този за нулева защита.



Фигура 4.69: Сумарните спектри на депозираните енергии (изчистени) за телескопите АВ и DC, получени от симулацията. Защитата включва Люлин-МО, FREND и TGO. За телескопа АВ е показан и спектър за нулева защита.

На Фигура 4.70 е построен изчистения и неизчистен LET спектър получен от телескопа АВ за защита от Люлин-МО, FREND и TGO. Качествените фактори за изчистения и неизчистен спектри са съответно 5.26 и 9.28. Получените стойности за качествените фактори са с 36 % по-ниски от тези при нулева защита. За неизчистените спектри това може да се обясни с деветата колонка от таблица 4.22. Както бе отбелязано по-горе,



Фигура 4.70: LET спектър за телескопа АВ получен при праг на сработване 320-80 keV. Защитата включва Люлин-МО, FREND и TGO.

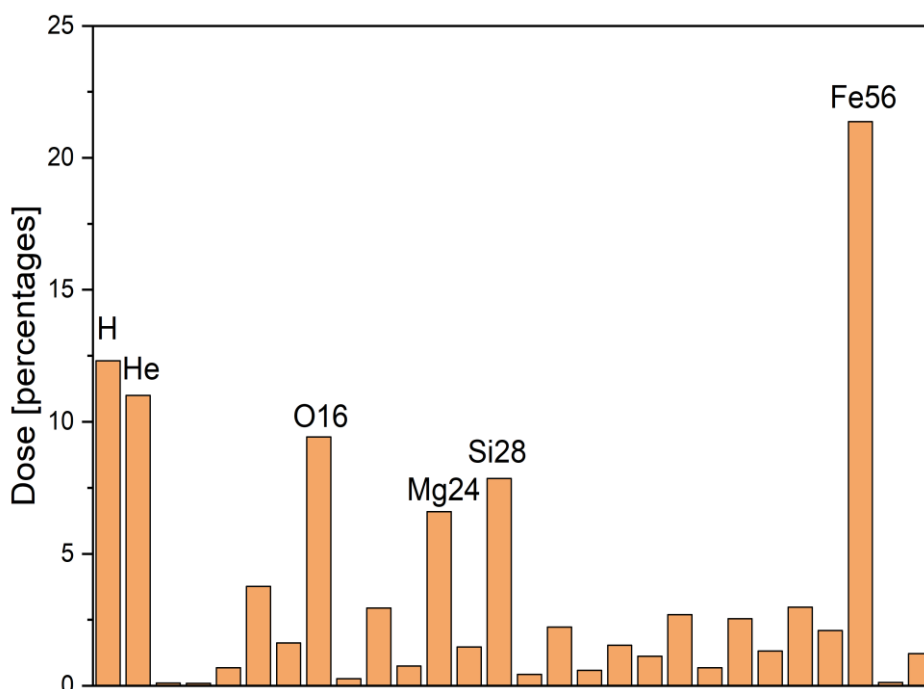
фалшивите сигнали от II род нямат значителен принос при определяне на стойността на качествения фактор, напротив фалшивите сигнали от I род, които преобладават в случай на нулева защита, депозират високи енергии и дават завишени стойности за качествения фактор. Стойностите за изчистения спектър при ненулева защита, също са занижени с

около 38% от тези за нулева защита. Това може да се обясни със стойностите на шестата колонка от таблица 4.22. Вижда се, че процентът на спрените най-тежки йони е по-голям от този за по-леките йони. Разликата между тези проценти нараства при увеличена защита. По-тежките йони депозират по-високи енергии, откъдето се получават по-високи стойности за качествения фактор.

4.3.5 Допълнителни резултати

В този раздел изследванията разглеждат защита, която отчита само конструкцията на Liulin-МО. Основните резултати са представени в [Кръстев К. и др., 2022]. Разглежданията са направени само за телескопа DC тъй като двата телескопа имат еквивалентни защиты от материалите и конструкцията на Люлин-МО.

Показан е приносът (Фигура 4.80) на всяка компонента от спектъра на ГКЛ към сумарната доза. Вижда се, че най-голям принос има желязото, въпреки че процентът на броя железни йони е 0.03 от броя на протоните. Голям принос към сумарната доза имат и йоните на кислород, магнезий и силиций заради по - високото си процентно съдържание в общия спектър на ГКЛ.



Фигура 4.80: Приносът на отделните компоненти от спектъра на ГКЛ към сумарната доза, в проценти. Данните са получени за телескопа DC. Защитата включва Люлин-МО

4.3.6 Изводи и резултати

Основните резултати и изводите, които могат да се синтезират от изследванията, представени в тази глава са следните:

1. Направена е числена симулация на апаратурата Liulin-МО за измерване на космическата радиация на борда на спътника Trace Gas Orbiter по време на полета му до Марс през април-септември 2016 с използване на софтуера Geant4.

2. Създадена е методология за скрининг на фалшиви вторични сигнали от взаимодействието на първичните ГКЛ с конструкцията на космическия апарат в спектрите на депозираната енергия в телескопите на Люлин-МО и съответно в LET спектрите на ГКЛ.
3. Създаденият числен модел дава резултати, които са близки до експерименталните и изяснява характера на регистрираните сигнали от детекторната система на прибора Liulin-МО.
4. Вторичните частици, които се пораждат при взаимодействие на потока ГКЛ с конструкцията на прибора, са основна причина за завишените стойности за качествения фактор. Вторичните частици изработват фалшиви съвпадения, които силно деформират LET спектъра във високоенергийния диапазон.
5. Стойността на качествения фактор се влияе от прага на сработване. Получената стойност при праг на сработване 320-80 keV е с 20 % по-висока от стойността на качествения фактор, получена за нулев праг на сработване.
6. Стойността на качествения фактор се влияе от защитата. Стойността на качествения фактор за нулева защита е с 40 % по-висока от тази, която е получена при включване на защитата на Люлин-МО, FRENД и TGO. Двете стойности за качествения фактор са получени от изчистените спектри.
7. Получените стойности за качествения фактор са със 16% по-високи от експериментално получените от Liulin – МО и RAD. По-точен резултат $\langle Q \rangle = 3,6$, близък до експерименталните стойности, като се вземат предвид неопределеностите на експерименталните стойности на $\langle Q \rangle$, които са $\pm 7,5\%$, се получава, ако от получения изчистен спектър премахнем допълнително тези сигнали, които депозират енергия по-ниска от минимума на йонизация.
8. Получените резултати ще бъдат приложени за интерпретацията на експериментално получените LET спектри от телескопите на Люлин-МО.
9. Създадената методика може да се използва при проектирането на бъдещи инструменти за измерване на йонизиращо лъчение в условията на космически полет.
10. Част от резултатите в тази глава са публикувани в 2 списания с импакт фактор и в сборника на 1 конференция с международно участие, като в 1 от публикациите и в доклада в пълен текст дисертантът е водещ автор.

Глава 5

Основната цел на настоящата дисертационна работа - да се изследват радиационните условия по трасето и в орбита около Марс по данни от апаратурата Люлин-МО на борда на спътника ЕкзоМарс Trace Gas Orbiter и да се даде максимално точна оценка за компонентите на дозите и потоците космическа радиация (включително вторичната радиация) в междупланетното пространство за съответния период на измервания е постигната.

По първата основна задача е направен анализ и са интерпретирани данните за дозиметричните величини от Люлин-МО, получени по трасето и в орбити около Марс. Решени са подзадачите за: изследване зависимостта на потоците, мощностите на дозите и дозовия еквивалент от развитието на цикъла на слънчевата активност; изследван е засенчващия ефект на Марс във високоелиптична и кръгова орбити на TGO върху измерените потоци и мощности на дозите; моделирани са двете събития на СКЛ от октомври 2021 г. и февруари 2022 и резултатите са сравнени с експерименталните данни; направени са сравнения на основните дозиметрични величини, получени по трасето до Марс с резултатите от измерванията в други мисии; изведена е аналитично средната дължина на пътя, който изминава частица в единичния детектор и в дозиметричния телескоп с цел правилно определяне на LET спектъра от тези детекторни системи и качествения фактор на радиацията.

По втората основна задача на дисертацията - да се изследва влиянието на вторичните частици при формиране на отклика на детекторната система на прибора Люлин-МО са решени следните подзадачи: създаден е числен модел, който възпроизвежда радиационното поле в междупланетното пространство по време на полета до Марс на мисията ЕкзоМарс Trace Gas Orbiter, а така също и съответния отклик на детекторната система на прибора; моделът е приложен за няколко различни защити, имитиращи конструкцията на апарата и тази на TGO; направено е сравнение между получените резултати за различните случаи; получена е оценка за приноса, който имат вторичните частици при формирането на LET спектъра и съответно качествения фактор на радиацията; за всяка компонента от спектъра на ГКЛ е получен съответния отклик на детекторната система; изследван е приноса на вторичните електрони и протони при формиране на допълнителни (фалшиви) сигнали в LET спектъра; определен е приноса към сумарната доза на всяка компонента от спектъра на ГКЛ; на базата на създадената методология за скрининг на фалшиви вторични сигнали от взаимодействието на първичните ГКЛ с конструкцията на космическия апарат в LET спектрите на дозиметричните телескопи на Люлин-МО и съответно в LET спектрите на ГКЛ, е разработен и приложен алгоритъм за изчистване на фалшивите вторични сигнали в експериментално получените LET спектри от телескопите на Люлин-МО (реконструиране на LET спектрите); изчислените от реконструираните LET спектри качествени фактори на радиацията са сравнени с получените от единичните детектори на Люлин-МО, както и с тези от други експерименти в междупланетното пространство и е получен удовлетворителен резултат.

5.1 Благодарности

Преди всичко, бих искал да отправя специални благодарности към ръководителя на моята дисертация Проф. д-р Йорданка Семкова за безкрайното търпение, многобройните

напътствия, полезните съвети и безрезервната подкрепа, оказана по време на работата ми.

Искрено съм благодарен на Доцент Росица Колева, чиято инициативност бе една от основните причини за написването на тази дисертация.

Сърдечни благодарности на Виктор Бенгин за съвместната работа и споделени научни резултати.

Благодаря на целия екип на Люлин – МО, без чийто труд работата по тази дисертация не би била възможна.

Благодаря на екипа на FRENД за съвместната работа и отзивчивост.

Искрено благодаря на Симеон Иванов и Светослав Иванов за помощта при създаването на числения модел.

Благодарен съм на всички колеги, които направиха коментари, препоръки и съвети по време на предзащитата на дисертацията ми и след това. Препоръките са отразени в крайния вариант на дисертацията.

5.2 Авторски приноси

1. Аналитично са пресметнати редица характеристики на апаратурата Люлин-МО: средната дължина на пътя, който изминава частица в единичния детектор с цел правилно определяне на LET спектъра и $\langle Q \rangle$ от спектъра на депозираните енергии в единичен детектор; средната дължина на пътя, който изминава частица в детектора на телескопа на Люлин-МО с цел правилно определяне на LET спектъра и $\langle Q \rangle$ от спектъра на депозираните енергии в телескопа; коефициентът, по който от дозата депозирана в телескопа се преминава към дозата получена в единичния детектор.
2. Изследван е засенчващия ефект на Марс във високоелиптична и кръгова орбити върху измерените потоци и мощности на дозите от ГКЛ. Изведени са аналитични зависимости за коефициентите на засенчване на тези величини. Показано е, че засенчването на потока ГКЛ от Марс е основна причина за пониските стойности на потоците и мощностите на дозите в орбита около Марс в сравнение с тези в свободното междупланетно пространство [Krastev et al, 2019].
3. Построени са спектъра на линейно поглъщане на енергията, определен е $\langle Q \rangle$ фактора и дозовия еквивалент по данните от пълния спектър на депозираните енергии в единичните детектори за етапите на пътуването до Марс и в орбита около Марс [Semkova et al, 2018; 2020]. Показано е добро съвпадение (в рамките на неопределеностите на величините) с измерените от апаратурата RAD на NASA MSL по време на нейното пътуване до Марс.
4. Моделирани са двете събития на SEP от октомври 2021 г. и февруари 2022 г. и е показано, че основен принос при формиране на двете SEP събития имат протони с енергии между 200 и 300 MeV [Krastev et al, 2023a].
5. Направена е числена симулация на измерванията на Люлин-МО по време на полета му до Марс през април-септември 2016 [Кръстев и др. 2022; Krastev et al,; 2023b]. Използван е софтуера Geant4. Създаденият числен модел дава

резултати, които са близки до експерименталните и изяснява характера на регистрираните сигнали от детекторната система на апаратурата Люлин-МО

6. Създадена е методология за скрининг на фалшиви вторични сигнали от взаимодействието на първичните ГКЛ с конструкцията на космическия апарат в спектрите на депозираната енергия, определени от телескопите на Люлин-МО и съответно в LET спектрите на ГКЛ [Krastev et al, 2023b].
7. Разработен е алгоритъм, базиран на числени симулации, описани в Глава 4, по който се реконструира експериментално получения LET спектър от телескопа и се изчиства от фалшиви сигнали, предизвикани от съвпадения с вторични частици. Алгоритъма е приложен за определяне на $\langle Q \rangle$ по експерименталните данни за LET спектъра от телескопите за етапа на пътуването до Марс на TGO. Получените $\langle Q \rangle$ от 2-та телескопа са в добро съответствие (в рамките на неопределеностите на величините) с определените от единичните детектори стойности. Това демонстрира коректността и надеждността на създадения алгоритъм за реконструиране на измерения LET спектър [Krastev et al, 2023b].

5.3. Бъдещи планове за развитие на тематиката

Космическата дозиметрия е интердисциплинарна област, която предоставя широк спектър от възможности за изследвания и прилагане на нововъведения. Постоянно се усъвършенстват методите и приборите за измерване на космическа радиация, като Институтът за космически изследвания и технологии на БАН е един от водещите в тази област. Докторантът цели да внесе своя принос в усъвършенстване на съществуващите методики и разработването на нови такива. Близките бъдещи дейности включват анализ и интерпретация на новополучаваните данни от експеримента „Люлин-МО“ на ЕкзоМарс TGO.

Също така близките бъдещи дейности извън дисертацията включват повторна обработка на данните за LET спектрите, качествените фактори на радиацията и дозовите еквиваленти от ГКЛ и албедото, получени от Люлин-МО в орбитата на Марс, като се използва подобен числен модел, методология и алгоритъм на тези в дисертацията, и сравнение с публикуваните данни, получени, когато използваме разработения по-рано метод за изчисляване на LET от спектрите на депозираните енергии в единичните детектори.

5.4 Списък на публикациите на автора, използвани в дисертацията

1. **Krastev, K.** et al, 2023b, Numerical simulation of Liulin-MO instrument for measuring cosmic radiation onboard Exomars Trace Gas Orbiter, Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences, Tome 76, No , 2023, accepted for publication with document (IF 0.329, Q3)
2. **Krastev K.**, et al (2023a). Numerical Simulation of the LIULIN-MO Device, pp.88-94, Proceedings of the 15th Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere” June, 2023, ISSN 2367-7570, pp.88-94 <https://spaceclimate.bas.bg/ws-sozopol/>, DOI: 10.31401//WS.2023.proc
3. **Красимир Кръстев** и др., 2022. Числено моделиране на прибора Liulin-MO, PROCEEDINGS, EIGHTEENTH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE, SPACE, ECOLOGY, SAFETY, SES 2022, 19 – 21 October 2022, Sofia,

Bulgaria , p-ISSN 2603 – 3313, e-ISSN 2603 – 3321, стр. 18-22,
http://www.space.bas.bg/SES/archive/SES%202022_DOKLADI/contentsBG.html

4. **Krastev K.**, Semkova J., Koleva R., Bankov N., Benghin V., Drobishev S. The Shading Effect for Doses and Galactic Cosmic Rays Fluxes Measured by Liulin Instrument, Depending on Liulin - Mars Geometry, Proceedings of Eleventh Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere” Primorsko, Bulgaria, June 3÷7, 2019, , <https://spaceclimate.bas.bg/ws-sozopol/pdf/Proceedings2019.pdf>, pp.31-35
5. Semkova, J., Koleva, R., Benghin V, Dachev, T.,Matviichuk, Yu., Tomov, B., **Krastev, K.**, et al, RADIATION ENVIRONMENT IN THE INTERPLANETARY SPACE AND MARS’ ORBIT ACCORDING FRENDS’ LIULIN-MO DOSIMETER ABOARD EXOMARS TGO DATA, Book of THE ELEVENTH MOSCOW SOLAR SYSTEM SYMPOSIUM 11M-S3, October 5-9, 2020, SPACE RESEARCH INSTITUTE OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES MOSCOW, RUSSIA, ISBN- 978-5-00015-050-4, pp 22-24, DOI: 0.21046/11MS3-2020.
6. Jordanka Semkova, Rositza Koleva, Victor Benghin , Tsvetan Dachev, Yuri Matviichuk, Borislav Tomov, **Krasimir Krastev**, Charged particles radiation measurements with Liulin-MO dosimeter of FRENDS instrument aboard ExoMars Trace Gas Orbiter during the transit and in high elliptic Mars orbit, Icarus, Volume 303, 15 March 2018, Pages 53-66, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.12.034> (IF 3.2, Q1)

5.5 Списък на публикациите, използвани и цитирани в автореферата

- Agostinelli et al. „Geant4 – a simulation toolkit“, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol. 506, Issue 3, Pages 250-303, 2003.
- Anderson, C. „The Positive Electron“ Phys. Rev. 43 (1933) 491
- Armenteros R. et al, Decay of V-Particles“, Nature, volume 167, pages 501–503 (1951)
- Badhwar D. G., Martian Radiation Environment Experiment (Marie), 2001 Mars Odyssey, pp 131–142
- Cucinotta, F.A., et al., 2010. „Space radiation risk limits and Earth–Moon–Mars environmental models“. Space Weather 8(12), <http://dx.doi.org/10.1029/2009SW000564>
- Cucinotta FA, To K, Cacao E (2017) Predictions of space radiation fatality risk for exploration missions. Life Sci Space Res 13:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2017.01.005>
- Da Pieve, F., et al. (2021). Radiation environment and doses on Mars at Oxia Planum and Mawrth Vallis: Support for exploration at sites with high biosignature preservation potential. Journal of Geophysical Research: Planets, 126 (1), e2020JE006488
- Dachev, Ts. P., et al, "MIR" radiation dosimetry results during the solar proton events in September - October 1989, Adv. Space. Res., 12, No. 2-3, p. (2) 321, 1992, doi:10.1016/0273-1177(92)90122-E
- Dachev Ts. P., et al, Inner Magnetosphere Variations after Solar Proton Events. Observations on MIR Space Station In 1989-1994 Time Period, Adv. Space Reas., vol. 22, No 4, pp. 521 - 526, 1998, doi:10.1016/S0273-1177(98)01073-4

- Dachev, Ts., et al., Calibration Results Obtained With Liulin-4 Type Dosimeters, *Adv. Space Res.*, 30(4), 917-925 (2002), [http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00411-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00411-8)
- Dartnell, L., Desorgher, L., Ward, J., & Coates, A. 2007, *GeoRL*, 34, L02207
- De Angelis, G., et al. (2006). Modeling of the Martian environment for radiation analysis. *Radiation Measurements*, 41(9), 1097–1102
- Durante, M., Cucinotta, F. A., Physical basis of radiation protection in space travel. *REVIEWS OF MODERN PHYSICS*, VOLUME 83, No 4, OCTOBER–DECEMBER 2011, pp. 1245-1281
- Ehresmann, B., et al. (2011). Influence of higher atmospheric pressure on the Martian radiation environment: Implications for possible habitability in the Noachian epoch. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116(A10). <https://doi.org/10.1029/2011ja016616>
- Gonçalves P. et al, Validation of dMEREM, the Detailed Mars Energetic Radiation Environment Model, with RAD Data from the Surface of Mars, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 9, (2022), doi: 10.3389/fspas.2022.833144
- Gronoff, G., Norman, R. B., & Mertens, C. (2015). Computation of cosmic ray ionization and dose at Mars. I: A comparison of HZETRN and Planetocosmics for proton and a particles. *Advances in Space Research*, 55(7), 1799–1805
- Grotzinger, J. P., et al. Mars Science Laboratory Mission and Science Investigation Published: 25 July 2012, volume 170, pages5–56 (2012)
- Guo J, et al., Modeling the variations of dose rate measured by RAD during the First MSL Martian Year: 2012–2014. 2015, *Astrophys J* 810(1): 24, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/810/1/24>
- Guo, J., et al (2021). Radiation environment for future human exploration on the surface of Mars: The current understanding based on MSL/RAD dose measurements. *Astronomy and Astrophysics Review*, 29(1), 1–81, <https://doi.org/10.1007/s00159-021-00136-5>
- Guo J. et al., (2023). The First Ground Level Enhancement Seen on Three Planetary Surfaces: Earth, Moon, and Mars, *Geophys. Res. Lett.* 2023, 50, e2023GL103069, <https://doi.org/10.1029/2023GL103069>
- Hassler, D. M. Et al., The Radiation Assessment Detector (RAD) Investigation, September 2012, *Space Sci Rev* (2012) 170:5–56
- Hess V., *Phys. Zeit.* 13 (1912) 1084
- ICRP, 2013. Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space. ICRP Publication 123. *Ann. ICRP* 42(4).
- Krastev K., et al, (2019) The Shading Effect for Doses and Galactic Cosmic Rays Fluxes Measured by Liulin Instrument, Depending on Liulin - Mars Geometry, *Proceedings of Eleventh Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere” Primorsko, Bulgaria, June 3÷7, 2019*
- Krastev K., et al (2023a). Numerical Simulation of the LIULIN-MO Device, pp.88-94, *Proceedings of the 15th Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere” June, 2023, ISSN 2367-7570, pp.88-94, <https://spaceclimate.bas.bg/ws-sozopol/>, DOI: 10.31401//WS.2023.proc*
- Krastev, K. et al, 2023b, Numerical simulation of Liulin-MO instrument for measuring cosmic radiation onboard Exomars Trace Gas Orbiter, *Comptes rendus de l’Académie bulgare des Sciences*, Tome 76, No , 2023, accepted for publication with document

- Kuznetsov N. et al, „Empirical model of long-time variations of galactic cosmic ray particle fluxes: Long-Time Variations of Galactic Cosmic Ray Particle Fluxes“, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Volume 122, Issue 2, Pages 1463-1472, 2017
- Letaw, J.R., Silberberg, R., Tsao, C.H., Radiation hazards on space missions outside the magnetosphere, *Advances in Space Research*, Volume 9, Issue 10, 1989, Pages 285-291, [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(89\)90451-1](https://doi.org/10.1016/0273-1177(89)90451-1)
- Letour, J. R. and S. Clearwater, 1986. Radiation Shielding Requirements on Long-durations Space Missions, SCC Report 86-02, Severn Communications Corporation.
- Litvak, M.L., et al. Mars neutron radiation environment from HEND/Odyssey and DAN/MSL observations, *Planetary and Space Science* 184 (2020) 104866, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104866>
- Litvac et al, Observations of neutron radiation environment during Odyssey cruise to Mars, *Life Sciences in Space Research*, Volume 29, May 2021, Pages 53-62, <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.03.003>
- Lobakov, A. P., et al. , Increase of solar cosmic rays on the 'MIR' space station in orbit during September-October 1989, *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, Volume 20, Issue 1, 59-64, January 1992, doi:10.1016/1359-0189(92)90086-B
- Matthiä D. et al, „A Ready-to-use Galactic Cosmic Ray Model“, *Advances in Space Research*, Volume 51, Issue 3, Pages 329-338, 2013.
- Matthiä, D., et al. (2016). The Martian surface radiation environment - a comparison of models and MSL/RAD measurements. *The Journal of Space Weather and Space Climate*.6, A13
- Matthiä, D., & Berger, T. (2017). The radiation environment on the surface of Mars - Numerical calculations of the galactic component with GEANT4/PLANETOCOSMICS. *Life Sciences and Space Research* 14, 57–63]
- McKenna-Lawlor, S., et al. (2012). Characterization of the particle radiation environment at three potential landing sites on Mars using ESAs MEREM models. *Icarus*, 218(1), 723–734
- Mitrofanov et al, Estimation of the Neutron Component of the Radiation Background in the Gale Crater on Mars, July 2023, *Solar System Research*, 57(3):191-199, DOI: 10.1134/S0038094623030073
- Neddermeyer S. and Anderson C., „ Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles“ *Phys. Rev.* 51, 884 – Published 15 May 1937
- Pak S. et al., „A numerical method to analyze geometric factors of a space particle detector relative to omnidirectional proton and electron fluxes“, *Journal of the Korean Astronomical Society*, August 2018.
- Petrov, M.V., et al., , Peculiarities of the Solar Proton Events of October 19, 1989 and March 23, 1991 According to the Measurements On Board the MIR Space Station, *Adv. Space Res.*, V 14, No.10, (10)645, 1994., doi:10.1016/0273-1177(94)90520-7
- Reames, D.V. (2013) The Two Sources of Solar Energetic Particles. *Space Sci Rev* 175, 53–92. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9958-9>
- Rochester G. and Butler C., *Nature* 160, 885 (1947).
- Röstel, L., et al, (2020) Subsurface radiation environment of Mars and its implication for shielding protection of future habitats, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125 (3), e2019JE006246. doi: 10.1029/2019JE006246

- Saganti, P. B., et al. (2004). Radiation climate map for analyzing risks to astronauts on the Mars surface from galactic cosmic rays. *Space Science Reviews*, 110(1–2), 143–156.
- Schwadron, N. A., et al (2010). Galactic cosmic ray radiation hazard in the unusual extended solar minimum between solar cycles 23 and 24. *Space Weather*, 8, S00E04. <https://doi.org/10.1029/2010SW00056>
- Semkova, J., et al, 2018. Charged particles radiation measurements with Liulin-MO dosimeter of FRENDD instrument aboard ExoMars Trace Gas Orbiter during the transit and in high elliptic Mars orbit, *Icarus*, Vol. 303, Pp 53-66, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.12.034>
- Semkova, J., et al, RADIATION ENVIRONMENT IN THE INTERPLANETARY SPACE AND MARS'ORBIT ACCORDING FRENDD'S LIULIN-MO DOSIMETER, Book of THE ELEVENTH MOSCOW SOLAR SYSTEM SYMPOSIUM 11M-S3, October 5-9, 2020, SPACE RESEARCH INSTITUTE OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES, MOSCOW, RUSSIA, ISBN- 978-5-00015-050-4, pp 22-24, DOI: 0.21046/11MS3-2020.
- Shavers et al, Space agency-specific standards for crew dose and risk assessment of ionising radiation exposures for the International Space Station, *Zeitschrift für Medizinische Physik*, <https://doi.org/10.1016/j.zemedi.2023.06.005>, 2023.
- Shurshakov, V. A., et al, Solar particle events observed on MIR station, *Radiation Measurements*, Volume 30, Issue 3, 317-325, 1999., doi:10.1016/S1350-4487(99)00058-X
- Slaba T. & K. Withman, „The Badhwar-O'Neill 2020 GCR Model“, *AGU*, Volume18, Issue 6, 2020
- Tang, S., Wang, Y., Zhao, H., et al. 2020, *E&PP*, 4, 355
- Usoskin I., L. Desorgher (2009) Ionization of the Earth's atmosphere by solar and galactic cosmic rays, *Acta Geophys.*, 57(1), 88–101.
- Velinov P. I. Y (1966) An expression for ionospheric electron production rate by cosmic rays. *C. R. Acad. Bulg. Sci.*, 19(2), 109-112.
- Velinov P. I. Y., Asenovski S., Kudela K., Lastovicka J., Mateev L. et al. (2013) Impact of cosmic rays and solar energetic particles on the Earth's ionosphere and atmosphere. *J. Space Weath. Space Clim.*, 3, A14, 1-17. DOI:<http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2013036>
- Velinov, P. (2022) Major X-Class Solar Flare from Earth-Facing Active Region AR12887 on October 28, 2021 and First Cosmic Ray GLE 73 in Solar Cycle 25, *C. R. Acad. Bulg. Sci.*75 (2), 248-258.
- Walsh L, et al (2019) Research plans in Europe for radiation health hazard assessment in exploratory space missions. *Life Sci Space Res* 21:73–82. <https://doi.org/10.1016/J.LSSR.2019.04.002>
- Zeitlin, C., et al. 2013. Measurements of Energetic Particle Radiation in Transit to Mars on the Mars Science Laboratory, *Science* 340, 1080 (2013)
- Zhao X. et al., „A Geometric Factor Calculation Method Based on the Isotropic Flux Assumption“, *CP*, 37, 126201, 2013.
- Бенгин, В.В., и др. , Динамика радиационных условий на трассе станции "Мир" во время солнечного протонного события 29 сентября 1989 г., *Известия-РАН, серия физическая*, 55, 10, 1901, 1991

- Бенгин, В. В., и др. , Исследование радиационной обстановки на борту станции "МИР" во время солнечного протонного события 29 сентября 1989 г. с помощью дозиметра-радиометра "Люлин", Космические исследования, 30, 5, 700, 1992.
- Кръстев К. и др., 2022. Числено моделиране на прибора Liulin-MO, PROCEEDINGS, EIGHTEENTH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE, SPACE, ECOLOGY, SAFETY, SES 2022, 19 – 21 October 2022, Sofia, Bulgaria , p-ISSN 2603 – 3313, e-ISSN 2603 – 3321, стр. 18-22, http://www.space.bas.bg/SES/archive/SES%202022_DOKLADI/contentsBG.html
- Мирошниченко Л.М., Петров В.М., Dynamics of the radiation conditions in space Динамика радиационных условий в космосе, М:Енергоатомиздат, 1985.