

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Навчально-науковий центр заочної форми навчання

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕТЕКТОРА ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ
КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи ЕППзм – 18 – 1

Сироїд В. С.

Спеціальність 171 «Електроніка»

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Електронні прилади та пристрої»

Керівник доцент Галат О.Б.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

Бондаренко І.М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2019 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Навчально-науковий центр заочної форми навчання

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 171 «Електроніка»

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Електронні прилади та пристрої»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри

I.М.Бондаренко

« » 2019р.

ЗАВДАННЯ

НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Сироїду Вадиму Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження детектора іонізуючого випромінювання для космічних досліджень

затверджена наказом університету від 15 10 2019 року № 203 СТЗ

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 09.12. 2019 р.

3. Вихідні дані до роботи:

3.1 Розрахувати шумові характеристики напівпровідникового детектора випромінювання на основі CdTe/ZnTe з наступними електрофізичними параметрами: $h=0,3\text{cm}$, $D=1\text{cm}$, $U=10\dots 50\text{V}$, концентрація домішки $P=10^7\dots 10^9\text{cm}^{-3}$, $T=270\dots 300\text{K}$.

3.2 У якості вихідного узяти стандартний зарядочутливий підсилювач.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Проаналізувати елементарний та енергетичний склад космічного випромінювання, розподіл потоків випромінювання у просторі.

4.2 Розглянути методи та засоби реєстрації космічного випромінювання.

4.3 Навести порівняльний аналіз сучасних детекторів.

5. Перелік графічного матеріалу з зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) презентація.

Керівник роботи _____ доцент Галат О.Б.
(підпис) (посада, прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка складається з с 72, рис 26, табл. 3, джерел 16.

КОСМІЧНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ДЕТЕКТОР, СПЕКТР, ЕНЕРГІЯ,
НАПІВПРОВІДНИК, МАГНІТНИЙ СПЕКТРОМЕТР, ІОНІЗАЦІЙНИЙ
КАЛОРИМЕТР, ШУМИ, ХАРАКТЕРИСТИКА.

Об'єкт дослідження – детектор іонізуючого випромінювання для реєстрації космічних часток.

Мета роботи – вибір методики та розрахунки шумових характеристик напівпровідникового детектора космічних часток.

Метод дослідження – аналітичний метод порівняння засобів реєстрації космічного випромінювання, вибір найбільш ефективних матеріалів, схем каналу обробки сигналу детектора, аналіз розрахунків шумових характеристик детектора.

Розглянуто методи та засоби реєстрації космічного випромінювання, сучасні напрямки підвищення ефективності систем реєстрації, зокрема використання детекторів CALET, ALICE, DESI. У якості чутливого елемента детектора використовується твердий розчин CdZnTe. Розраховані шумові характеристики детектора, проаналізовані фактори впливу на рівень шумів, запропоновано варіанти зменшення шумів приладу.

Результати роботи можуть використовуватися для проектування систем детектування космічних часток.

ABSTRACT

Explanatory note consists of: p 72, Fig 26, table 3. Sources 16.

COSMIC RADIATION, DETECTOR, SPECTRUM, ENERGY, SEMICONDUCTOR, MAGNETIC SPECTROMETER, IONIZATION CALORIMETER, NOISE, CHARACTER.

The object of study is an ionizing radiation detector for the detection of cosmic particles.

The purpose of the work is to choose the methodology and calculations of the noise characteristics of the semiconductor space particle detector.

The research method is an analytical method for comparing the means of detecting space radiation, the selection of the most effective materials, circuits of the signal processing channel of the detector, the analysis of calculations of the noise characteristics of the detector.

The methods and means of registration of space radiation, modern directions of increase of efficiency of registration systems, in particular use of detectors CALET, ALICE, DESI are considered. The CdZnTe solid solution is used as the sensitive element of the detector. The noise characteristics of the detector are calculated, the factors of influence on the noise level are analyzed, variants of noise reduction of the device are offered.

The results of the work can be used to design systems for detecting space particles.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 КОСМІЧНІ ПРОМЕНІ	10
1.1 Початкові дослідження складу космічного випромінювання	10
1.2 Сучасне уявлення про склад космічного випромінювання	21
1.3. Енергетичні спектри ядер космічних променів	16
2 МЕТОДИ РЕЄСТРАЦІЇ КОСМІЧНИХ ЧАСТОК	23
2.1 Вплив атмосфери на рух космічних часток	23
2.2 Пастки для частинок	25
2.3 Методика вимірювання ШАЗ	28
2.4 Іонізаційний калориметр	33
3 ДЕТЕКТОРИ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	41
3.1 Опис та класифікація детекторів	41
3.2 Детектори для експериментів на прискорювачах та вимоги до них	42
3.3 Універсальний детектор	43
3.4 Детектори для прискорювачів на зустрічних пучках	45
4 ВИКОРИСТАННЯ ДЕТЕКТОРІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ КОСМІЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	47
4.1 Детектор CALET	47
4.2 Використання детектора ALICE у космічних спостереженнях	51
4.3 Детектор DESI використовує 5000 сенсорів	54
5 РОЗРАХУНКИ ШУМОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТЕКТОРА	60
5.1 Методика розрахунку шумових характеристик напівпровідникового детектора	60
5.2 Вихідні дані та формули розрахунків шумових характеристик	63
5.3 Результати моделювання характеристик за допомоги MathCad	65
ВИСНОВКИ	70

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	71
ДОДАТОК А Відомість атестаційної роботи магістра	73
ДОДАТОК Б Презентація	74

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ALICE – A Large Ion Collider Experiment;

ATIC – Advanced Thin Ionization Calorimeter;

CALET – CALorimetric Electron Telescope;

DESI – Dark Energy Spectroscopic Instrument;

RICH – Ring Image CHerenkov detector (черенковський детектор кільцевого зображення);

RHIC – Relativistic Hard Ion Collaider (релятивістський колайдер важких іонів Національної лабораторії Брукхейвена);

STAR – Solenoidal Tracker at RHIC;

LHC – Large Hardron Collaider (Великий адронний колайдер);

CERN – Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (Европейський центр ядерних досліджень);

КП – космічний промінь;

НВЧ – надвисока частота;

НДІВ – напівпровідниковий детектор іонізуючого випромінювання;

РЕК – рентгено-емульсійна камера;

ШАЗ – широка атмосферна злива;

ВСТУП

Споконвічно людина знаходиться під впливом позаземного випромінювання. Сонячне світло дає нам життя, обігріває та освітлює, але може бути шкідливим за деяких умов. Більш далекі зорі, на перший погляд, майже не впливають на життєдіяльність людини, але тільки на перший. Далекі космічні об'єкти спроможні генерувати частки з більшою енергією, потужністю та спрямованістю, які у разі враження людини спроможні суттєво вплинути на її здоров'я. Земна атмосфера захищає нас від більшості таких впливів, але не від усіх.

З іншого боку людство в усі часи дивилося у небо з запитанням: «Що там на зорях, інших планетах?». Космічне випромінювання несе відповідь на це запитання, треба тільки прийняти її та розшифрувати.

Вчені вже досить давно вивчають космічне випромінювання за допомогою телескопів, приладів, що уловлюють невидиму оком складову позаземного випромінювання, але тільки в останні роки ми змогли зазирнути у вкрай далекі області всесвіту. В сучасному світі наукових космічних досліджень неможливо обійтись без приладів реєстрації випромінювань.

Призначення цих приладів – встановити сам факт появи тієї чи іншої частки, точно виміряти напрям, тип і енергію частинок або гамма - квантів. Вирішення цих завдань дозволяє отримати інформацію з далеких глибин космосу про склад, побудову та відносне розміщення космічного об'єкту.

Ключовим елементом у всіх приладах реєстрації випромінювань є детектор випромінювань, чутливість і вибірковість якого визначають характеристики всього приладу в цілому. Твердотільні кристалічні детектори є практично єдиним типом датчиків, що забезпечують як виявлення невидимих випромінювань, так і визначення їх типу і спектру випромінювання, тобто рішення всіх перерахованих вище завдань. Тому розвиток приладобудування у сфері детекторів космічного випромінювання ,

що відбувається в останні роки, направлений, перш за все, на створення нових типів кристалів і детекторів випромінювань на їх основі. Напівпровідникові детектори іонізуючого випромінювання (НДІВ) є найбільш підходящими як первинні елементи таких засобів. НДІВ в даний час широко використовуються для дозиметрії і спектрометрії різних радіаційних джерел, у тому числі позаземних. Велика увага останнім часом приділяється НДІВ на основі широкозонних матеріалів CdTe і CdZnTe, оскільки їх використання дає можливість обійтися без криогенного охолодження. У ряді випадків, наприклад для спектрометрів γ -випромінювання, принципово важливим є досягнення максимальної роздільної здатності по енергії. Важливим для цього є рівень шумів, обумовлений як якістю матеріалу датчика, так і способом його включення в вимірювальну ланцюг. Істотний внесок в шумові характеристики вносять також елементи посилення і обробки сигналу [1,2].

Досвід досліджень в даній області свідчить про те, що основна увага приділяється експериментальним дослідженням і оцінками [2...4].

Метою даної роботи є вибір методики та розрахунки шумових характеристик напівпровідникового детектора космічних часток.

1 КОСМІЧНІ ПРОМЕНІ

1.1 Початкові дослідження складу космічного випромінювання

Питання про склад космічних променів і є, по суті, питання про їхню природу [5]. Перші дослідники космічних частинок вважали, що це - гамма-випромінювання - нейтральні фотони, які падають на атмосферу з космосу. Ця гіпотеза переважала серед багатьох вчених досить тривалий час. Однак, дослідження каскадів вторинних частинок, що спостерігаються в атмосфері, не підтвердили цю гіпотезу.

Першими припустити, що космічні промені - це потік заряджених частинок, були В. Боті і В. Кольхёрстер [5]. Вони виконали ряд дослідів з детекторами радіоактивних випромінювань на землі і виявили, що частинки, котрі реєструються їх приладом, мають більшу проникаючу здатність і не можуть бути народженими при взаємодії фотонів із стінками детекторів. Однак їх висновки з результатів експериментів остаточно не сприймалися, тому що в той час фізика процесів взаємодії частинок з речовиною не була в достатній мірі зрозуміла.

Велику роль в з'ясуванні природи космічних променів зіграли камери Вільсона, що дозволили візуалізувати треки частинок. Експерименти Д.Скобельцина із застосуванням камери і наступні досліді, зроблені Б. Россі, показали, що таємниче космічне випромінювання має досить високою енергією, щоб проникнути крізь великі товщі речовини і при цьому відчуває складні взаємодії як в атмосфері (широкі атмосферні зливи), так і в матеріалі самих детекторів. Тому протягом тривалого часу залишалося відкритим питання про природу первинного випромінювання, тобто про природу тих частинок, які падають безпосередньо на атмосферу.

Давайте згадаємо про те, що наша планета - Земля - магніт. Саме існування магнітного поля Землі зіграло вирішальну роль у визначенні складу того первинного випромінювання, яке і цікавило вчених.

Погляньте на рис. 1.1. Магнітне поле Землі має так звану дипольну форму: у нього є північний і південний полюси, і воно змінюється в залежності від відстані: чим далі від Землі, тим поле слабше, а при заданій відстані воно посилюється в міру наближення до полюсів.

Нейтральні частинки (наприклад, фотони) перетинають магнітне поле, не помічаючи його. Інша справа - заряджені частинки - їх траєкторії скривлюватимуться. Причому радіус кривизни їх траєкторії в магнітному полі буде залежати від їх енергії, а точніше - імпульсу (добуток маси частинки на швидкість - mv).

З теорії відомо співвідношення:

$$E(\text{eV})/Z = 300BR(\text{Гаусс}\cdot\text{см}),$$

зване магнітної жорсткістю. Саме воно і визначає параметри траєкторії частки в магнітному полі. З формули для магнітної жорсткості видно, що траєкторія залежить і від заряду частинки Z : для однократно зарядженої частинки, наприклад, протона радіус кривизни R в магнітному полі B буде більше, ніж для двократно заряджених іона гелію - альфа-частинки з тією ж енергією.

Магнітне поле Землі має форму диполя. Ось диполя зміщена щодо осі обертання Землі на $- 11^\circ$. Тому географічний екватор не збігається з геомагнітних. У магнітному полі первинні заряджені частинки (наприклад, протони) і нейтральні (наприклад, гамма-кванти) поведуться по-різному: перші їм відхиляються, а другі рухаються по прямим траєкторіях

Звідси ясно, що наше магнітне поле може служити приладом, створеним самою природою для визначення складу падаючих на Землю частинок.

Першими, які запропонували використовувати магнітне поле Землі в якості природного сепаратора заряджених і нейтральних частинок, були ті ж В. Боті і В. Кольхёрстер (саме вони на основі своїх експериментів повірили, що первинна компонента космічного випромінювання заряджена, а не нейтральна).

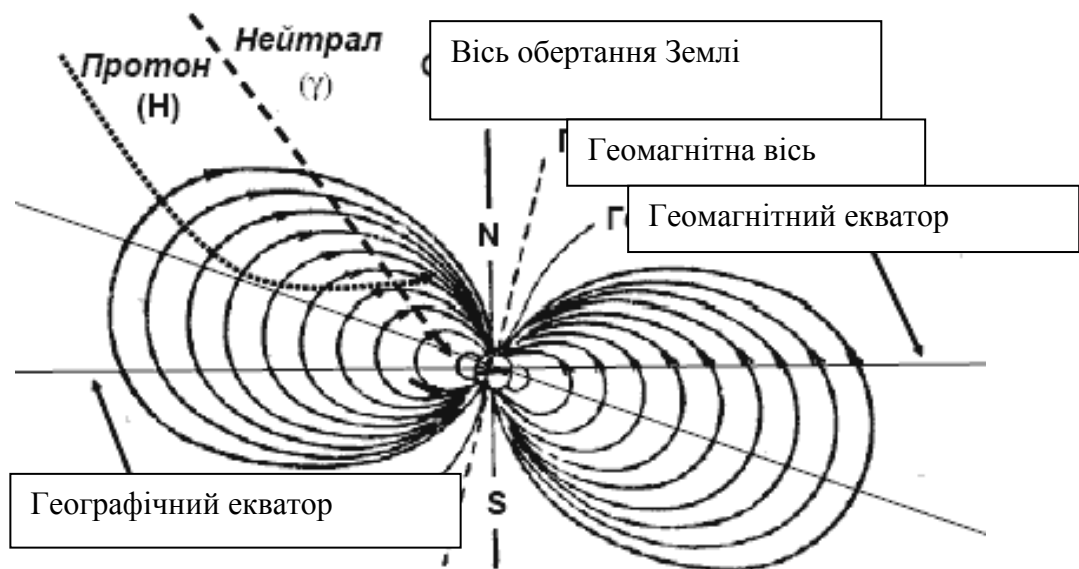


Рисунок 1.1 - Магнітне поле Землі

Голландський фізик Дж. Клей, подорожуючи в 1927 р від Лейдена до Суецького каналу виявив зменшення інтенсивності космічного випромінювання. Це було першою вказівкою на існування широтного ефекту космічних променів - зміни їх інтенсивності в залежності від широти: на екватор, внаслідок дипольного характеру магнітного поля Землі проникає набагато менше частинок, ніж на високі широти.

Не всі цього повірили. Р. Міллікен (саме він назвав невідоме космічне випромінювання космічними променями), не знайшовши помітного ефекту зміни інтенсивності частинок між Болівією і Пасаденою в Каліфорнії (в 1928 р), продовжував наполягати на фотонів гіпотезі походження космічних променів.

Але організовані в 1932 р численні експерименти А. Комптона дали переконливі аргументи на користь альтернативної гіпотези складу космічних променів. Пізніше, в 1936-38 роках, С. Вернов здійснив вимірювання широтного ефекту космічних променів, провівши стратосферні експерименти на кулях-зондах в Індійському океані на теплоході "Серго". Він підтвердив результати, отримані А. Комптоном по дослідженню широтного ефекту і висновку про те, що космічні частинки заряджені. Виявилося, що на екваторі потік космічних променів в 4 рази був менше потоку, що спостерігався на високих широтах. Більш того, він прийшов до висновку, що більша частина первинної космічної радіації складається з електронів і позитронів. Він писав: "Звісно ж найімовірнішим, що первинне космічне випромінювання майже виключно складається з електронів і позитронів". (Відзначимо, що незадовго перед цим, в 1932 р, К. Андерсон відкрив позитивний електрон - позитрон. Цей висновок був невірним. Уже в 1946 році С. Вернов відмовляється від нього, ретельно дослідивши ефекти проходження частинок через атмосферу на великих висотах.

Широтна асиметрія космічного випромінювання не єдина в просторовому розподілі часток, які спостерігаються на Землі. Слід очікувати асиметрії схід-захід, якщо первинні частинки не нейтральні, а заряджені. Позитивно заряджені частинки повинні відхилятися на схід, а негативні - на захід. Б. Россі провів перші експерименти для перевірки цієї гіпотези (1931 р) і не виявив помітного ефекту. Т. Джонсон, здійснюючи подібні експерименти в Мексиці в 1933 р, виявив східно-західну асиметрію приходу первинних частинок. Це стало вказівкою на те, що первинне випромінювання складається з позитивно заряджених частинок. Більшість фізиків до цього вважали, що якщо первинне випромінювання і є зарядженими частинками, то це - негативно заряджені частинки - електрони (і позитрони).

Існування в космічних променях позитронів було виявлено в 1940 р стратосферними експериментами М. Шайна. Більш того, аналізуючи

результати по проходженню космічного випромінювання через різні товщі свинцевою захисту, М. Шайн прийшов до висновку, що воно складається "швидше за все, з протонів". Цей висновок був правильним і отримав підтвердження в роботах по дослідженню процесів взаємодії космічних променів з атмосферою і в експериментах С. Вернова в 1949 р в стратосфері в районі Індійського океану з дослідження східно-західної асиметрії, який нічого не знав про роботи М. Шайна .

Наступний крок в пізнанні природи космічного випромінювання був зроблений за допомогою детекторів, які давали можливість оцінити масу частинки і її енергію. Це - РЕК - ядерні емульсії. Одночасно дві групи дослідників з США під керівництвом Е. Нея, Г. Брадта і Б. Пітерса провели дослідження за допомогою емульсій на висоті 29 км і виявили в них треки важких частинок, що належать до первинного космічного випромінювання. Так були виявлені в космічних променях частки важче протонів. Але їх було значно менше. І це зараз зрозуміло: адже наш Всесвіт майже повністю складається з водню.

Ну, а як бути з електронами, позитрона і фотонами в первинному випромінюванні, що складали основу гіпотези про походження космічних променів аж до 1940 р? Їх теж знайшли в первинному випромінюванні. Але в кількостях, незрівнянно менших по відношенню до протонів.

Так, часом дуже хитромудро і драматично, пролягала траєкторія руху науки до того, що зараз здається очевидним.

1.2 Сучасне уявлення про склад космічного випромінювання

До космічних променів відносяться як заряджені, так і нейтральні частинки: атоми різних елементів від водню до самих "важких" представників періодичної системи Менделєєва, а також такі елементарні частинки, як нейтрони, електрони, мезони та інші. Діапазон їх енергій вкрай великий - досить сказати, що він тягнеться більш ніж на 14-15 порядків

величини. Потоки космічних променів сильно змінюються в залежності від енергії - при малих енергіях їх значно більше, ніж при високих і надвисоких енергіях[5,6].

Більш - 90% частинок космічних променів складають атоми водню, на гелій припадає близько - 7% і менше - 1% - на більш важкі елементи. Атоми космічних променів позбавлені електронних оболонок, тобто по суті, це - повністю іонізовані атоми, або "голі ядра". Причина цього - взаємодія з речовиною в процесі їх перенесення у Всесвіті. Взаємодіючи з нейтральними частинками, вони втрачають свої електронні оболонки (так званий процес перезарядки). Як показують розрахунки, середній шлях, який проходять частинки від місця генерації, достатній, щоб втратити все орбітальні електрони за рахунок взаємодій з космічної середовищем.

Природно задатися питанням: як хімічний склад космічних променів співвідноситься зі складом зірок у Всесвіті, зі складом найближчої до нас зірки - Сонця? Відповідь дано в таблиці 1.1., Де наводиться відносний вміст різних елементів в складі космічних променів, на Сонце і в зірках.

Можна бачити, що склад космічних променів приблизно відповідає поширеності елементів у Всесвіті за винятком двох випадків: по-перше, в космічних променях спостерігається значно більше легких ядер (Li, Be, B) і, по-друге, - важких ядер - поблизу заліза.

Таблиця 1.1 -. Зміст деяких елементів в космічних променях (КП) на Сонці і в зірках щодо ядер кисню (O).

Елемент	КП	Сонце	Зорі
H	685	1445	925
He	48	91	150
Li	0.3	$<10^{-5}$	$<10^{-5}$
Be-B	0.8	$<10^{-5}$	$<10^{-5}$
C	1.8	0.6	0.3

N	<0.8	0.1	0.2
O	1.0	1.0	1.0
Mg	0.32	0.05	0.04
Si	0.12	0.06	0.04
Fe	0.14	0.05	0.06

Як сформувався саме такий склад космічних променів? Чому існують відмінності в складі зірок і частинок, що приходять до нас з Всесвіту? Про це піде мова далі, а поки продовжимо розгляд їх складу.

Крім ядер різних елементів в складі космічних променів є електрони. При рівних енергіях інтенсивність електронів в 100 разів менше, ніж протонів. На відміну від протонів і важчих ядер, максимальна енергія електронів знаходиться, ймовірно, десь в районі - 10^{14} еВ, тому що очікується, що при високих енергіях їх потік повинен різко зменшуватися через так званих синхротронних втрат.

Чи існують античастинки в складі космічних променів? Їх присутність могло б свідчити про наявність у Всесвіті значної кількості антиматерії. Зараз є лише надійні експериментальні дані про існування антипротонів в складі космічних променів в обмеженому діапазоні енергій. Пошук античастинок з масами важче антипротонів - завдання майбутніх експериментів.

1.3. Енергетичні спектри ядер космічних променів

Космічні промені мають величезний діапазон енергій: від - 10^6 до, принаймні, - 10^{21} еВ. Зазвичай використовують наступні скорочення для одиниць енергії (табл.. 1.2).

Для ядер, важче протонів, зазвичай використовують одиниці еВ / нуклон, тобто це повна енергія частинки, розділена на число нуклонів в ядрі.

Для того, щоб уявити масштаб величин енергій космічних променів, досить поглянути на таблицю 1.3.

З таблиці 1.3 видно, що максимальна виміряна енергія космічних променів перевищує доступну в наземних експериментах на 9 порядків - в мільярд разів!

Таблиця 1.2 - Скорочення для одиниць енергії

10^3 eV	keV – кілоелектронвольт
10^6 eV	MeV – мегаелектронвольт
10^9 eV	GeV – гигаелектронвольт
10^{12} eV	TeV – терраелектронвольт
10^{15} eV	PeV – петаелектронвольт
10^{18} eV	EeV – экзаелектронвольт
10^{21} eV	ZeV– зитаелектронвольт

Таблиця 1.3. Енергія різних видів випромінювань

Вид випромінювання	Енергія, eV
Фотон світла, видимий оком	1,7...3
Електрони у електронно-променевій трубці	$\sim 10^3$
Максимальна енергія протонів, отримана в наземних прискорювачах	$\sim 7 \cdot 10^{12}$
Максимальна виміряна енергія космічних променів	$\sim 3 \cdot 10^{20}$

Наскільки велика енергія частинки величиною в 1 ZeV? Енергія такої субатомної частки наближається до енергій макросвіту: вона може розігнати

шайбу масою 200 г до швидкості 80 км / год! Тут доречно зіставити енергії космічних частинок з енергіями частинок "зроблених" на Землі людиною.

Найбільш потужний прискорювач частинок в Женеві, в Європейському центрі ядерних досліджень - CERN - LHC (Великий адронний коллайдер), не може наблизитися до енергій космічних променів, досяжних в природі, - він прискорює частинки до 14 TeV (загальна енергія частинок у зустрічних пучках 7 + 7 Тев).

Найважливішою характеристикою космічних променів є енергетичний спектр - залежність між потоком частинок (F) і їх кінетичну енергію (E). Спрямований диференційний потік визначається кількістю частинок N з енергією в діапазоні від E до E + E, падаючих на одиницю площі в одиницю часу t і в одиниці тілесного кута Ω :

$$F(E) = \frac{dN}{dS} d\Omega dt dE,$$

де dS, d Ω , dt и dE – елементи площі тілесного кута, часу і енергії. В даному випадку F (E) - диференційний енергетичний спектр, на відміну від інтегрального

$$F(>E) = \int_E^{\infty} F(E) dE.$$

Потік частинок, проінтегрований по тілесному куту, носить назву всеспрямованого.

Зважаючи на велику діапазону зміни потоків і енергій космічних променів енергетичні спектри частинок прийнято зображати у подвійному логарифмічному масштабі, тобто $\lg F(E) = f(\lg E)$. Найбільш часто для апроксимацій використовується ступенева функція, тобто $\lg F(E) \lg$, де -

(показник спектра). У подвійному логарифмічному масштабі статична функція має вигляд прямої лінії з нахилом γ .

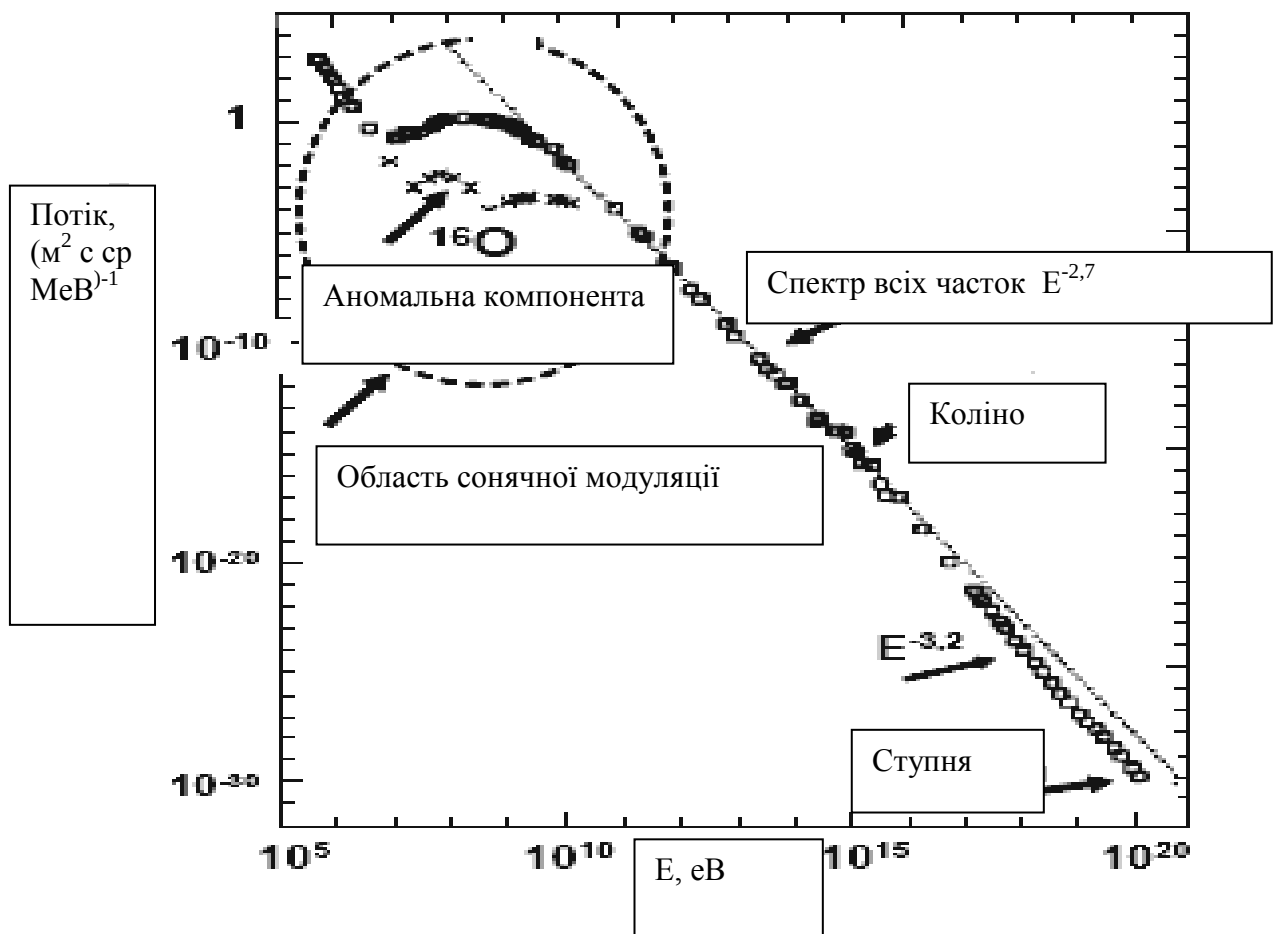


Рисунок 1.2 – Енергетичний спектр "всіх частинок" космічних частинок без поділу їх на окремі компоненти.

При енергіях більше 10^{10} eV він має нахил $E^{-2.7}$, відчувачи укрупнення в районі "коліна" ($\sim 10^{15}$ eV). При цих енергіях потоки частинок більш стабільні, а в області енергій менше 10^{10} MeV відчують значні варіації під дією сонячної активності. Гранична зареєстрована енергія космічних частинок в районі "ступні" становить $3 \cdot 10^{20}$ eV

Розглянемо деякі узагальнюючі відомості про енергетичні спектрах космічних променів. Якщо підсумувати диференціальні потоки F всіх частинок космічних променів (без поділу по Z), виміряних в різних

експериментах (рис. 4.2), то ми отримаємо в подвійному логарифмічному масштабі практично пряму лінію для нахилу спектра у вигляді

$$\frac{dF}{dE} \propto E^{-\gamma}$$

тобто показник практично постійний в широкому (10 порядків величини!) діапазоні енергій. Насправді це не так. І незабаром ми це побачимо. Цікаво відзначити, які потоки частинок при різних енергіях. Так, при енергії - 10 ГеВ їх потік становить 1 частку на 1 м² в 1 с, в ПеВ-ній області - 1 частка на 1 м² в 1 рік, а при близьких до максимальних енергій, при декількох ЕеВ, - 1 частка на 1 км² в 1 рік. З експериментальної фізики відомо, що для отримання достовірного результату необхідно набрати достатню статистику подій, тобто зареєструвати події з помилкою, значно меншою в порівнянні з вимірюваною величиною. Відомо, що помилка Δn вимірювань числа n подій може бути виражена формулою $\Delta n = n^{-1/2}$. Наприклад, при 100 вимірах однієї і тієї ж фізичної величини помилка складе 10%. Можна собі уявити, якого розміру повинна бути установка і скільки часу має тривати експеримент, якщо на верхній межі діапазону потоки частинок КЛ настільки малі! Очевидно, що це повинні бути установки з ефективною площею реєстрації частинок в тисячі квадратних кілометрів. І навіть при таких масштабах фізикам доведеться чекати кілька місяців і, можливо, роки реєстрації однієї частки в Зев-ної області енергій. Вище ми розглянули спектр "всіх частинок" космічних променів, без його диференціації на різні компоненти. На рис. 1.3 показані енергетичні спектри ряду елементів (H, He, C і Fe) - окремих компонент КЛ. Тут уявлення спектра обмежено ПЕВ-ної областю енергій: для більш високих енергій поки немає даних про склад космічних променів. Звертає увагу наявність максимуму в спектрі різних ядер при енергіях в 300-500 МеВ. Це - так званий модуляційний пік. Зверніть увагу також на те, що нахил γ практично

однаковий для всіх частинок зі значенням ~ 2.7 до енергій - 1 ПеВ. При цих енергіях, а точніше при - 3 ПеВ, в спектрі спостерігається злам - "коліно", по термінології фізиків-косміків. Цей злам виявляється, перш за все, в спектрі "всіх частинок" (тобто сумарному спектрі всіх компонентів космічних променів).

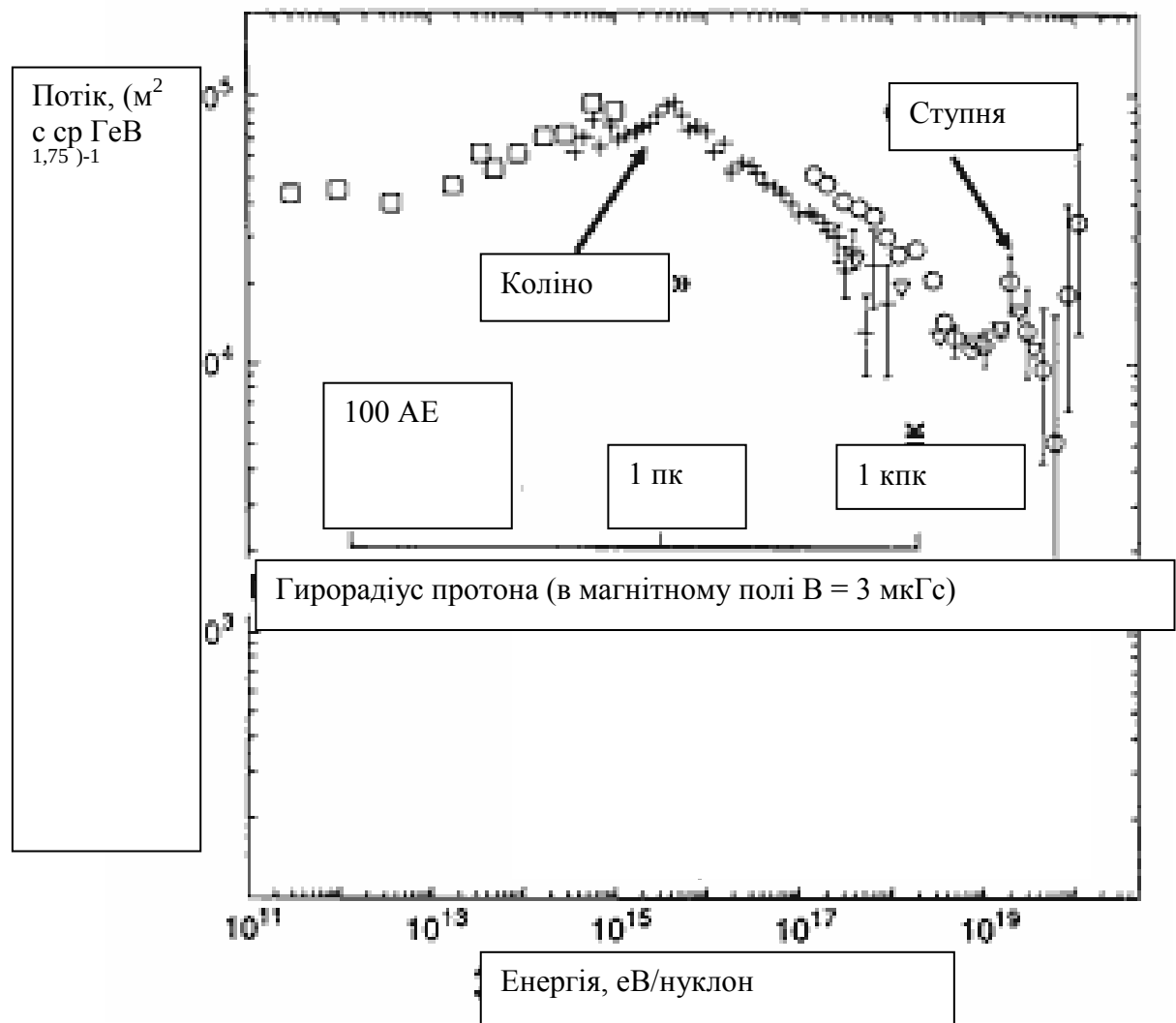


Рисунок 1.3 – Енергетичний спектр "всіх частинок"

Добре видно "коліно" при - $3 \cdot 10^{15}$ еВ і "ступня". Потоки частинок різко зменшуються зі збільшенням енергії: при $E \sim 10^{19}$ еВ спостерігається лише - 1 частка, що падає на площадку в один км² в рік. Наведено шкала гірорадіусов (ларморовських) радіусів протонів в магнітному полі напруженістю в 3 мкГс.

При ультра-високих енергіях $> 10^{19}$ eV радіуси траєкторій протонів повинні перевищувати розміри нашої Галактики.

На рис. 1.3 показаний сумарний спектр "всіх частинок" космічних променів (без поділу на компоненти), в якому "коліно" чітко видно при енергії ~ 3 PeV. Це дозволило штучно уявити спектр всіх частинок більше плоским і, тим самим, більш детально показати наявну особливість в спектрі - "коліно" при $E = 3$ PeV і "ступню" при $E > 1$ EeV. Теми "коліна" і "ступні" в спектрі КЛ в потребують більш докладних досліджень. Поки лише зазначимо, що область "коліна" чудова в багатьох відносинах.

Ця область енергій, мабуть, відповідає граничним можливостям одного з діючих у Всесвіті прискорювачів КП [5];

"Коліно" в PeV-ної області енергій близьке, хоч як це не дивно, до граничних можливостей наявних на Землі прискорювачів частинок.

Діапазон енергій в PeV-ній області - "межа" між двома методами досліджень КЛ: в області енергій менших "коліна" дослідження космічних променів доступні лише за допомогою приладів, що встановлюються на аеростатах і супутниках, тобто у верхній атмосфері і в космічному просторі, а при енергіях більших "коліна"- за допомогою наземних методів вимірювань (ШАЗ).

Слід також зазначити, що відкриття зламу - "коліна" в спектрі всіх частинок космічних променів в 1956р. належить російським фізикам з Московського державного університету, які працювали під керівництвом Г. Хрістіансена.

При енергіях за PeV-ної областю спектр стає більш крутим (1.2) аж до енергій ~ 1 EeV. При ще більших енергіях в області "ступні" форма спектра стає невизначеною. Є експериментальні дані, що свідчать про більш пологий нахил (ніж 1.2) спектра, а є дані, що свідчать про протилежне - про різке укрупнення спектра, тобто зникнення частинок.

2 МЕТОДИ РЕЄСТРАЦІЇ КОСМІЧНИХ ЧАСТОК

2.1 Вплив атмосфери на рух космічних часток

Властивість атмосфери поглинати космічні промені було виявлено ще в перших експериментах В. Гесса [6]. Потрапляючи в атмосферу Землі, космічні частинки (а це в основному протони і ядра більш важких елементів, ніж водень) відчують зіткнення з її атомами і молекулами. В результаті відбувається розщеплення ядер і утворення численних вторинних частинок. Середня відстань, яку встигає пройти протон в атмосфері, відповідає приблизно 1/13 частини її товщі. Це означає, що він може неодноразово вступати в процеси взаємодії з ядрами повітря, перш ніж остаточно загинути. Звідси випливає, що на менших висотах поблизу Землі, або в термінах фізиків, які вивчають космічні промені, - на "великих глибинах" в атмосфері існує лише вторинна компонента космічних променів

Склад вторинної компоненти обумовлений фізичними процесами взаємодії первинної частки з ядрами атмосфери. Цей процес називається каскадним. Схема взаємодії протонів космічних променів з атмосферою показана на рис. 2.1. В актах взаємодії первинної частки космічних променів народжуються практично всі відомі елементарні частинки.

У первісному акті взаємодії основну роль грають елементарні частинки - народжуються піоні або π -мезони, серед яких є нейтральні π^0 і заряджені $\pi^\pm$. Взаємодіючи з ядрами повітря, заряджені $\pi^\pm$ мезони генерують нові зливи до тих пір, поки їх енергія не знизиться до - 109 MeV. У першому акті взаємодії зазвичай народжується більше 50 нових частинок. В результаті розпаду $\pi^\pm$ -мезонів утворюються мюони (μ) і нейтрино ($\bar{\nu}$). У складі вторинного випромінювання присутні нейтрони. Ця частина каскаду носить назву адронної зливи.

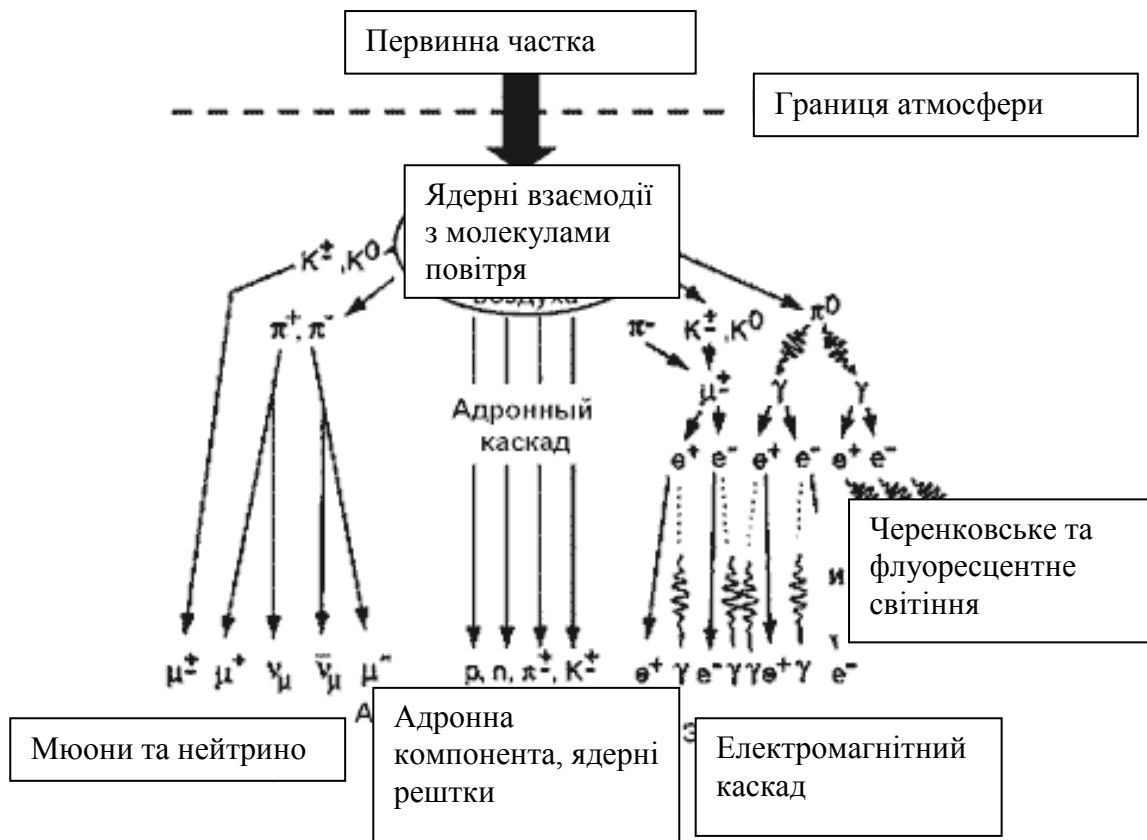


Рисунок 2.1 – Каскадний процес взаємодії первинних космічних променів з атмосферою - народження вторинної компоненти космічних променів (так звані "широкі атмосферні зливи" (ШАЗ))

Нейтральні мезони (π^0) - їх приблизно одна третина - розпадаються на гамма-кванти, які в кулонівському полі ядер народжують електрони і позитрони. Гальмівне випромінювання електрон-позитронної пари призводить до появи нізкоенергійних гамма-квантів - фотонів. Цей злива називається електромагнітним. Адронний злива сам виробляє нейтральні піоні, тим самим забезпечуючи додатковий внесок в електромагнітний каскад. На рівні моря залишається не більше 1% від їх початкового потоку первинних частинок.

Поряд із зарядженими первинними частинками в атмосферу можуть потрапляти космічні гамма-кванти високих енергій. В цьому випадку злива частинок буде чисто електромагнітним.

Вторинні заряджені частинки - електрони і позитрони, народжені в каскадному процесі, можуть створювати черенковське і флюоресцентні світіння атмосфери.

Процес утворення нових частинок носить лавиноподібний характер до тих пір, поки конкуруючі втрати енергії не стануть домінувати. На деякій висоті над Землею формується максимум числа частинок лівня. Число частинок в зливі - величезне: в максимумі вона пропорційно енергії первинної частки і може досягати мільярда.

2.2 Пастки для частинок

Відкриття каскадного процесу - народження вторинних частинок, що з'являються генетично пов'язаними групами, - пов'язане з ім'ям Д. Скобельцина. Він вперше "побачив" зливи космічних променів в дослідях з камерою Вільсона, виявивши сліди одночасно народжених двох або трьох частинок усередині камери Вільсона. По суті, це були перші спостереження множинних процесів в ядерній фізиці високих енергій.

Потім, в 1938 р П'єр Оже, французький фізик розмістив пару детекторів в Альпах і зареєстрував їх одночасне спрацьовування. Це було першою вказівкою на існування каскадного процесу - генерацію злив вторинних частинок (їх називають "широкими атмосферними зливами" - шал), які народжуються в атмосфері під дією космічних променів. П.Оже вдалося визначити енергію частинки, що викликала шал: вона виявилася рівною 1015 еВ (1 ПЕВ). Її величина була на 7 порядків величини більше виміряної до цього часу енергії частинок.

Надалі дослідження були продовжені італійським вченим Б. Россі, який вивчав "каскадну криву" - залежність між числом народжених вторинних частинок від товщини речовини, пройденої первинною часткою. Ці експерименти стали основою нового напрямку в експериментальній фізиці

космічних променів - методу широких атмосферних злив. Розглянемо його більш детально.

У фізиці космічних променів експериментальна задача зводиться до визначення ряду таких найважливіших фізичних параметрів частинок, серед яких - їх енергія, маса (зарядове число) і зарядовий стан.

По масі ми ідентифікуємо саму частку, тобто, наприклад, для ядер визначаємо їх місце в періодичній таблиці елементів, а, визначивши енергію, можна побудувати енергетичний розподіл часток по енергіям. Это особливо важливо для йонів - атомів з не повністю заповненими електронними оболонками . Однак космічні промені високих енергій - це повністю іонізовані атоми, що звільнилися від своїх електронних оболонок. Виняток становить так звана "аномальна" компонента космічних променів. Але про ці частинки мова піде нижче.

Крім цього, дослідникам буває необхідно знати і напрямок приходу частинок або просторовий розподіл їх траєкторій руху. Це треба не тільки для визначення місця розташування джерел космічних променів на небесній сфері але, в ряді випадків, для вивчення їх руху в магнітних полях: останнім важливо для заряджених частинок, траєкторії яких можуть істотно відхилятися від прямої лінії в процесі їх поширення в міжзоряному середовищі. Крім цього, для Землі, що має власне магнітне поле, проблема вивчення просторового розподілу часток космічних променів має особливе значення для інтерпретації даних наземних експериментів.

На зорі досліджень космічних променів застосовувалися детектори були досить простими і використовували принцип іонізації газів при проходженні через них заряджених частинок. Перші детектори - іонізаційні камери і лічильники Гейгера реєстрували електричний імпульс, створюваний часткою, тобто сам факт проходження частинки через детектор, але не могли визначити їх природу.

Вище зазначалося, що в результаті взаємодії космічного випромінювання з ядрами атомів атмосфери народжуються нові частинки -

вторинні протони, ядра більш важких елементів, нейтрони, електрони, гамма-кванти, мюони і нейтрино. Внесок цих компонент в сумарний потік випромінювання на різних висотах залежить як від складу первинного випромінювання, так і від його енергетичного розподілу. Фізичні характеристики каскадного процесу вперше були детально досліджені російськими фізиками - Д. Скобельциним, Н. Добротіним і Г. Зацепіним в 1949 р в горах Паміру, де на великій висоті розташовувалися детектори космічного випромінювання, що дозволяли реєструвати вторинні частки каскаду - зливи частинок. розподіл потоків частинок даного типу - енергетичний спектр. На рис. 2.2 приведена картина формування каскадів частинок в атмосфері.

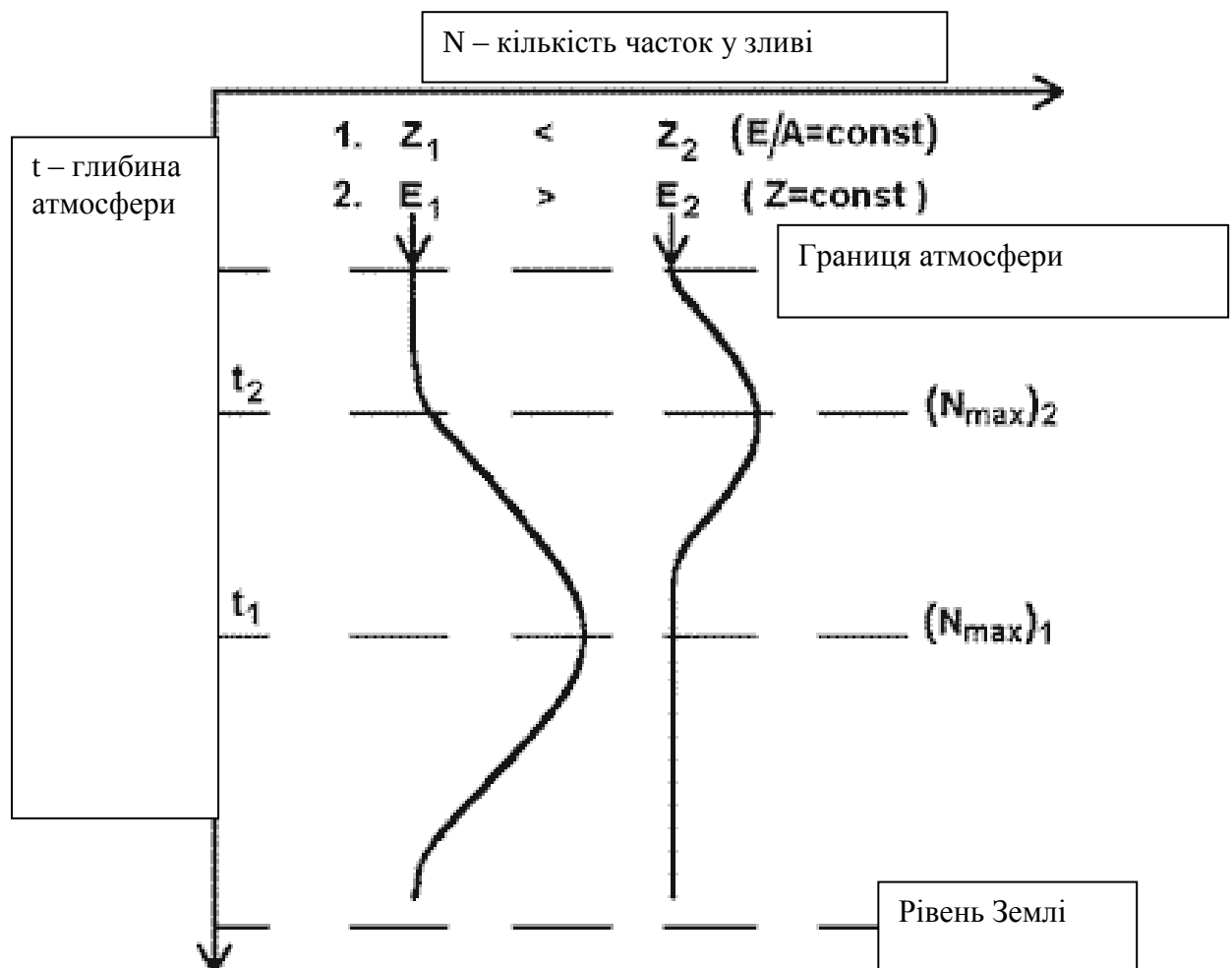


Рисунок 2.2 – Якісна картина формування каскадів вторинних частинок в атмосфері

2.3 Методика вимірювання ШАЗ

Видно, що більш енергійні, а також більш легкі частки (з тією ж енергією на нуклон) формують максимум ШАЗ (максимум вторинних частинок - $N_{\max}$) на великих глибинах атмосфери, тобто ближче до земної поверхності. Теорія каскадного процесу, вперше розроблена Г. Зацепіним, дозволила вченим розвинути методи визначення параметрів первинної частки, що вторгається в атмосферу, з аналізу подій в детекторах, викликаних вторинними частками. Виявилось, що максимум інтенсивності частинок в зливі ("максимум зливи") залежить як від енергії первинної частки, так і від її типу (Рис.2.2).

Визначення положення максимуму зливи частинок грає велику роль в експериментах з ШАЗ. Максимум зливи містить в середньому - 1-1,6 частки на кожні 109 еВ енергії первинної частки. Це означає, що з ростом енергії число часток в максимумі збільшується. Висота освіти максимуму над поверхнею Землі, або, точніше, глибина t , яка відлічується від верхньої межі атмосфери - $X_{\max}$, змінюється за логарифмічною закону зі зміною енергії первинної частки (тобто пропорційна $\lg E$). Величину $X_{\max}$ можна обчислити, інтегруючи щільність повітря від точки входу в атмосферу і уздовж траєкторії частки. Отже, $X_{\max}$ вимірюється в одиницях $г / см^2$ - твір щільності речовини ($г / см^3$) на довжину шляху в ньому частки (в см).

При вертикальному прольоті частки, її траєкторія перетинає - $1000 г / см^2$ речовини від кордону атмосфери до рівня моря. Частка з енергією 10^{15} еВ досягне глибини приблизно в - $500 г / см^2$. Глибина максимуму зливи збільшується на 60-70 $г / см^2$ зі збільшенням енергії частки на порядок. Однак, глибина максимуму залежить і від типу влітають частинок. Для більш масивної частинки, але з однаковою енергією в одиницях MeV / нуклон, тобто з однаковою швидкістю ($E / A = \text{const}$), $X_{\max}$, утворений нею, буде спостерігатися вище над землею. Перше адронний взаємодія для протонів відбувається на глибині атмосфери - $70 г / см^2$ і на менших глибинах

(великих висотах) для більш важких ядер з тією ж енергією E/A . Ця різниця якісно демонструється на Рис.3.4, де наведені розподілу числа частинок в зливі для частинок з Z_1 і Z_2 ($Z_1 < Z_2$), але з однаковими енергіями і для частинок з $Z = \text{const}$, але з різними енергіями.

Для різних компонент каскадного процесу характер проходження частинок через атмосферу має свої особливості. Комбінуючи методами експериментальних вимірювань, чутливих до тієї чи іншої компоненти вторинного випромінювання, з одного боку, і, застосовуючи розрахункові моделі проходження частинок через атмосферу, з іншого, дослідникам вдається наблизитися до визначення фізичних параметрів первинної частки. Наблизитися тому, що залишається все-таки деяка невизначеність, іноді значна, в ланцюжку вимірювань і моделювання, пов'язана з невизначеністю деяких параметрів, закладених в моделях.

Вище зазначалося, що зливи, викликані первинною часткою з енергією $\sim 10^{15}$ еВ, проникають на глибину, рівну приблизно половині товщини атмосфери. Очевидно, що поріг по енергії реєстрованих первинних частинок буде залежати від висоти, на якій будуть розміщені детектори: чим вище вони розташовані, тим нижче поріг.

Однак, метод ШАЗ не «працює» в області енергій менше - 10^{14} еВ. Частинки цих енергій дуже швидко поглинаються в атмосфері і не дозволяють розвинути вторинної компоненті.

Детектори розміщуються на великій площі з тим, щоб зареєструвати максимально можливе число вторинних частинок каскаду ШАЗ.

На рис.2.3 демонструється принцип реєстрації ШАЗ наземними установками. Зазвичай детектори розташовані на деякій відстані один від одного і реєструють вторинні частки зливи по збігів. Розподіл щільності частинок в зливі схоже на млинець, який поширюється зі швидкістю, дуже близькою до швидкості світла. Вимірюючи час приходу фронту частинок зливи, можна обчислити напрямок приходу первинних частинок. Енергія

зливи визначається за сумарною щільності вторинних частинок на відстанях до 600 м від осі зливи.

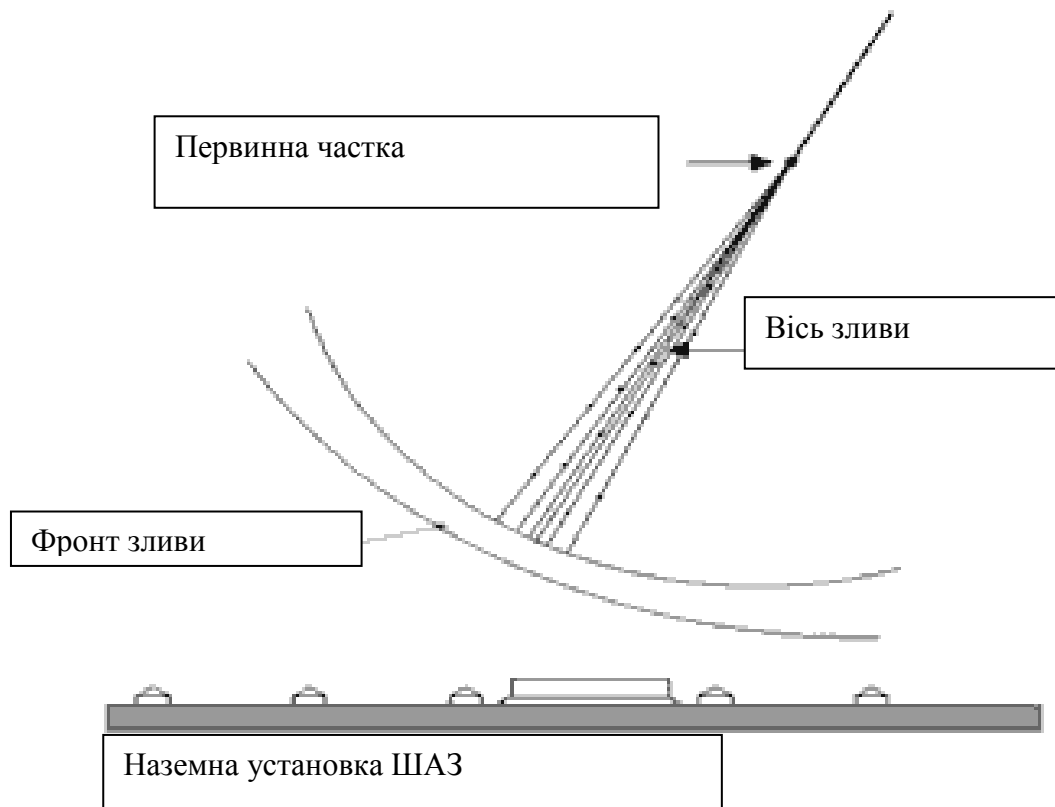


Рисунок 2.3 – Реєстрація частинок космічних променів наземними установками.

Вимірюючи тільки, наприклад, адронну компоненту зливи, неможливо визначити величину максимуму зливи - $X_{\max}$. Можна виміряти іншу компоненту - мюони, каскад якої розвивається на відмінних від адронної компоненти глибинах. За різницею показань мюонних детекторів і детекторів, які реєструють адронну компоненту, а також залучаючи каскадні моделі, можна визначити $X_{\max}$. Як можна "побачити" народження і загибель зливи? Ще до появи методу ШАЗ, в техніці дослідження космічних променів широко використовувався метод рентгено-емульсійних камер (РЕК). Частинки, потрапляючи в речовину плівки, на поверхню якої нанесений чутливий до рентгену та заряджених частинок шар фотоемульсії, викликають каскад вторинних частинок (рис.2.4) - результат взаємодії

первинної частки з ядрами фотоемульсії. Після прояви в хімічних розчинах треки частинок стають видимими. Аналізуючи товщину, розміри і просторове положення треків під мікроскопом, можна визначити і типи частинок, і їх енергії. Метод РЕК набув широкого поширення в фізиці космічних променів. Завдяки саме його застосування в 40-х роках минулого століття вдалося виявити багато ядер - аж до заліза - в складі первинного космічного випромінювання.

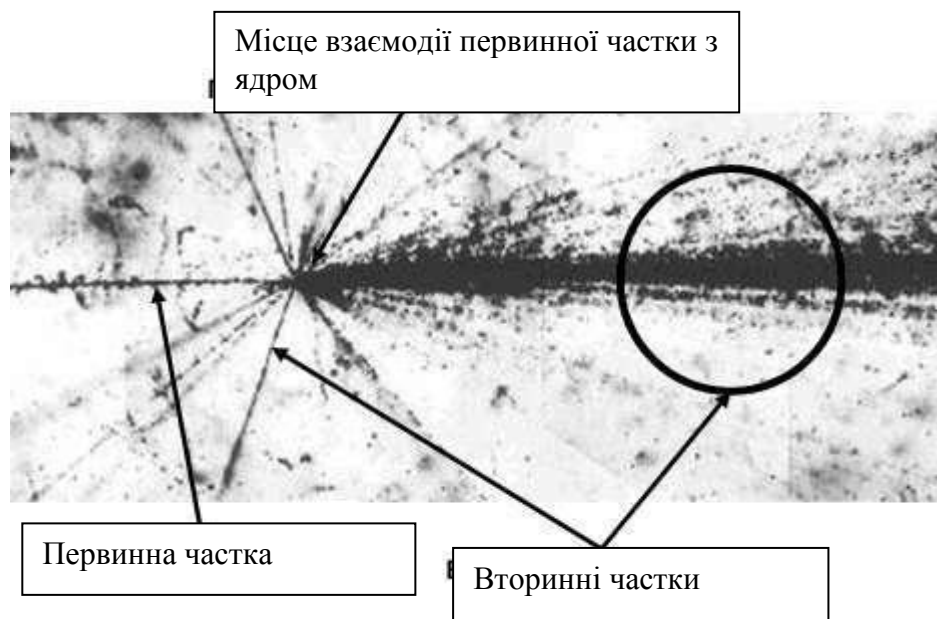


Рисунок 2.4 – Приклад візуалізації зливи частинок при її гальмуванні в фотоемульсії

Сліди первинної і вторинних частинок стають видимими після проявлення плівки в хімічних розчинах.

Заряджені частинки, що летять зі швидкістю, що перевищує швидкість світла (в порівнянні з вакуумом), випромінюють фотони – світло (черенковське випромінювання), яке може бути зареєстрований наземними установками - параболічними дзеркалами - колекторами світла (рис. 2.5).

Із наведеного вище розглядання можливостей реєстрації космічних променів високої енергії очевидно, що саме каскадний процес утворення вторинних частинок лежить в основі методу визначення природи первинної

частки. Атмосфера служить саме тим "робочим тілом" гігантського детектора, який дозволяє реєструвати космічні промені надвисоких енергій. Однак, цей метод ефективний в області енергій більш - 10^{15} еВ. А в області менших енергій?

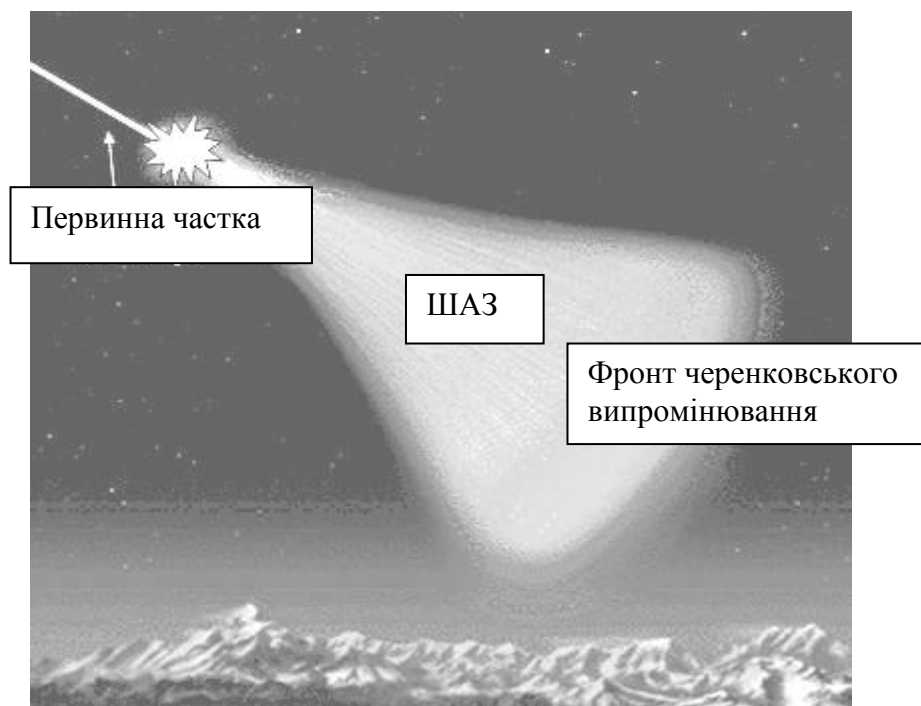


Рисунок 2.5 – Реєстрація космічних променів методом вимірювання черенковского світла

Тут атмосфера вже не може служити "генератором" вторинних частинок: вони в більшості своїй гинуть у верхніх шарах атмосфери. Як же виміряти енергію частинки в цій області енергій? Про метод РЕК було розказано вище. Він дійсно застосовується при невеликих енергіях: установки досить великої площі з використанням РЕК можуть бути встановлені на аеростатах, літаках і супутниках з тим, щоб "наблизитися" до первинних частинок. Але і цей метод має свої обмеження, в першу чергу за часом експозиції РЕК: протягом тривалого часу детектор РЕК зареєструє настільки багато частинок (тобто "засвітиться"), що розрізнити окремі треки в ньому стане неможливим - після прояву фотоемульсія буде чорною.

2.4 Іонізаційний калориметр

У 50-х роках був винайдений іонізаційний калориметр, що дозволив зробити справжній ривок в дослідженнях не тільки космічних променів, але і елементарних частинок в наземних експериментах на прискорювачах - фізики високих енергій. Ідея винаходу і створення калориметру для вивчення космічних променів належить російським вченим - Н. Григорову, В. Мурзіну і І. Раппопорту з Московського державного університету.

Принцип дії приладу досить простий. Калориметр складається з мішені, всередині якої не тільки поглинається вся енергія первинної частки, але і всі вторинні частки (рис. 2.6). По суті, мета - це "міні-атмосфера" для первинної частки, яка генерує каскад вторинних частинок. Мета - багатошарова. У зазорах між речовиною мішені встановлюються детектори різного типу, які реєструють вторинні частки. Обробляючи сигнали з різних шарів установки, відновлюється весь злив вторинних частинок і, тим самим, параметри первинної частки. Іонізаційний калориметр в даному виді - це детектор повного поглинання, що дозволяє простежити всю історію генерації зливи.

Як ми бачимо, іонізаційний калориметр, по суті, - це прилад для вимірювання енергії первинної частки за тим же принципом, що і в методі шал, але з істотною відмінністю: детектори калориметр "бачать" вторинні частки, реєструють їх, визначають їх параметри і параметри первинної частки. У методі шал далеко не всі частинки реєструються наземними установками. Тут параметри первинної частки доводиться відновлювати, використовуючи різні моделі проходження частинок через речовину. Тому,

на відміну від методу шал, вимірювання космічних променів калориметрами носять назви "прямих" експериментів.

Вперше іонізаційні калориметри для вимірювань космічних променів були створені для високогірних досліджень, а потім запуснені в космос. Історія перших космічних експериментів з калориметрами знаменна і унікальна.

Уже говорилося, що при енергіях менше - 10^{15} еВ метод ШАЗ не працює і тільки "прямі" експерименти на аеростатах і супутниках з приладами типу калориметр можуть забезпечити вивчення спектрів частинок в цій області енергій .. Аеростати мають обмежений термін польотів, а значить невелику, обмежену статистику зареєстрованих подій, і, отже, обмеження по максимальній енергії частинок.

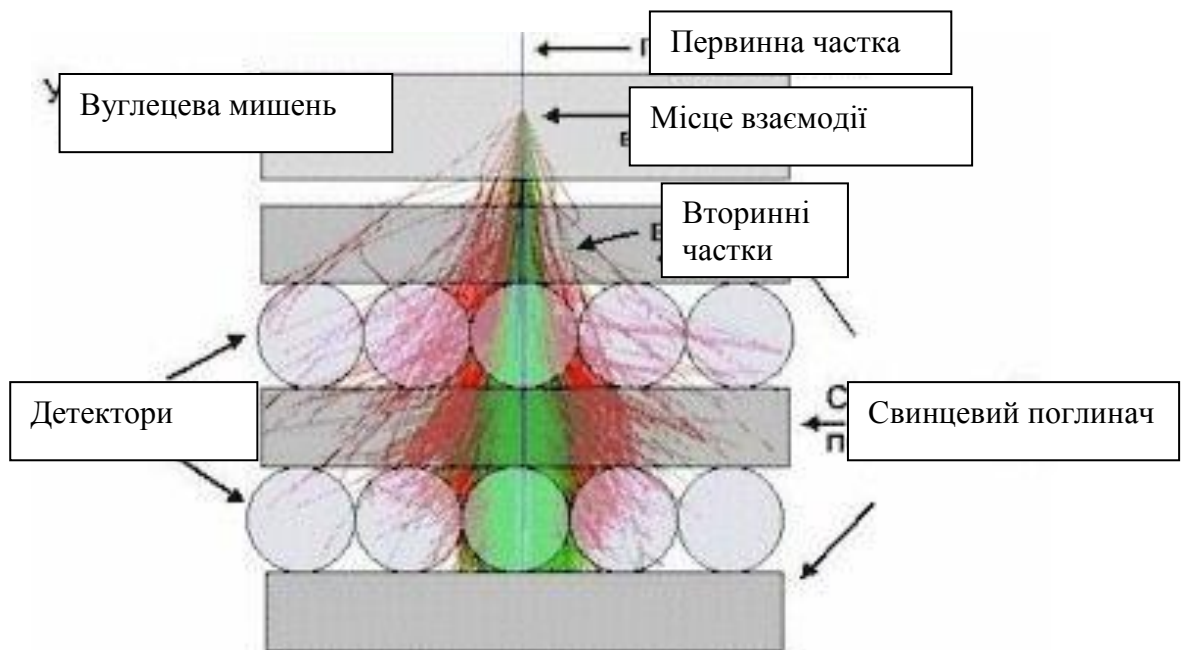


Рисунок 2.6 – Один з видів іонізаційного калориметра - пристрою, що дозволяє реєструвати космічні промені високої енергії

Прилад складається з вуглецевої мішені, в якій відбувається генерація вторинних частинок - нейтральних піонів, які, розпадаючись, формують потік фотонів. Вони реєструються шарами детекторів, розташованих між

поглиначами і свинцем під мішенню. Вимірюючи кількість вторинних частинок, можна визначити енергію первинної. Чим більше шарів детекторів, тим точніше вимірюється енергія.

Супутники з більш тривалим терміном проведення експериментів могли б заповнити цю прогалину.

Російським вченим в 60-ті роки несподівано випала така можливість - використовувати супутники для вивчення космічних променів. Це був час, коли особливо високими темпами нарощувався ракетно-ядерний потенціал найбільших держав - СРСР і США. Випробування балістичних ракет слідували одні за іншими

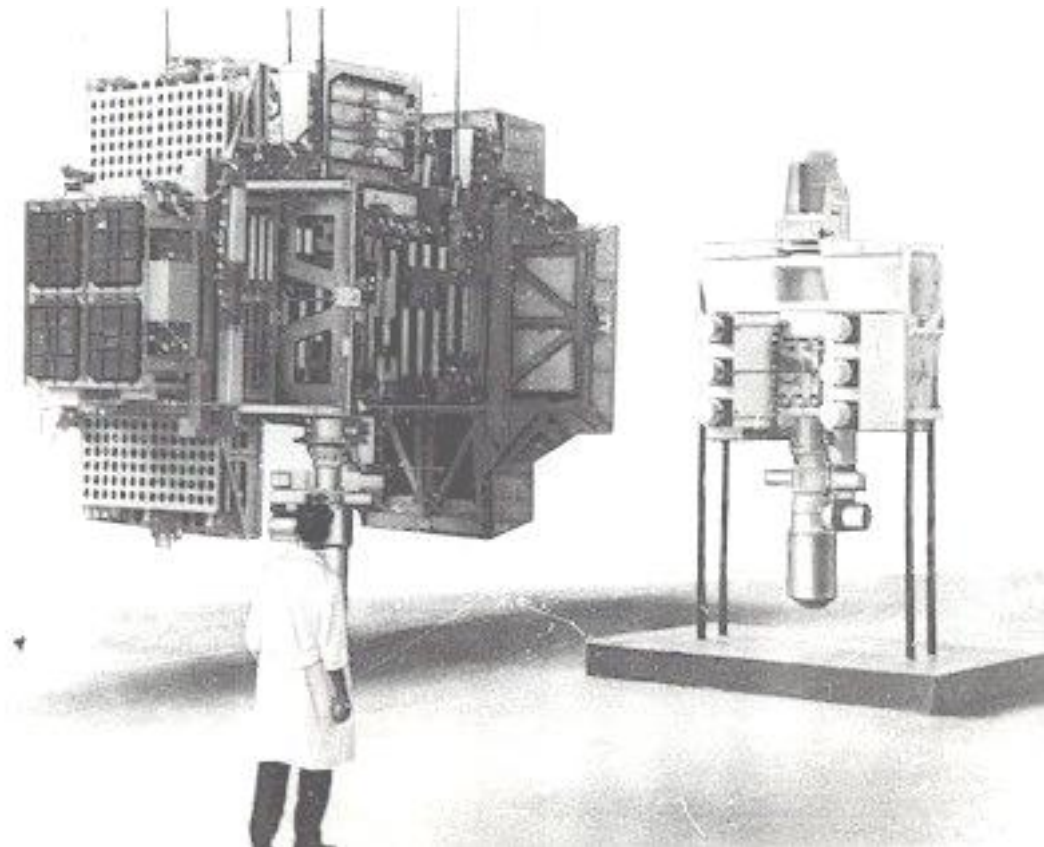


Рисунок 2.7 – Легендарні "Протони" - перші багатотонні калориметри, запуснені в космос на радянських бойових ракетах

І в цей період "холодної війни" вченим з МГУ - С. Вернову і Н. Григорову - вдалося переконати військових в випробувальних пусків

балістичних ракет розмістити наукову апаратуру - іонізаційні калориметри - замість габаритно-вагових макетів ядерних боєголовок. Їх пропозиція була прийнята, і перед вченими відкрилася дійсно унікальна, до сих пір не має аналогів можливість, - запустити в космічний простір багатотонну апаратуру для досліджень частинок високої енергії. Можливість була максимально використана - було запущено чотири експериментальних установок "Протон" з різних модифікацій (рис. 2.7).

Аж до 60-х років минулого століття в енергетичному спектрі космічних променів залишалося "біла пляма" - незаповнена експериментальними даними область - "біла пляма" в при енергіях менше - 10^{15} еВ. В експериментах на "Протонах" вперше був перекритий спектр всіх частинок в найширшому діапазоні: від - 10^{12} еВ до - 10^{15} еВ енергій. Прямий експеримент, виконаний на супутниках за допомогою калориметр, сомкнувся з результатами наземних експериментів шал. Це був величезний успіх нашої науки! Сучасні прилади для вивчення космічних променів - досить складні ядерно-фізичні системи, здатні з великою точністю відновлювати параметри первинної частки. Калориметри - їх складова частина.

На рис. 2.8 показаний один із сучасних приладів для дослідження космічних променів. Цей прилад використовувався в двох аеростатних експериментах АТІС в Антарктиді в 2000 і 2002 роках. Він складається з набору різних детекторів і мішеней і дозволяє ідентифікувати енергію, заряд, масу частинки і її траєкторію. Енергія визначалася іонізаційним калориметром, зробленим з важкого матеріалу - BGO (германата вісмуту), який є сцинтилятором - детектором ядерних випромінювань. На вході установки розташований детектор заряду, що складається з матриці напівпровідникових детекторів, призначених для визначення заряду (маси) первинної частки і місця її потрапляння в установку. Траєкторія частинок відновлюється в процесі обробки сигналів від частинок, одночасно потрапили в верхній і нижній шари детекторних систем. Такий прилад налічує тисячі окремих детекторів і, відповідно, тисячі окремих електронних

каналів обробки інформації. Він дозволяє реєструвати космічні промені до енергій в - 10^{14} еВ / нукл з поділом по масам окремих елементів від протонів до заліза. Обмеження по максимальній енергії в цій установці пов'язано з розмірами детекторів (верхній детектор має розмір - 1 м^2) і часом експозиції - тривалістю польоту самого аеростата.

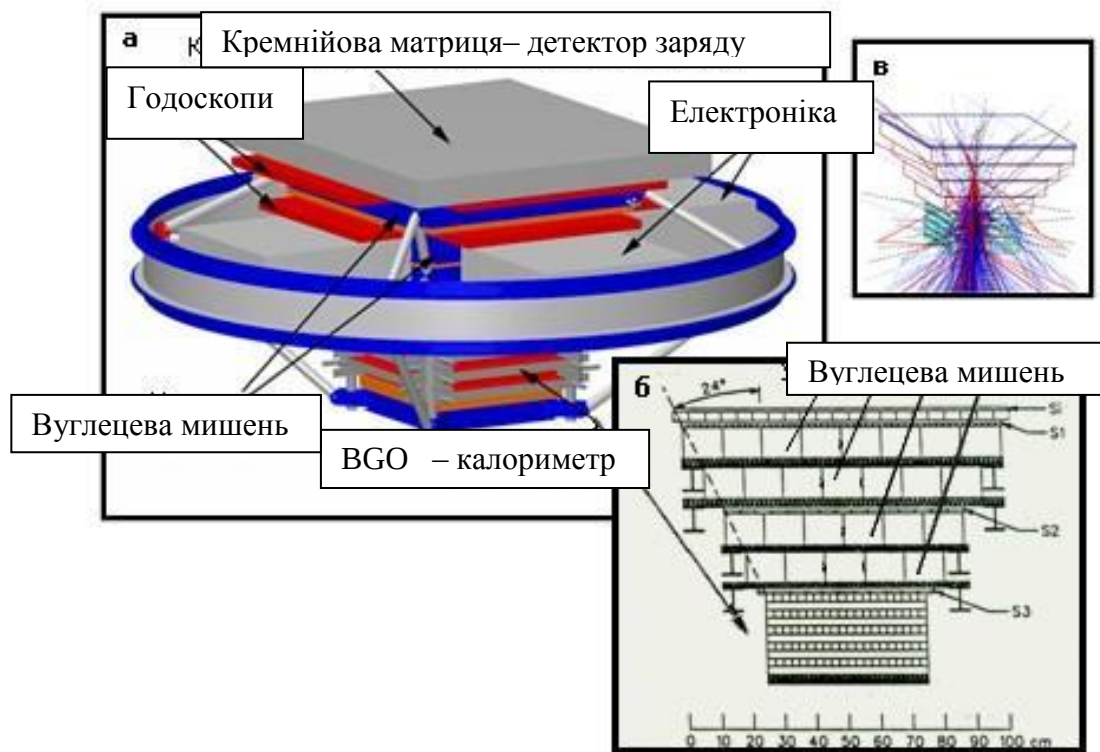


Рисунок 2.8 – Прилад АТІС, що літав в Антарктиді.

На виразках "а" і "б" показані загальний вид і склад цього приладу, що складається з декількох детекторів, а на "в" демонструється модельний каскад частинок, що виникає при взаємодії первинного протона з одним з детекторів. Завдяки точному визначенню параметрів вторинних частинок каскаду, цей прилад "вміє" не тільки вимірювати енергетичні спектри космічних променів, але і визначати масу частинок.

В Антарктиді в літній період (по південній півкулі) спостерігаються постійно дмуть вітру протягом досить тривалого часу. Цим і скористалися вчені, запускаючи аеростати на далекому континенті. Аеростати з корисним

навантаженням - науковими приладами огинають південний континент за 2 - 3 тижні. У багатьох випадках це досить, щоб набрати достатню статистику для отримання достовірних результатів по частинкам космічних променів. Саме так було проведено 2 польоту аеростатів в Антарктиді з приладом АТІС в гондолі (рис.2.9).

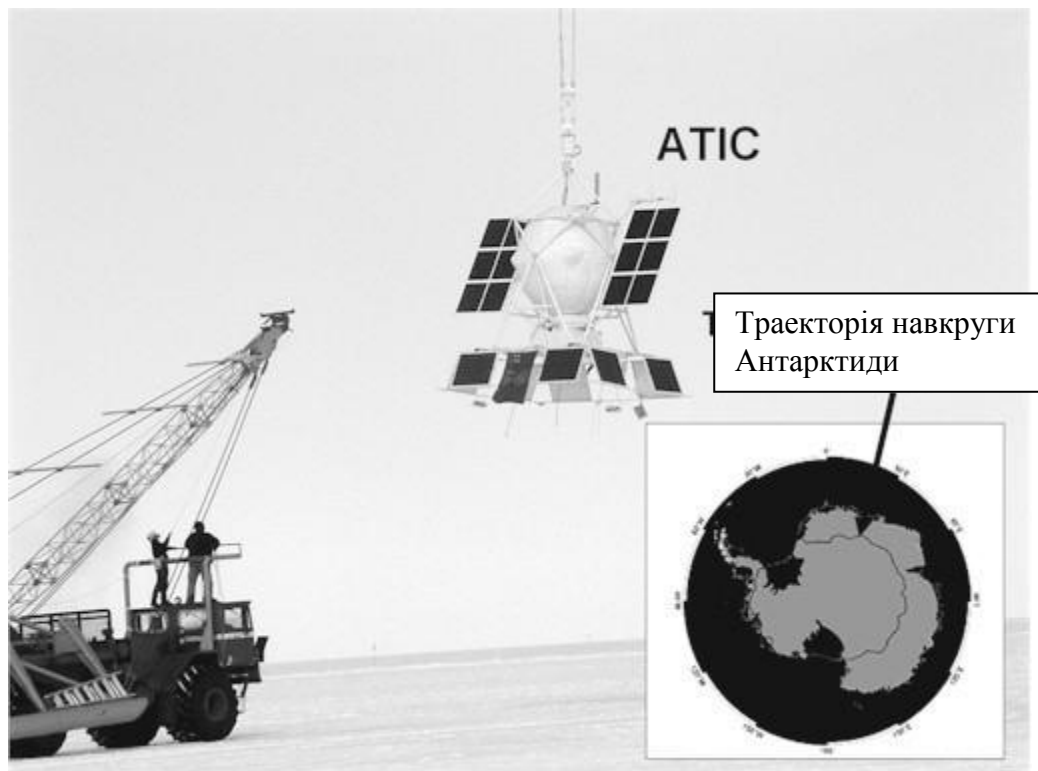


Рисунок 2.9 – Аеростати можуть літати в Антарктиді до 3х - 4х тижнів.

Прилад АТІС двічі здійснив подорожі уздовж узбережжя Антарктиди, збираючи інформацію про космічних променях.

Тут коротко викладено експериментальні методи вивчення космічних променів. Насправді методів дуже багато і читач може почерпнути зведенні про них в спеціальній літературі. Важливо відзначити, що вони застосовуються в різних середовищах (рис. 2.10): в космосі, в атмосфері, на землі і під землею. Кожен з методів має свої переваги і недоліки, але саме їх сукупність дозволяє вченим побудувати найбільш повну картину фізичних характеристик космічних променів.

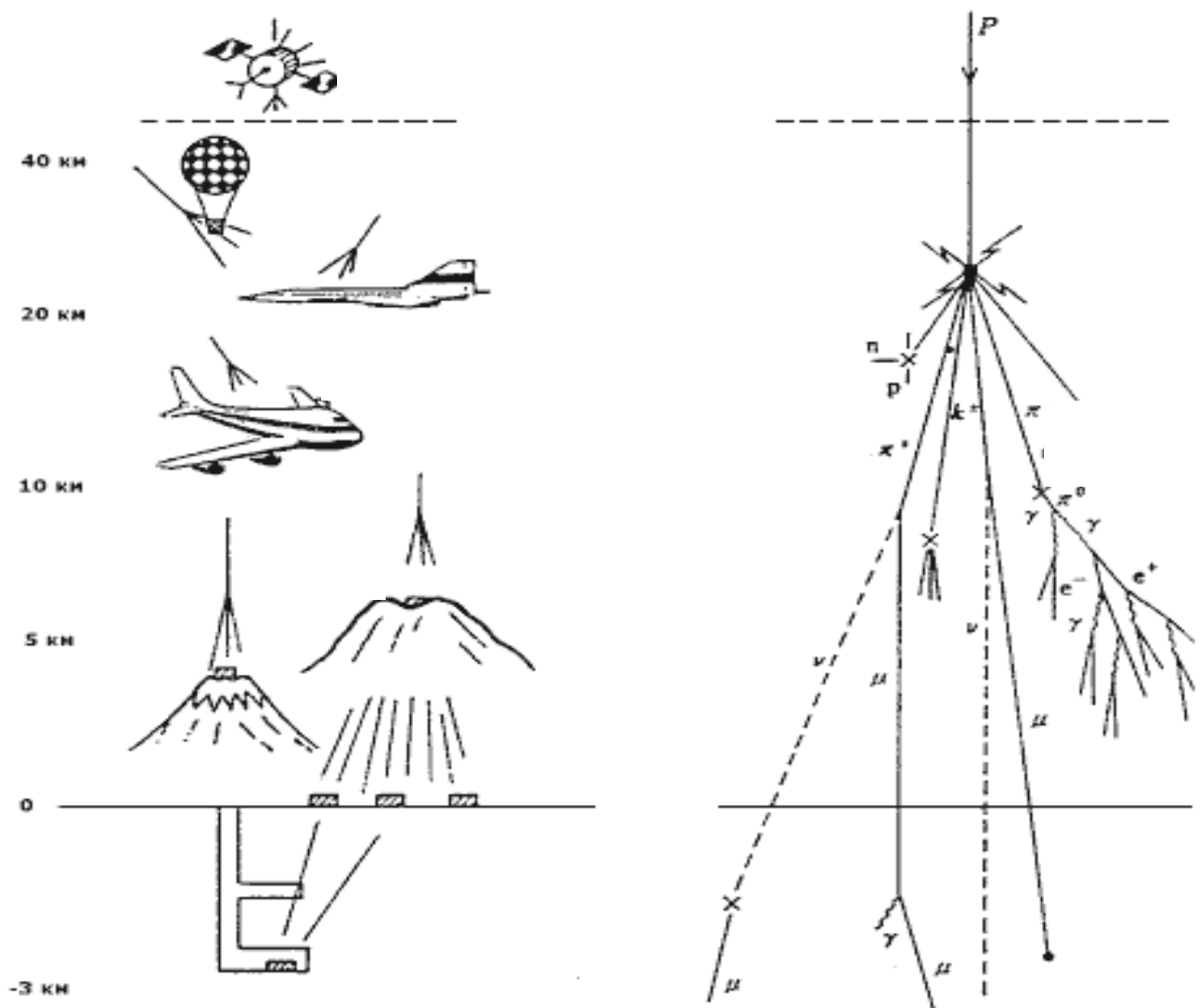


Рисунок 2.10 – Космічні промені вивчаються у всіх середовищах: під землею, на землі, в атмосфері і в космосі.

Первинні частинки, що не випробували взаємодій з ядрами повітря можуть реєструватися тільки на супутниках; широкі атмосферні зливи - на рівні моря (на землі) і в горах, а «проникаюча» компонента злив - мюони і гамма-кванти - під землею.

Вже зазначалося, що в області енергій більш - 1 Пев метод наземних вимірювань ШАЗ - найбільш ефективний для вивчення космічних променів. В області менших енергій "працюють" вже прямі методи. Погляньте на рис. 2.4: квадрати зліва від "коліна" - космічні експериментальні дані радянських "Протонів" (див. рис.2.7), що перекрили великий діапазон енергій аж до

"коліна". Однак з тих же оцінок величин потоків космічних променів, наведених на рис. 2.4, можна бачити, що на "краю" спектра, в районі "ступні", потік космічних променів стає настільки малий (1 частина / $\text{км}^2 \text{ср.рік}$), що для їх надійної реєстрації необхідні не просто детектори великої площі, а детектори гігантських розмірів. Наземні вимірювання дозволяють це зробити: на поверхні Землі досить багато місця, щоб розмістити детектори. І такі детектори - гігантські установки - створюються. Якщо для реєстрації частинок в районі "коліна" розмір коливається наземних установок від сотень квадратних метрів до декількох квадратних кілометрів, то для того, щоб "спіймати" частки в районі "щиколотки" створюються наземні зупинки в тисячі квадратних кілометрів. Найбільша наземна установка, створювана сьогодні для вивчення космічних променів на "краю" спектра - це міжнародний проект "Pierre Auger" в Аргентині. Вона буде розміром близько 3000 км^2 . Мабуть, розмір установки "Pierre Auger" близький до природного обмеження максимальних площ наземних детекторів космічних променів (тут і проблеми вибору майданчиків з плоским рельєфом, і кліматичні обмеження, і проблеми комунікацій та ін.). Для реєстрації частинок в районі ЗеВ -них енергій (область енергій прийнято називати ультрависокими енергіями або гранично високими енергіями) потрібні детектори з ефективними площами, що перевищують установку "Pierre Auger"

3 ДЕТЕКТОРИ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

3.1 Опис та класифікація детекторів

Детектор елементарних часток або детектор іонізуючого випромінювання в термінах фізики елементарних часток – це пристрій, що призначений для реєстрації і вимірювання основних параметрів елементарних часток з високою енергією. До них відносять космічні промені, а також частки, що народжуються у процесі ядерного розпаду, наприклад у прискорювачах [7...9].

Наведемо основні відомі типи детекторів:

а) перше покоління (у наш час не використовується):

- 1) бульбашкова камера;
- 2) камера Вільсона;
- 3) іскрова камера;

б) детектори, призначені для радіаційного захисту;

в) детектори часток для наукових досліджень (ядерна фізика та фізика елементарних часток);

г) годоскопічні камери:

- 1) іонізаційний калориметр;
- 2)пропроційна камера;
- 3) розрядно-іскрова камера;
- 4) часо-пролітний лічильник;
- 5) RICH;
- 6) детектор перехідного випромінювання;

д) лічильники:

- 1) Оптичні лічильники:
 - сцинтиляційні лічильники;
 - детектори черенковского випромінювання.

2) Твердотільні лічильники:

- напівпровідникові детектори;
- кристалічні детектори.

3) Газонаповнені лічильники:

- 1) Газовий іонізаційний детектор;
- 2) Іонізаційна камера;
- 3) Пропорційна камера;
- 4) Лічильник Гейгера-Мюллера;
- 5) Іскровий детектор.

е) трекові детектори:

- 1) Дифузійна камера;
- 2) Стримерна камера;
- 3) Часопроекційна камера;
- 4) Мікрополоскова камера.

ж) мас-аналізатори:

- 1) Мас-сепаратор;
- 2) Мас-спектрометр;
- 3) Мас-спектрограф.

3.2 Детектори для експериментів на прискорювачах та вимоги до них

У фізиці елементарних частинок поняття «детектор» відноситься не тільки до різного типу датчиків для реєстрації частинок, а й до великих установок, створених на їх основі і включає в себе також інфраструктуру для підтримки їх працездатності (криогенні системи, системи кондиціонування, електроживлення), електроніку для зчитування і первинної обробки даних, допоміжні системи (напр. надпровідні соленоїди для створення всередині установки магнітного поля) [8, 9]. Як правило, такі установки зараз створюються великими міжнародними групами.

Оскільки будівля великої установки вимагає значних фінансових витрат і людських зусиль, в більшості випадків вона застосовується не для однієї певної задачі, а для цілого спектра різних вимірів.

Основними вимогами, що пред'являються до сучасного детектору для експериментів на прискорювачі є:

- висока ефективність (малий відсоток втрачених частинок або частинок з погано визначеними параметрами);
- здатність до поділу різних типів частинок, що утворюються в розпаді (піонів, каонів, протонів і т. Д.);
- здатність точного вимірювання імпульсу заряджених частинок для відновлення інваріантної маси нестабільних станів;
- здатність точного вимірювання енергії фотонів.

Для специфічних завдань можуть знадобитися додаткові вимоги, наприклад, для експериментів, що вимірюють СР-порушення в системі В-мезонів важливу роль відіграє координатне дозвіл в області взаємодії пучків.

3.3 Універсальний детектор

Необхідність виконання наведених у п.3.2 умов призводить до типової на сьогоднішній день схеми універсального багат шарового детектора. В англійській літературі таку схему прийнято порівнювати з цибулиною (onion-like structure). Найбільше поширення ці детектори знайшли у прискорювачах на зустрічних пучках [7...9].

У напрямку від центру (області взаємодії пучків) до периферії типовий детектор для прискорювача на зустрічних пучках складається з наступних систем (рис. 3.1):

- трекова система;
- система ідентифікації;
- калориметр;
- мюонна система.

Трекова система призначена для реєстрації траєкторії проходження зарядженої частинки: координат області взаємодії, кутів вильоту. У більшості детекторів трекові система поміщена в магнітне поле, що призводить до викривлення траєкторій руху заряджених частинок і дозволяє визначити їх імпульс і знак заряду.

Трекові система зазвичай виконується на основі газових іонізаційних детекторів або напівпровідникових кремнієвих детекторів.

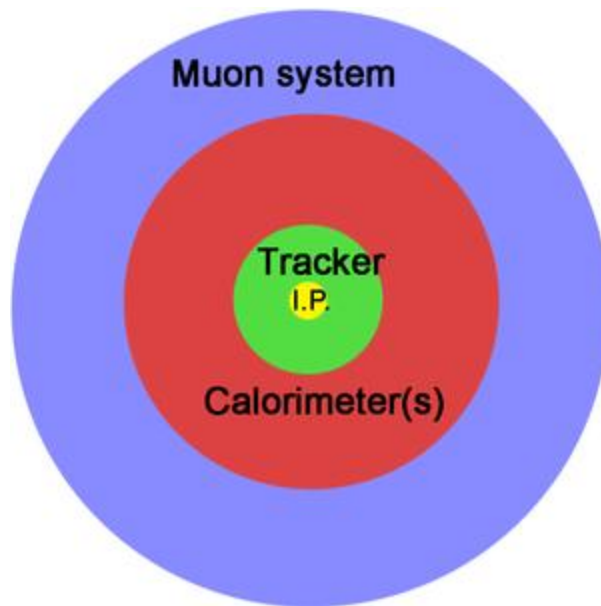


Рисунок 3.1 – Умовне зображення багат шарового універсального детектора для прискорювача на зустрічних пучках

Система ідентифікації дозволяє відокремити один від одного різні типи заряджених частинок. Принцип роботи систем ідентифікації найчастіше полягає у вимірюванні швидкості прольоту частинки одним з трьох способів:

- по куту випромінювання черенковського світла в спеціальному радіаторі (а також по самому факту наявності або відсутності черенковського випромінювання),
- за часом прольоту до точки реєстрації,
- по щільності питомої іонізації речовини.

Спільно з вимірюванням імпульсу частинки в трековій системі це дає інформацію про масу, а, отже, і про тип частинки.

Калориметр призначений для вимірювання енергії частинок шляхом їх повного поглинання. Це єдиний спосіб реєстрації фотонів (так як вони не є зарядженими і, отже, не залишають слідів в трековій системі). Фотони і електрони утворюють електромагнітний злива в речовині і, таким чином, повністю поглинаються. Виділена енергія може бути виміряна або за величиною спалаху сцинтиляційного світла (сцинтиляційні калориметри), або шляхом підрахунку частинок зливи (семплинг-калориметри).

Мюонну систему можна віднести до системи ідентифікації, але технічно вона реалізується окремо у зовнішній частині детектора. Найчастіше вона вбудовується в залізо, що замикає магнітний потік соленоїда трекової системи. Мюонна система дозволяє відокремити мюони за їхньою здатністю проходити великі відстані в речовині без поглинання (це є наслідком того, що мюон не відчуває ядерного взаємодії).

3.4 Детектори для прискорювачів на зустрічних пучках

Наведемо список працюючих або споруджуваних детекторів для прискорювачів на зустрічних пучках:

Детектори на колайдері LHC (CERN)

ATLAS

CMS

LHCb

Alice

Детектори на колайдері Tevatron

CDF

D0

Детектори на електрон-позитронних колайдерах

BaBar (колайдер PEP-II, SLAC)

Belle (колайдер KEKB, KEK)

BES (колайдер BEPC, Пекін)

CLEO (колайдер CESR)

КЕДР (колайдер ВЭПП-4, Інститут ядерної фізики СВ РАН,
Новосибірськ)

КМД, СНД (колайдер ВЭПП-2М, ВЭПП-2000, Інститут ядерної фізики
СВ РАН, Новосибірськ)

Крім наукових експериментів, детектори елементарних частинок знаходять застосування і в прикладних задачах - в медицині (рентгенівські апарати з малою дозою опромінення, томографи, променева терапія), матеріалознавстві (дефектоскопія), для передпольотного огляду пасажирів і багажу в аеропортах.

4 ВИКОРИСТАННЯ ДЕТЕКТОРІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ КОСМІЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

4.1 Детектор CALET

Група CALET опублікувала дані трирічних вимірювань спектра космічних протонів з енергіями від 50 гігаелектронвольт до 10 тисяч тераелектронвольт (рис. 4.1). Цей рекордно широкий діапазон об'єднує діапазони магнітних спектрометрів і менш досконалих калориметр, що дозволяє об'єднати і незалежно перевірити дані попередніх експериментів. Можливо, в майбутньому ці дані допоможуть вченим пояснити спостережуваний злам в сумарному спектрі всіх космічних частинок [10].



Рисунок 4.1 – Фотографія японського експериментального модуля «Кібо», на якому встановлений CALET.

Наша Земля постійно знаходиться під обстрілом космічних променів - електронів, позитронів, протонів, дейтронів, ядер гелію і більш важких

частинок, що прилітають з космосу. Енергія таких частинок охоплює надзвичайно широкий діапазон від десятих часток до 10^{11} гігаелектронвольт. Сумарне число часток всіх сортів зменшується при зростанні енергії за степеневим законом: аж до енергій близько мільйона гігаелектронвольт потік частинок обернено пропорційний енергії в ступені 2,75, при високих енергіях спостерігається ще більш різке падіння. Якщо отнорміровани спектр частинок на цей статичний закон і побудувати його графік, то в області мільйона гігаелектронвольт буде спостерігатися різкий злам - так зване «коліно». В даний час фізики не знають, чому спектр космічних променів виглядає саме таким чином, хоча і висувують величезне число гіпотез.

Зокрема, одна з гіпотез пояснює «коліно» гіпотетичним обрізанням спектрів окремих частинок, положення якого може залежати від їх сорту. В принципі, цю гіпотезу можна перевірити за допомогою космічних детекторів, що безпосередньо реєструють енергію, заряд і напрямок руху частинок. В даний час фізикам відомо дві конструкції таких детекторів. З одного боку, на низьких енергіях більш зручно використовувати магнітний спектрометр - прилад, який визначає енергію частинок за допомогою магнітного поля. З іншого боку, на високих енергіях більш зручний іонізаційний калориметр - установка, яка відновлює енергію частинок по народженим нею вторинним часткам. На жаль, «зшита» таким чином картинка може бути спотворена неконтрольованими систематичними похибками, що по-різному проявляються в різних частинах спектра. Щоб виключити таку можливість, дані детекторів необхідно перевіряти ще раз.

Телескоп CALET (CALorimetric Electron Telescope), що працює на Міжнародній космічній станції з серпня 2015 року, будувався саме для цієї мети. CALET складається з зарядового детектора, що формує зображення, калориметра і поглинального калориметра. Сумарна товщина калориметра досягає тридцяти довжин випромінювання (radiation length). Завдяки конструктивним особливостям детектора він реєструє протони з енергіями від 50 до 10 тисяч гігаелектронвольт, що покриває діапазони як магнітних

спектрометрів (BESS-TEV, PAMELA і AMS-02), так і менш досконалих калориметр (ATIC, CREAM і NUCLEON). При цьому відносна систематична похибка CALET не перевищує десяти відсотків, що можна порівняти з іншими експериментами.

Тепер група CALET нарешті проаналізувала дані, зібрані телескопом з 13 жовтня 2015 по 31 серпня 2018 року. За цей проміжок часу високоенергетичний тригер в сумі пропрацював близько 21422 годин, а низькоенергетичний - близько 365 годин. Щоб відновити параметри протонів, які потрапили в детектор, вчені чисельно моделювали їх розпади за допомогою пакетів EPICS, FLUCA і GEANT4, заснованих на методі Монте-Карло.

В результаті вчені побудували спектр космічних протонів (рис. 4.2), який збігався з даними інших експериментів у всіх діапазонах енергій.

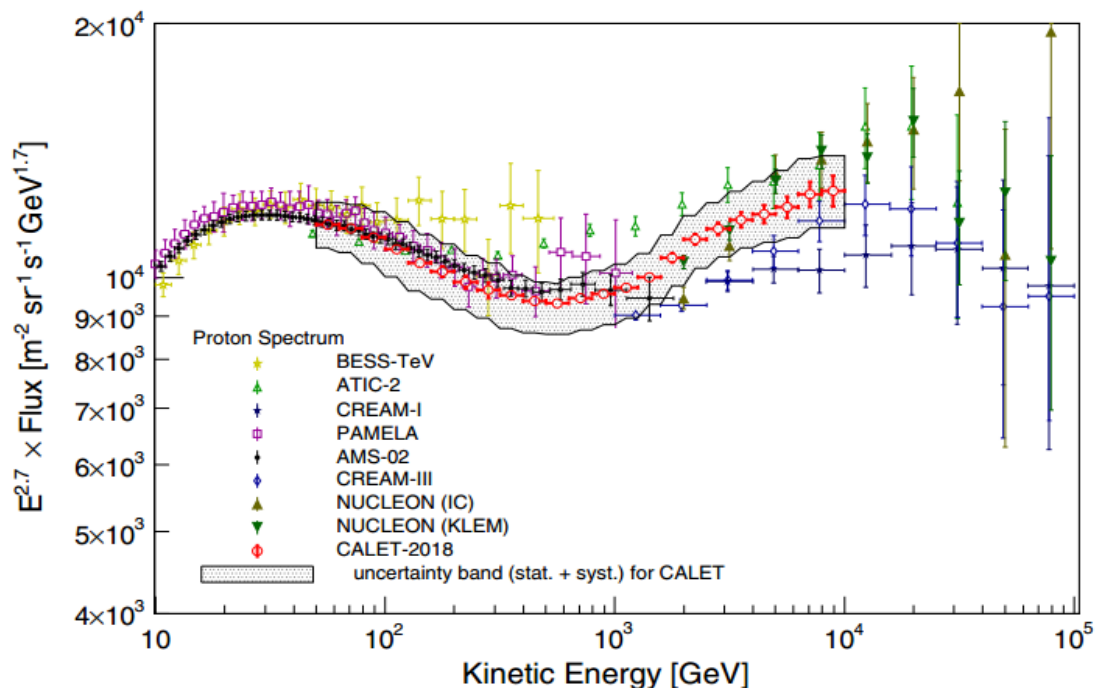


Рисунок 4.2 – Спектр, побудований на підставі даних CALET (червоні точки) і межі систематичної похибки (сіра область) в порівнянні з даними інших детекторів

За оцінками вчених, цей спектр можна наблизити статечною залежністю, показник якої дорівнює $\gamma_1 \approx -2,81 \pm 0,03$ в діапазоні 50-500 гігаелектронвольт і $\gamma_2 \approx -2,56 \pm 0,04$ в діапазоні 1-10 тераелектронвольт (рис. 4.3). Іншими словами, при високих енергіях спектр «посилюється».

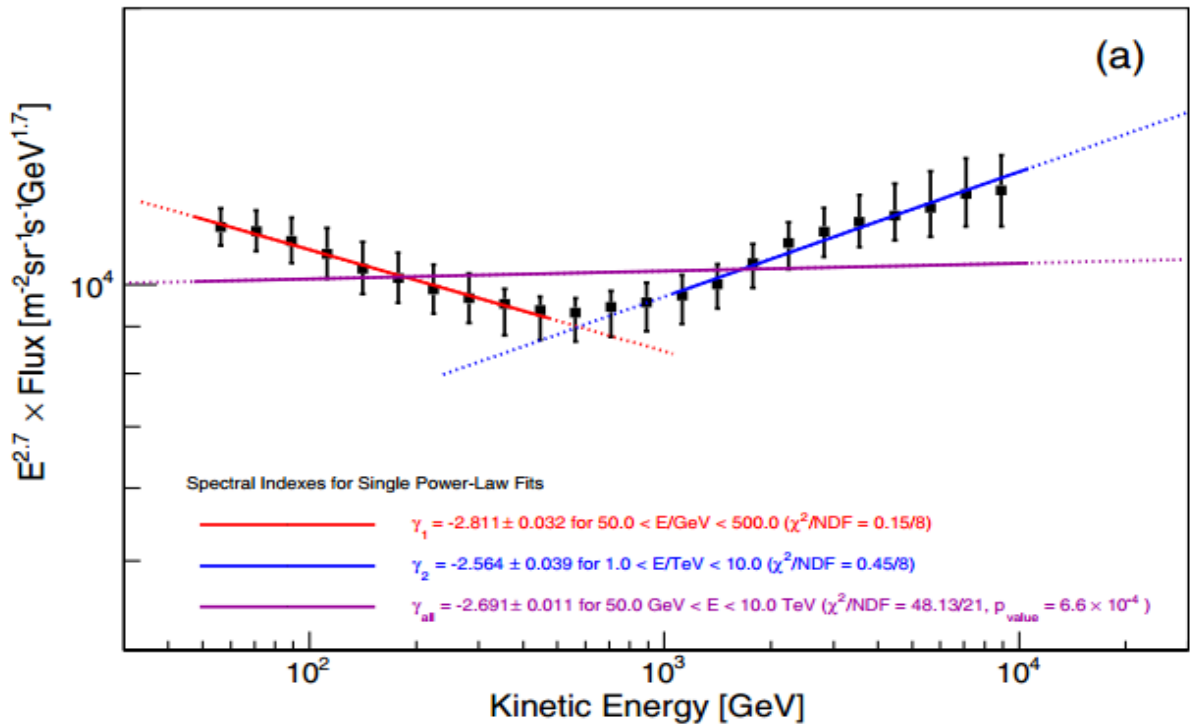


Рисунок 4.3 – Статечні закони, наближено описують спектр космічних протонів

Таким чином, вчені роблять висновок, що зі статистичної значимістю близько трьох сигма спектр космічних протонів можна описати єдиною статечною залежністю. Це збігається з даними попередніх експериментів. На жаль, без даних про спектр інших космічних частинок - наприклад, ядер гелію, - ці дані не дозволяють перевірити гіпотезу про природу «коліна». Проте, автори статті вважають, що в майбутньому, коли CALET також виміряти спектр альфа-частинок і інших ядер, інформація про «посилення» протонного спектра допоможе прояснити це питання.

Космічні промені - це джерело частинок найвищих енергій, з якими коли-небудь могло працювати людство, а тому їх вивчення відіграє важливу

роль в сучасній фізиці. Втім, скільки-небудь значущу статистику по високоенергетичним частинкам вчені почали набирати тільки нещодавно. Наприклад, в квітні 2015 року детектор AMS опублікував результати чотирирічної роботи, в ході якої він зловив близько 60 мільярдів частинок і виявив незрозумілий надлишок антипротонів. У листопаді 2011 китайський супутник DAMPE вперше виміряв спектр космічних електронів і позитронів з енергіями до 4,6 тераелектронвольт і підтвердив «провал» в області 0,9 тераелектронвольт, на який побічно вказували дані інших експериментів. Два роки по тому AMS також підтвердив це спостереження.

4.2 Використання детектора ALICE у космічних спостереженнях

Детектор ALICE (A Large Ion Collider Experiment), розроблений та встановлений для LHC, як виявилось, можна використовувати для спостережень космічних променів. Колаборація ALICE опублікувала статтю [11] з абсолютно нехарактерним для коллайдерів дослідженням. У ній фізики вивчали частки, народжені не в зіткненнях протонів, а прилетіли зверху, що народилися при бомбардуванні космічними променями земної атмосфери. І найцікавіше, що детектор не просто зареєстрував такі частинки, а дозволив отримати цікаву інформацію про склад космічних променів.

Оскільки детектор ALICE знаходиться під землею, до нього долітають тільки мюони - інші частинки поглинаються гірськими породами потужністю в десятки метрів. Якщо вихідна частка космічних променів з великою енергією породжувала широкий атмосферний злива, до детектора долітав не один, а безліч мюонів. За весь час роботи було накопичено приблизно 22 мільйони таких подій. Особливий інтерес представляли події, коли детектор реєстрував одночасно понад сто (!) Мюонів (рекорд - 276 мюонів). Завдяки відмінним інструментальним характеристикам детектора, їх реєстрація і вимір не були складними.

Моделювання показало, що такі багатомюонні події можуть породжуватися лише космічними променями з енергією більше 10^{16} eV, тобто трохи вище характерного зламу в спектральному розподілі під назвою «коліно». Найкраще збіг моделювання з даними відповідало гіпотезі про те, що первинні частинки космічних променів таких енергій - це не протони, а, скоріше, важкі ядра, наприклад залізо. Таким чином, ALICE несподівано стає учасником міжнародної програми з дослідження складу, а значить і походження, космічних променів високої енергії.

Останнім часом детектор знаходиться на модернізації, над якою працюють декілька провідних установ у світі, зокрема команда Lawrence Berkeley National Laboratory.

Заснована в 1931 році на переконанні, що найбільші наукові проблеми найкраще вирішуються командами, Lawrence Berkeley National Laboratory і його вчені отримали 13 Нобелівських премій. Сьогодні дослідники Berkeley Lab розробляють рішення у галузі стійкої енергетики і екологічні рішення, створюють нові корисні матеріали, просувають кордони обчислювальної техніки і досліджують таємниці життя, матерії і Всесвіту. Вчені з усього світу покладаються на можливості лабораторії для їх власного відкриття науки. Berkeley Lab є багатопрограмною національною лабораторією, керованою з Каліфорнійського університету для Управління науки Міністерства енергетики США.

Уже більше року, невелика команда в департаменті США Національної лабораторії Лоренса Берклі енергетики (Berkeley Lab) працює для збірки, тестування частин транспортного детектора для модернізації матриці детектора ALICE в лабораторії CERN в Європі [4].

ALICE, фізичний ядерний експеримент, призначений для спостереження зіткнення іонів свинцю з високою енергією з протонами, щоб досліджувати екзотичні стани надгорячої речовини, відомої як кварк-глюонної плазми, яка, як вважають, існувала в ранньому Всесвіті.

Berkeley Lab є одним з п'яти місць по всьому світу, що будує детекторні панелі (так звані «палиці») для проекту модернізації, що дозволить підвищити ефективність системи внутрішнього стеження детектора ALICE - включаючи його дозвіл приймати знімки зіткнень частинок, його довговічність і швидкість збору даних.

Дослідники ядерної фізики в Лабораторії Берклі по черзі транспортують чотири довгих жердин детектора одночасно в замовному прозорому контейнері, що забезпечений плечовим ременем. При завантаженні метровий контейнер важить близько 25 фунтів. Жердини складаються з послідовностями кремнієвих чіпів і пов'язаних з ними схем і силових компонентів.

Кожний блок має вісім модулів датчиків, і кожен модуль оснащений 14 датчиками, в цілому 112 датчиків на блок.

Інші міста збірки для нових детекторів в Китаї, Англії, Франції, Італії, Нідерландах і Кореї. Номери для спільної роботи ALICE близько 1500 вчених з більш ніж 100 фізичних інститутів в 30 країнах. Участь Berkeley Lab в ALICE підтримується Управлінням з ядерної фізики МЕ США.

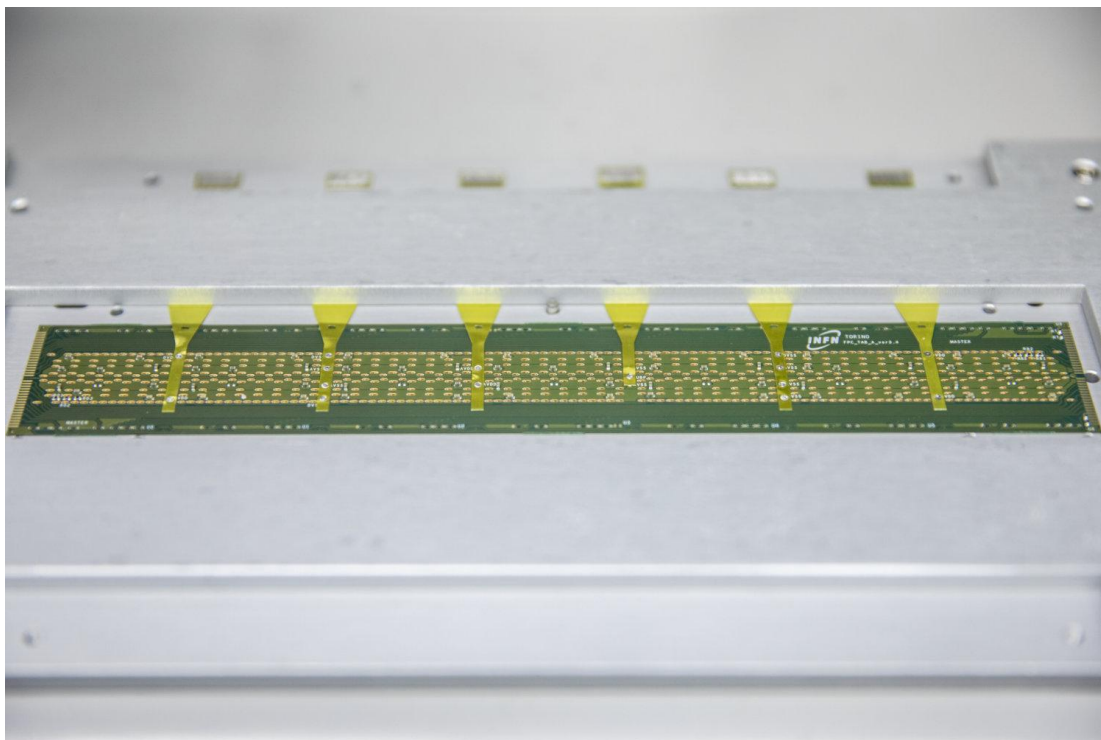


Рисунок 4.4 – Кремнієві чіп-компоненти підготовлені для розміщення на штирі детектора (Фото: Мэрилин Чунг / Беркли Лаб)

Оновлені детектори засновані на технології монолітних піксельних детекторів - детектор цього типу більш раннього покоління використовувався для детектора STAR (Solenoidal Tracker at RHIC) в релятивістському колайдері важких іонів Національної лабораторії Брукхейвена (RHIC).

Оновлені детектори ALICE розраховані на більш тривалий термін служби, можуть обробляти сигнали приблизно в 10 разів швидше, ніж більш ранні детектори, і мають індивідуальний розмір пікселя близько 30 мікрон.

Покращена роздільна здатність дозволить дослідникам краще диференціювати частинки, що утворюються в початкових зіткненнях ядер свинцю, від частинок, які розгалужуються в результаті розпадів частинок, які сліднують за цими початковими взаємодіями.

Завершений детектор буде мати сім концентричних шарів, які будуть містити в цілому 24000 кремнієвих датчиків для виявлення взаємодії частинок. Монтаж на установку заплановано в березні 2020 року, і буде введено в експлуатацію на початку 2021 року.

4.3 Детектор DESI використовує 5000 сенсорів

Новий прилад, встановлений на телескопі в Арізоні, націлив свій робочий масив з 5000 волоконно-оптичних «очей» на нічному небі для отримання перших зображень, що демонструють унікальний вигляд світла галактики [12].

Це було перше випробування Dark Energy Spectroscopic Instrument (Спектроскопічного Приладу Темної Енергії), відомого як DESI, з його майже повним комплектом компонентів. Довгоочікуваний прилад призначений для дослідження таємниці темної енергії, яка складає близько 68 відсотків Всесвіту і прискорює її розширення.

Компоненти DESI призначені для автоматичного наведення на вибрані набори галактик, збирання їх світла, а потім розділення цього світла на вузькі кольорові смуги, щоб точно відобразити їх відстань від Землі та оцінити, наскільки розширився Всесвіт, коли це світло пройшло на Землю. В ідеальних умовах DESI може проїхати через новий набір 5000 галактик кожні 20 хвилин.

Останній рубіж, досягнутий 22 жовтня, означає відкриття останнього тестування DESI до формального початку спостережень на початку 2020 року.

Тест-спектр та охоплення нічного неба детектором DESI наведено на рис. 4.5.

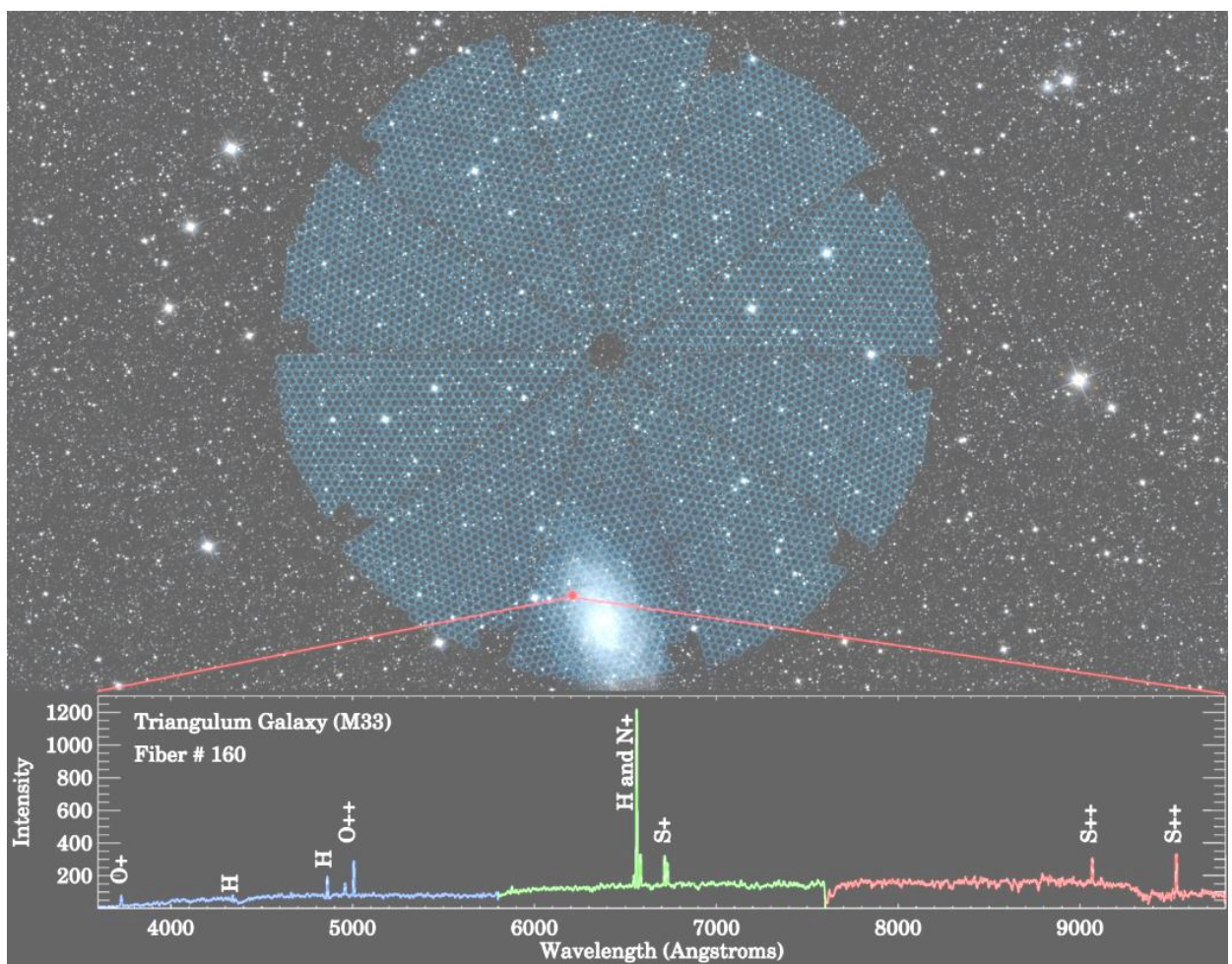


Рисунок 4.5 – Тест-спектр (низ) та охоплення нічного неба детектором DESI (верх)

5000 спектроскопічних «очей» DESI можуть охоплювати зону неба приблизно в 38 разів більше, ніж повний місяць, як видно з цього перекриття фокусної площини DESI на нічному небі (вгорі). Кожне з цих керованих роботами очей може зафіксувати волоконно-оптичний кабель на одному об'єкті, щоб зібрати його світло. Зібране світло, зібране з невеликого регіону в галактиці Трикутник (дно) одним волоконно-оптичним кабелем (червона крапка), розбивається на спектр (дно), що розкриває відбитки пальців елементів, наявних у галактиці, і допомагає вимірювати відстань до галактики. Показаний тут тест-спектр був зібраний DESI 22 жовтня 2019 (Кредит: Співпраця DESI; Огляди спадщини; NASA / JPL-Caltech / UCLA)

Подібно потужній машині часу, DESI буде глибоко зазирнути у дитинство та ранній розвиток Всесвіту - приблизно до 11 мільярдів років тому - для створення найбільш детальної 3D-карти Всесвіту.

Неодноразово відображаючи відстань до 35 мільйонів галактик і 2,4 мільйона квазарів на третині площі неба протягом п'ятирічного пробігу, DESI навчить нас більше про темну енергію. Квазари, серед найяскравіших об'єктів у Всесвіті, дозволяють DESI глибоко зазирнути у минуле Всесвіту.

DESI забезпечить дуже точні вимірювання швидкості розширення Всесвіту. Гравітація сповільнила цей темп розширення у ранньому Всесвіті, хоча темна енергія з тих пір відповідає за пришвидшення її розширення.

У співпраці DESI беруть участь майже 500 дослідників у 75 установах у 13 країнах.

Встановлення DESI розпочалося в лютому 2018 року на телескопі "Ніколас У. Мейал" в Національній обсерваторії Кітт Пік поблизу Тусон, штат Арізона.

Машина розміщує фокальну площину «пелюстка» під час підготовки до її встановлення. Десять пелюсток у формі клина складають фокусну площину DESI (рис. 4.6).

Фокусна площина DESI, що містить 5000 робототехнічних позиціонерів, які обертаються в хореографічному "танцюванні", щоб індивідуально фокусуватись на галактиках, знаходиться у верхній частині телескопа.

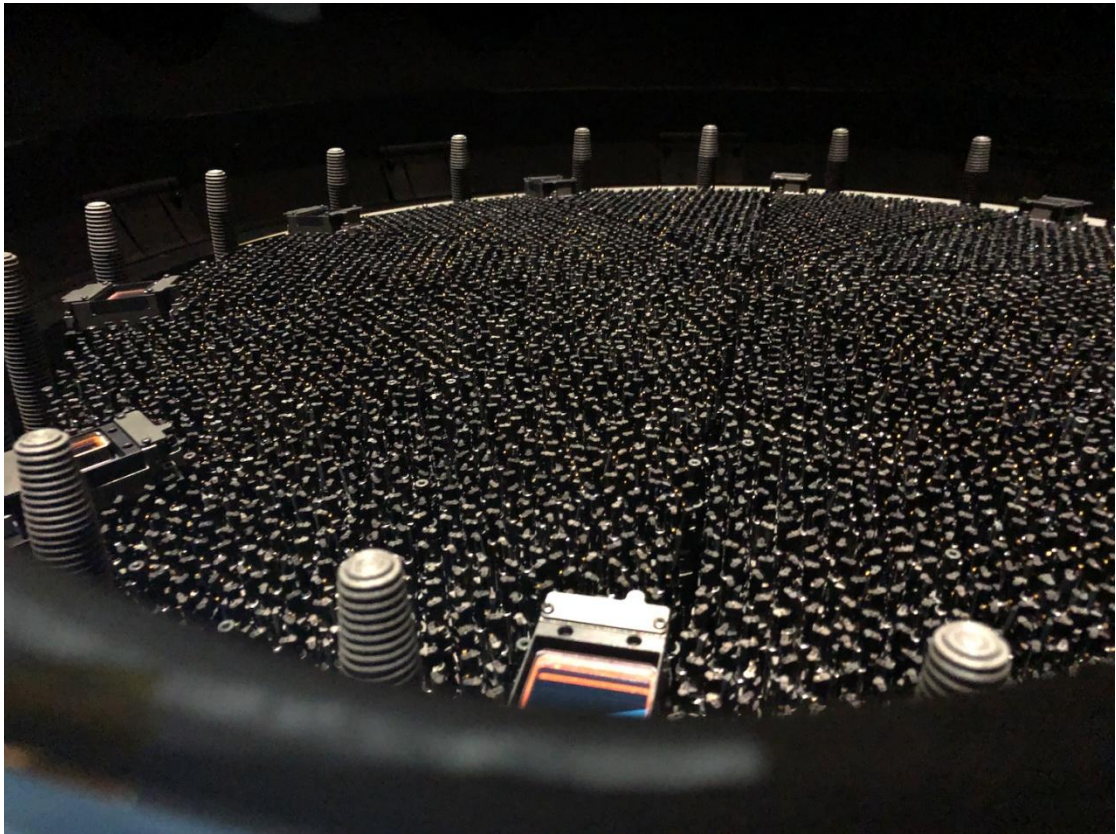


Рисунок 4.6 – Фокусна площина DESI, що містить 5000 робототехнічних позиціонерів

Ці маленькі роботи - кожен з яких тримає волоконно-оптичний кабель, який є приблизно середньою шириною людського волосся – слугують очами DESI. Позиціонерам потрібно близько 10 секунд повернутися до нової послідовності цільових галактик. Завдяки безпрецедентній швидкості обстеження, DESI зробить карту в 20 разів більше об'єктів, ніж будь-який попередній експеримент.

Фокальна площина, яка складається з півмільйона окремих частин, розташована у серії з 10 пелюсток клиноподібної форми, кожен з яких містить 500 позиціонерів та маленьку камеру, щоб допомогти телескопу вказувати та фокусувати.



Рисунок 4.7 – Фокусна площина та коректор стовбура (темно-сірого кольору) у верхній частині телескопа

Ця ілюстрація DESI в куполі телескопа Мейола показує фокусну площину та коректор стовбура (темно-сірого кольору) у верхній частині телескопа та спектрографи (показані жовтим кольором) під телескопом. Фокальна площина, стовбур коректора та інші компоненти DESI важать 11

тонн, а рухомий кронштейн телескопа Mayall, де встановлений DESI, важить 250 тонн і піднімається на 90 футів над підлогою в 14-поверховому куполі Mayall.

Серед останніх прибуттів на Пік Кітт - це колекція спектрографів, розроблених для розбиття зібраного світла на три окремі кольорові смуги, що дозволяє виконати точні вимірювання відстаней спостережуваних галактик у широкому діапазоні кольорів.

Ці спектрографи, які дозволяють робототехнічним очам DESI «бачити» навіть слабкі, далекі галактики, призначені для вимірювання червоного зміщення, що є зміщенням кольору предметів на більш довгі, червоніші довжини хвилі за рахунок руху об'єктів від нас. Зараз встановлено вісім спектрографів, останні дванадцять до кінця року. Щоб з'єднати фокальну площину зі спектрографами, що знаходяться під телескопом, DESI обладнаний близько 150 миль волоконно-оптичного кабелю.

5 РОЗРАХУНКИ ШУМОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТЕКТОРА

5.1 Методика розрахунку шумових характеристик напівпровідникового детектора

Кінцевим елементом усіх розглянутих у розділі 4 детекторів у більшості випадків є напівпровідниковий перетворювач енергії іонізуючої частки у електричний сигнал – чутливий датчик. Рівень його чутливості до слабких сигналів залежить від власного рівня шуму[13,14].

На сьогоднішній день існують чутливі датчики з постійним зміщенням, розробляють також датчики з НВЧ-зміщенням.

Для оцінки електронного шуму детекторів іонізуючого випромінювання загальноприйнятою в даний час є поняття еквівалентного шумового заряду ENC. Це пов'язано з тим, що γ -квант утворює в датчику лавину зарядів (нерівноважних носіїв), кількість яких однозначно визначає енергію цього кванта. Реєстрація кількості утворених нерівноважних носіїв і є основним завданням детектора. Для цього в традиційних пристроях з постійним зміщенням використовується зарядочувствительний підсилювач, що перетворює заряд на вході в напругу (або струм) на виході.

Еквівалентний шумовий заряд ENC визначає внесок шумових факторів в загальний сигнал в одиницях заряду. Це дозволяє врахувати його дію на ширину піку амплітудного спектра реєстрованого випромінювання разом з внеском статистичного шуму. Ширина піку на амплітудном спектрі в припущенні гауссовського розподілу може бути описана параметром дисперсії σ [2].

$$W_{FWHM} = 2,35 * \sigma * W_{eh}, \quad (5.1)$$

де W_{eh} – енергія генерації пари нерівноважних носіїв.

Дисперсія числа пар утворених при іонізації носіїв з урахуванням статистичного і електронного шуму дорівнює [3]:

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{ст}}^2 + \sigma_{\text{эл}}^2. \quad (5.2)$$

Статистичний розкид $\sigma_{\text{ст}}^2$ залежить від енергії γ -кванта W_γ і енергії освіти пари нерівноважних носіїв W_{eh} [2]

$$\sigma_{\text{ст}} = \sqrt{\frac{F\chi W_\gamma}{W_{\text{eh}}}}, \quad (5.3)$$

де F – фактор Фано.

Дисперсія за рахунок електронного шуму:

$$\sigma_{\text{эл}} = \sqrt{\frac{ENC}{e}}. \quad (5.4)$$

Тут $\sigma_{\text{эл}}$ визначається за аналогією з $\sigma_{\text{ст}}$ по амплітуді числа шумових зарядів.

Еквівалентний шумовий заряд ENC визначається по-різному для випадку детектора з постійним і НВЧ-зміщенням.

Методика оцінки і розрахунки ENC для детекторів з постійним зміщенням відомі [1-3]. Величина ENC для поширеною конструкції напівпровідникового детектора іонізуючого випромінювання (НДІВ) з датчиком на основі високоомного напівпровідника р-типу (CdTe, CdZnTe) може бути записана у вигляді [15]:

$$ENC^2 = \exp(2)\chi \left(\frac{kT\tau}{2R_d} + \frac{I_d^2 b^2 n \theta \tau}{P^2 (1 + \omega^2 \theta^2)} + \frac{kT\tau}{2R_f} + \frac{kT(C_{\text{in}} + C_f + C_m)^2}{2g_{\text{in}} \tau} + A_F(\omega) \right) \quad (5.5)$$

де I_d – постійний струм зміщення датчика;

k – постійна Больцмана;

T – температура;

τ – час формування сигналу в усилительном тракті;

b – ставлення подвижностей електрона і дірки;

n – концентрація вільних електронів в обсязі датчика;

P – повне число дірок в обсязі датчика;

V – об'єм кристала датчика;

ω – циклічна частота вхідного сигналу

R_f – опір резистора зворотного зв'язку підсилювача;

C_{in} – вхідна ємність підсилювача;

C_f – ємність зворотнього зв'язку підсилювача;

C_m – ємність монтажу;

g_{in} – вхідна провідність підсилювача;

θ – середній час життя вільних нерівноважних носіїв (у припущенні, що воно однаково для електронів і дірок);

A_F – коефіцієнт флікер-шуму ($1 / f$).

Розрахунки шумових характеристик детекторів з СВЧ-зміщенням практично не представлені і обмежені лише оцінками.

Величину ENC для НДІВ з СВЧ-зміщенням з датчиком на основі високоомного напівпровідника р-типу (CdTe, CdZnTe) можна представити у вигляді [16]:

$$ENC_U^2 = \exp(2) * (P_s \frac{b^2 n \theta \tau}{2 \rho l^2 p^2 (1 + 4 \pi^2)} + \frac{e I_s \tau}{4} + \frac{k T \tau}{2 R_f} + \frac{k T (C_{in} + C_f + C_m)^2}{2 g_m \tau}) \quad (5.6)$$

де P_s – потужність СВЧ-випромінювання, що проходить через датчик;

ρ – питомий опір матеріалу датчика;

l – товщина датчика в напрямку E - складової НВЧ-поля;

I_S – струм зміщення детекторного НВЧ-діода.

Перше і друге доданки в дужках формули (5.6) визначають генераційно-рекомбінаційний шум датчика і шум СВЧ-діода в термінах ЕНС. Решта складові визначають шуми підсилювача аналогічно (5.5).

5.2 Вихідні дані та формули розрахунків шумових характеристик

Розрахунки виконувались для розповсюдженої циліндричної форми датчика детектора [16]. Для розрахунку шумових характеристик в програму Mathcad 14 були введені відповідні параметри [14] такі як:

$T = 300 \text{ K}$ – температура;

$m_e = 0,11$ – ефективна маса електронів;

$m_h = 0,63$ – ефективна маса дірок;

$\mu_n = 1000 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ – рухливість електронів;

$\mu_p = 80 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ – рухливість дірок;

$\theta = 5 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ – час життя носіїв;

$l = 0,3 \text{ cm}$ – товщина зразка;

$d = 1 \text{ cm}$ – діаметр зразка;

$U = 100 \text{ V}$ – прикладене постійне зміщення

$\omega = 10^6 \text{ Гц}$ – частота сигналу;

$\tau = 0,5 \cdot 10^6 \text{ s}$ – час формування сигналу;

$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ – заряд електрона;

$p = 1 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$ – концентрація акцепторної домішки;

$g_1 = 10^{-3} \text{ cm}$ – вхідня провідність передпідсилювача;

$I_D = 1 \cdot 10^{-9}$ – струм зміщення НВЧ-діода;

$C_{\Sigma}=10^{-11}$ – ємність на вході передпідсилювача.

Розраховано ширину забороненої зони CdTe:

$$E_g(T) = (1,605 - 4,910 \cdot 10^{-4} \cdot T), \quad (5.7)$$

$$E_g(T) = 1,458 \text{ eV}.$$

Величина еквівалентного шумового заряду (ENC) для поширеної конструкції напівпровідникового детектора іонізуючого випромінювання (НДІВ) з датчиком на основі високоомного напівпровідника р-типу (CdTe) може бути записана у вигляді:

$$ENC = \frac{\sqrt{(ENC_{p2}(p, T) + ENC_{s2})}}{q}. \quad (5.8)$$

Для формули 5.8 розраховали $ENC_{p2}(p, T)$:

$$ENC_{p2}(p, T) = ENC_{cd2}(p, T) + ENC_{gr2}(p, T) + ENC_f^2, \quad (5.9)$$

$$ENC_{cd}(p, T) = 31,717;$$

$$ENC_{gr}(p, T) = 141,766;$$

$$ENC_f = 17,284;$$

$$ENC_p(p, T) = 31,717 + 141,766 + 17,284 = 146,295.$$

Для формули 5.9 розраховали ENC_{s2} :

$$ENC_s = \frac{\sqrt{ENC_{s2}}}{q}, \quad (5.10)$$

$$ENC_s = 345,679.$$

Підставимо у формулу 5.10 отримані результати і отримаємо $ENC=375,361$.

Величину ENC для НДІВ с НВЧ-зміщенням с датчиком на основі високоомного напівпровідника р-типа (CdTe) можна представити таким чином:

$$ENC_U = \frac{\sqrt{(ENC_{Up2}(p, T) + ENC_{Cs2})}}{q}. \quad (5.11)$$

Для формули 5.11 розраховували $ENC_{Up2}(p, T)$:

$$ENC_{Up2}(p, T) = ENC_{UD2}(p, T) + ENC_{Ugr2}(p, T) + ENC_{cf2}, \quad (5.12)$$

$$ENC_{Up}(p, T) = 91,864.$$

Підставимо у формулу 5.11 отримані результати та отримаємо $ENC_U = 357,677$.

5.3 Результати моделювання характеристик за допомоги MathCad

Розроблена програма дозволяє отримати залежності шумових характеристик циліндричного чутливого елемента напівпровідникового детектора від параметрів матеріалу датчика (зокрема концентрації домішки р) з урахуванням електричних параметрів елементів тракту підсилення.

Отримані характеристики наведені на рис. 5.1 – 5.5.

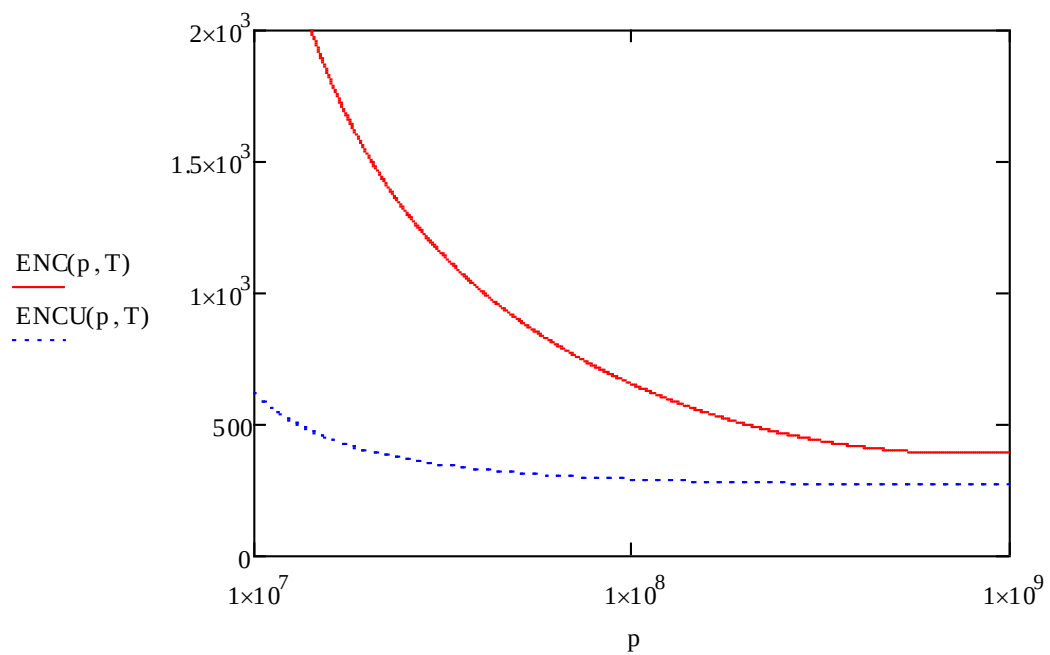


Рисунок 5.1 – Залежність еквівалентного шумового заряду від концентрації акцепторної домішки та температурі 300K.

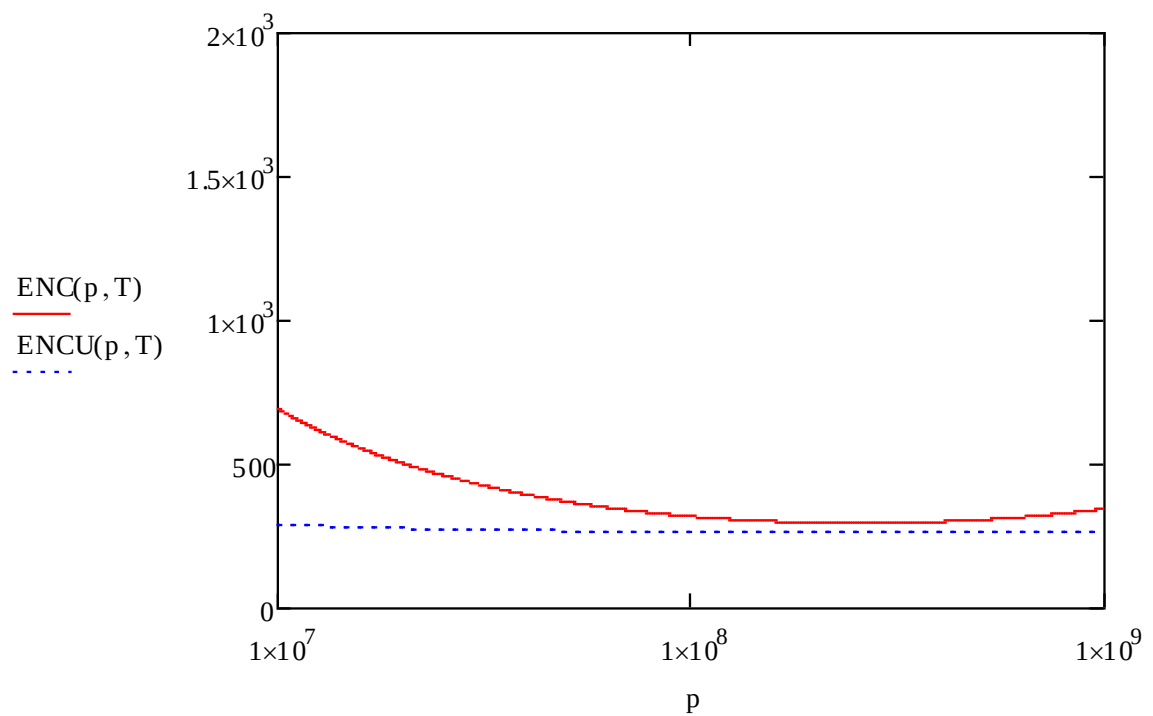


Рисунок 5.2 – Залежність еквівалентного шумового заряду при постійному зміщенні від концентрації акцепторної домішки та температурі 290K

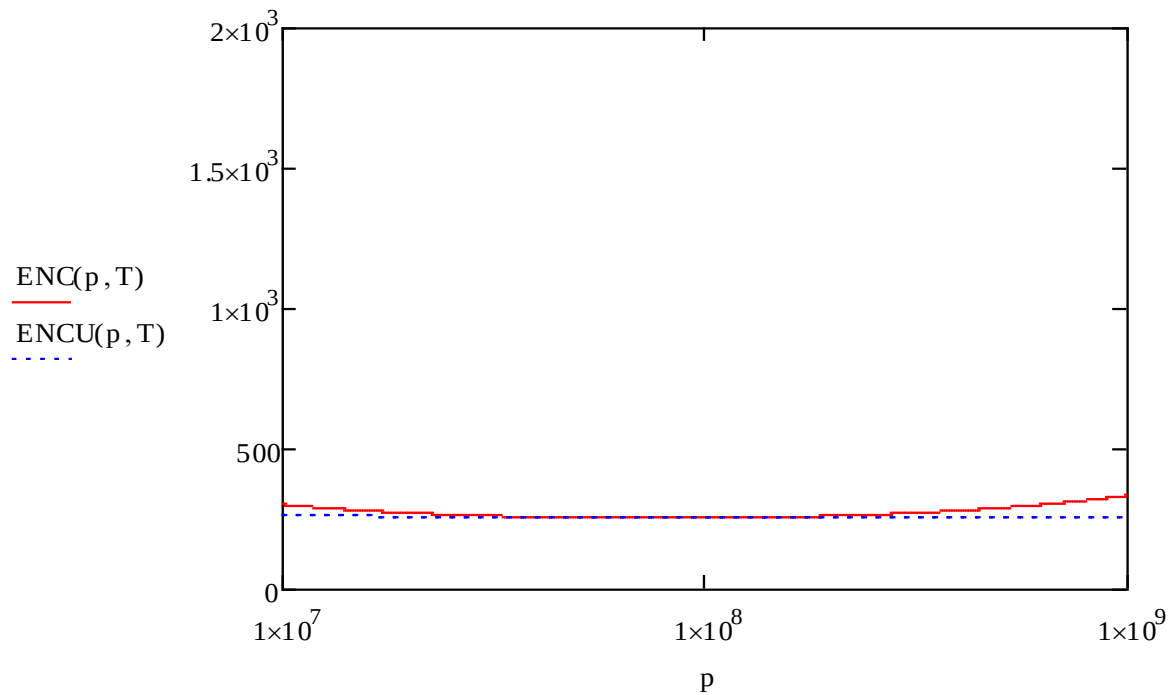


Рисунок 5.3 – Залежність еквівалентного шумового заряду при постійному зміщенні від концентрації акцепторної домішки та температурі 280К

Таким чином помітна суттєва (у 10 разів) залежність шумових характеристик напівпровідникового детектора з постійним зміщенням від температури, особливо при низьких (менше ніж 10^{-8} см^{-3}) концентраціях акцепторної домішки. При цьому шуми детектора з НВЧ-зсувом змінюються значно менше (лише у 2 рази).

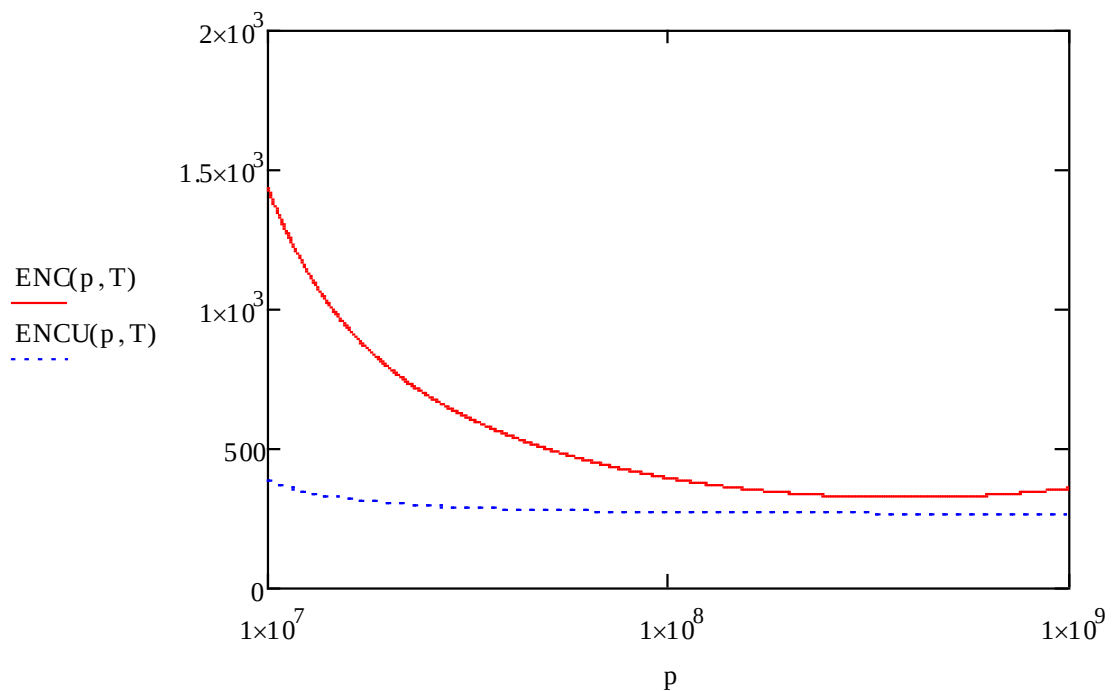


Рисунок 5.4 – Залежність еквівалентного шумового заряду від концентрації акцепторної домішки та зменшенні постійного зміщення у 2 рази (до 50В) та еквівалентного зменшення потужності НВЧ-зміщення

Таким чином зменшення як постійного так і НВЧ-зміщення призводять до еквівалентного зменшення шуму. Але аналогічно зменшується і корисний сигнал. Тож цей шлях не дає нам ніякого виграшу.

Були також проведені розрахунки, що відображають зміну якісного складу матеріалу чутливого елемента детектора. Ці зміни безпосередньо призводять до зменшення ефективного часу життя носіїв.

Результати вищезгаданих розрахунків наведено на рис. 5.5.

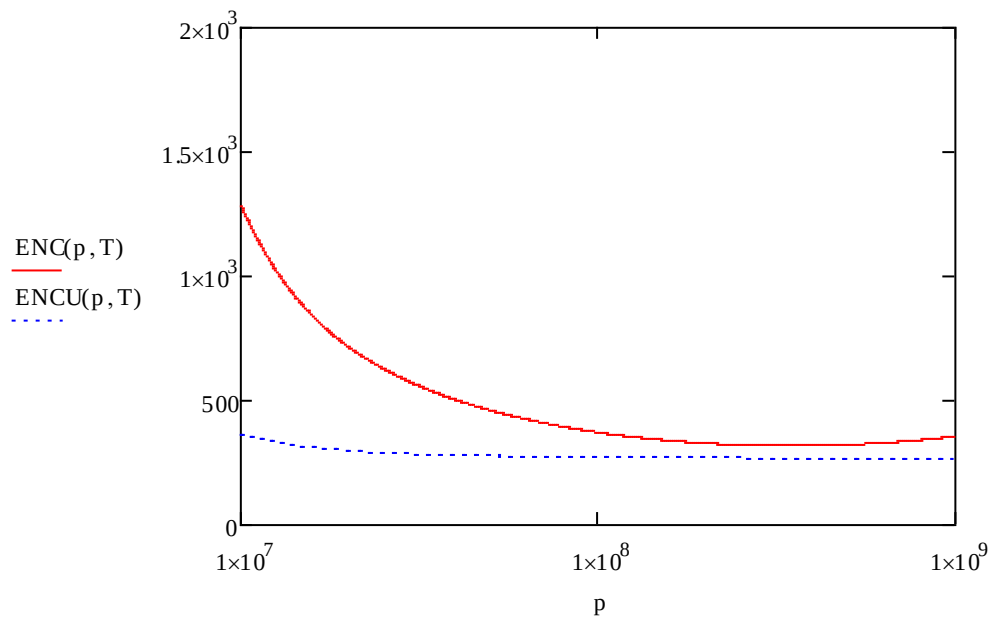


Рисунок 5.5 – Залежність еквівалентного шумового заряду від концентрації акцепторної домішки та зменшенні ефективного часу життя носіїв у 5 разів (до 10^{-6} с)

Зменшення ефективного часу життя носіїв у 5 разів (до 10^{-6} с) призводить до деякого (приблизно у 2 рази) зменшення шумів за використання як постійного так і НВЧ-зміщення особливо при низьких (менше ніж 10^{-8} см⁻³) концентраціях акцепторної домішки. Але при більших концентраціях домішки цей ефект зменшується.

ВИСНОВКИ

В атестаційній роботі розглянуті в історичному розрізі уявлення людства про космічне випромінювання, склад та енергетичний спектр космічного випромінювання з точки зору сучасної науки.

Проаналізовано методи реєстрації космічних часток з урахуванням особливостей їх руху у атмосфері та магнітному полі Землі. Наведено, що елементи космічних детекторів можуть мати структуру та склад, подібний до цих параметрів у детекторах іонізуючого випромінювання для прискорювачів.

Докладно розглянуті основні типи детекторів іонізуючого випромінювання, вимоги до них.

Наведено конструкцію та принцип дії універсального багатошарового детектора, що використовують у сучасних колайдерах.

Виконано порівняльний аналіз найбільш сучасних детекторів космічного випромінювання, їх можливостей та перспектив розвитку.

Наведено методику розрахунку шумових характеристик датчика та вхідного тракту підсилювача, виконані розрахунки шумових характеристик для варіантів постійного та НВЧ зміщення типового датчика, встановлені їх залежності від температури, концентрації домішки, ефективного часу життя.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Bertuccio G. A. Method for the Determination of the Noise Parameters in Preamplifier Systems for Semiconductor Detectors / G. A. Bertuccio, A. Pullia. // Rev. Sci. Instru. – 1993.V.2 - P. 3294-3298.
2. Кутний В.Е. Разработка дозиметрических и спектрометрических блоков регистрации γ -излучения на основе полупроводниковых соединений CdTe (CdZnTe) для АЭС Украины // В.Е. Кутний, А.В. Рыбка, Д.В. Кутний. // Вопросы атомной науки и техники. – 2003. – Т.7, № 13. – С. 167-171.
3. Захарченко А.А. Моделирование влияния шумов на характеристики CdZnTe детекторов γ -излучения / А.А. Захарченко, В.Е. Кутний, И.М. Прохорец и др. // Радиотехника и информатика. – 2007. – №1(36). – С.13-16.
4. Як отримати детектор частинок на літаку Режим доступу: <https://newscenter.lbl.gov/2019/09/19/how-to-get-a-particle-detector-on-a-plane/>(Дата звернення 13.10.2019р.)
5. Что мы знаем о космических лучах Режим доступу: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/pilgrims/cr04.htm> (Дата звернення 23.10.2019р.)
6. Группен К. Детекторы элементарных частиц./ – Новосибирск. Сибирский хронограф, 1999. – 356с.
7. Полупроводниковые детекторы в дозиметрии ионизирующих излучений / В. К. Ляпидевский.. — М.: Атомиздат, 1973. — 179 с.
8. Акимов, Ю. К. Газовые детекторы ядерных излучений. — Дубна: ОИЯИ, 2011. — 243 с.
9. Николаев В. А. Твердотельные трековые детекторы в радиационных исследованиях / — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — 284 с.

10. Детектор CALET охватил рекордный диапазон энергий космических протонов Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2019/05/13/CALET> (Дата звернення 25.10.2019р.)
11. Study of cosmic ray events with high muon multiplicity using the ALICE detector at the CERN Large Hadron Collider Режим доступа <https://arxiv.org/abs/1507.07577> (Дата звернення 19.09.2019р.)
12. Новый детектор DESI открывает свои 5000 «глаз Режим доступа: <https://aboutspacejournal.net> »(Дата звернення 29.10.2019р.)
13. Ван дер Зил , А. Шумы при измерениях. Пер. с англ. / А.Ван дер Зил . - М.: Мир, 1979. - 292 с
14. Телурід кадмію: домішково-дефектні стани та детекторні властивості / Д.В.Корбутяк, С.В.Мельничук, Є.В.Корбут, М.М.Борисюк. – К.: «Іван Федоров», 2000. – 198 с.
15. Галат А.Б. Шумовые характеристики полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения с СВЧ-смещением// А.Б.Галат, Ю.Е. Гордиенко, Б.Г.Бородин. 2-я международная научная конференция «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития». Сб. науч. трудов. – Харьков: ХНУРЭ, 2009. – С. 78–80.
16. Галат А.Б. Анализ шумовых факторов полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения // А.Б.Галат, С.Ю. Черненко, Б.Г.Бородин. 3-я международная научная конференция «Функциональная компонентная база микро-, опто- и наноэлектроники». Сб. науч. трудов. – Харьков: ХНУРЭ, 2010. – С. 301–304.