**Міщенко Михайло Іванович. Електромагнітне розсіяння у випадкових дисперсних середовищах: фундаментальна теорія і застосування : Дис... д-ра наук: 05.07.12 – 2008**

|  |  |
| --- | --- |
|

|  |
| --- |
| **Міщенко М. I. Електромагнітне розсіяння у випадкових дисперсних середовищах: фундаментальна теорія i застосування. - Рукопис.**Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження. - Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2007.Дисертація присвячена розвитку та використанню мікрофізичного підходу до моделювання розсіяння електромагнітного випромінювання окремими частинками і випадковими дисперсними середовищами. Кардинально поліпшено *Т*-матричний метод строгого розв’язання рівнянь Максвела. Розроблено та розміщено на загальнодоступному електронному сервері пакет ефективних *Т*-матричних програм. Виконано детальний аналіз оптичних властивостей несферичних частинок та ефектів багаторазового розсіяння у випадкових дисперсних середовищах. У рамках рівнянь Фолді–Лакса досліджено граничний випадок дуже великої кількості і дуже малої об’ємної упаковки частинок, внаслідок чого отримано загальне рівняння переносу і загальне формулювання теорії слабкої локалізації електромагнітних хвиль. Класична теорія переносу узагальнена на випадок довільного анізотропного плоскопаралельного розрідженого дисперсного середовища. Виконано аналіз точності скалярної форми рівняння переносу та показано, що похибки скалярного наближення стають несуттєвими при розмірних параметрах частинок, більших за 3. Теоретично вивчена залежність характеристик слабкої локалізації від оптичної товщини дисперсного шару та фізичних параметрів розсіюючих частинок і передбачено поляризаційний опозиційний ефект. Факт одночасного існування опозиційних ефектів у яскравості й поляризації для ряду високоальбедних безатмосферних тіл Сонячної системи пояснено у рамках теорії слабкої локалізації електромагнітних хвиль. Сформульовано кількісні вимоги до кліматичної програми супутникового дистанційного зондування аерозольних частинок у земній атмосфері. Виявлено істотне падіння глобальної оптичної товщини тропосферних аерозолів за останні 20 років, яке супроводжується сильними регіональними змінами. |

 |
|

|  |
| --- |
| Дисертація підсумовує результати фундаментальних і прикладних досліджень, які проводилися автором, починаючи з 1987 р. і до теперішнього часу. В роботі була поставлена ціль розвинути уніфікований мікрофізичний підхід до задачі одноразового й багаторазового розсіяння світла, який безпосередньо випливає з рівнянь Максвела, і, зокрема, розробити як строгі, так і асимптотично точні методи розрахунку світлорозсіюючих властивостей індивідуальних частинок та великих груп частинок. Другою ціллю дисертації, нерозривно зв’язаною з першою, було застосувати розроблені методи до вирішення конкретних проблем, які диктуються практикою. Нижче ми перелічимо основні результати дисертації та обговоримо, якою мірою вдалося досягти її головних цілей.**Строгий розв’язок рівнянь Максвела.** Безперечно, якщо прямий чисельно-точний розв’язок рівнянь Максвела на ЕОМ є можливим, то він є найкращим способом аналізу електромагнітного розсіяння. У дисертації суттєво розвинуто *Т*-матричний підхід до розв’язку рівнянь Максвела і значно розширено діапазон його практичного застосування. Отримано наступні конкретні результати:розроблено ефективні засоби покращення збіжності розрахунків за методом розширеної граничної умови, які привели до значного збільшення можливого діапазону розмірів і ступеня несферичності частинок;розроблено ефективний (квазі)аналітичний метод розрахунку одноразового розсіяння ансамблем хаотично або аксіально орієнтованих несферичних частинок;розроблено узагальнену *Т*-матричну процедуру розрахунку світлорозсіюючих характеристик несферичної частинки, що знаходиться в довільній орієнтації по відношенню до лабораторної системи координат, при довільних напрямках опромінення й розсіювання по відношенню до тієї ж системи координат. Ця процедура може ефективно використовуватися при розв’язанні рівняння переносу випромінювання в анізотропних середовищах, які складаються з повністю або частково орієнтованих частинок;розроблено пакет ефективних *Т*-матричних програм, який дозволяє вирішувати широке коло практичних задач. Цей пакет був розміщений на загальнодоступному електронному сервері http://www.giss.nasa.gov/~crmim у 1996 році і з тих пір активно використовується представниками найрізноманітніших наукових дисциплін.**Одноразове розсіяння несферичними частинками.** Знання таких величин як матриця екстинкції, фазова матриця, матриця розсіяння та оптичні перерізи необхідне як для аналізу лабораторних вимірювань розсіяння одиночною частинкою, так і для використання формул наближення одноразового розсіяння й розв’язку рівняння переносу. Оскільки більшість частинок у природних і штучних умовах є несферичними, то строгий аналіз залежності цих світлорозсіюючих властивостей частинок від їхньої форми (морфології) має першорядне практичне значення.Ефективні *Т*-матричні програми, розроблені дисертантом, дозволили вперше провести системний і детальний аналіз оптичних властивостей монодисперсних і полідисперсних несферичних частинок. Зокрема, виявлено повне зникнення надвузьких резонансних утворень при деформації поверхні сферичної частинки всього на одну соту довжини хвилі світла. Також продемонстровано визначальний вплив дисперсії розмірів і усереднення за орієнтаціями несферичних частинок на інтерференційну й резонансну структури розсіяння. Унікальні за обсягом результати *Т*-матрич-них розрахунків дозволили якісно й кількісно охарактеризувати сильну залежність оптичних перерізів і елементів матриці розсіяння від форми й морфології частинок.**Аналіз концепції багаторазового розсіяння.**У контексті рівнянь Максвела об’єкт із будь-якою морфологією розглядається як єдиний розсіювач. Проте, якщо розсіюючий об’єкт представляє собою групу з декількох частинок, то виявляється зручно використовувати формалізм рівнянь Фолді–Лакса і представити повне розсіяне поле у вигляді векторної суперпозиції полів, розсіяних окремими частинками. Формальне розкладення рівнянь Фолді–Лакса в ряд Неймана дозволяє ввести концепцію багаторазового розсіяння електромагнітних хвиль. Аналіз, проведений дисертантом, показує, що концепція багаторазового розсіяння не описує реальний фізичний процес, а має суто математичний характер. Однак, розкладення рівнянь Фолді–Лакса в ряд за кратностями розсіяння виявляється ефективним аналітичним прийомом при виведенні рівняння переносу та теорії слабкої локалізації і дозволяє наочно ілюструвати результати строгих *Т*-матричних розрахунків для випадкових груп частинок.**Строгі розрахунки багаторазового розсіяння.**Прямірозв’язки рівнянь Максвела все ще не можуть бути використані для безпосереднього розрахунку розсіяння світла такими багаточастинковими об’єктами як хмари, реголітні поверхні і колоїдні суспензії. Проте, *Т*-матричний метод дозволяє вивчати досить складні дисперсні системи і моделювати поводження різних ефектів багаторазового розсіяння зі зростанням кількості частинок в об’ємі випадкового середовища. Ґрунтуючись на цьому підході, чисельно продемонстровано ефекти багаторазового розсіяння електромагнітних хвиль при розсіянні світла випадковими дисперсними середовищами і вперше репродукована сукупність ефектів слабкої локалізації.**Мікрофізичні теорії переносу випромінювання і слабкої локалізації.***Т*-мат-ричні розрахунки стають неефективними, коли кількість мікронних частинок в об’ємі випадкового дисперсного середовища переходить за тисячу. Проте, розрахунки навіть для меншої кількості частинок приводять до розуміння того, що можна чекати в граничному випадку дуже великої кількості й дуже малої об’ємної упаковки частинок. Розгляд цього граничного випадку в рамках рівнянь Фолді–Лакса приводить до узагальненого рівняння переносу, передбаченого Розенбергом у 1955 р. [91], і узагальненого формулювання теорії слабкої локалізації. Таким чином, теорії переносу і слабкої локалізації переходять з області феноменології у категорію асимптотичних розв’язків рівнянь Максвела. В результаті стає можливим предметний і детальний аналіз:конкретних наближень і припущень, необхідних для виводу теорій переносу і слабкої локалізації;фізичного змісту величин, які входять у рівняння переносу, та їхній зв’язок із реально вимірюваними величинами;умов і діапазону застосування рівняння переносу й теорії слабкої локалізації;практичного змісту умов ергодичності і статистичної однорідності розсіюючого середовища у контексті реальних оптичних вимірів;місця теорій переносу випромінювання і слабкої локалізації у загальній ієрархії проблем електромагнітного розсіяння.Розуміння природи й діапазону застосування наближеного розв’язку є першим кроком на шляху до поліпшеного розв’язку. Зрозуміло, що будь-яке покращення теорій переносу і слабкої локалізації повинно виводитись безпосередньо з рівнянь Максвела (чи рівнянь Фолді–Лакса). Це особливо важливо для випадку розсіюючих середовищ, які складаються з щільно упакованих частинок. На жаль, швидко зростаюча складність аналітичних наближень може привести до того, що їхня комп’ютерна реалізація виявиться не більш ефективною, ніж реалізація чисельно-точного розв’язку. Саме тому дуже ймовірно, що майбутній визначальний аналіз оптичних властивостей щільноупакованих дисперсних середовищ буде ґрунтуватися на прямих комп’ютерних розв’язках рівнянь Максвела.**Перенос поляризованого випромінювання в анізотропних плоскопаралельних середовищах.**Сукупність формул і рівнянь, відома під назвою “класична теорія переносу”, виявляється непридатною для розріджених дисперсних середовищ, які складаються з частково або повністю орієнтованих частинок. Тому необхідно було узагальнити цю теорію, розглянувши довільний випадок анізотропного плоскопаралельного дисперсного середовища. В дисертації це зроблено шляхом виведення всіх похідних рівнянь безпосередньо з рівняння переносу, тобто, не використовуючи такі феноменологічні прийоми як принципи інваріантості. Тим самим було ще раз указано на пряме виведення усіх результатів феноменологічної теорії переносу випромінювання у випадкових дисперсних середовищах із рівнянь Максвела. Також показано, що стандартна векторна теорія переносу в макроскопічно ізотропних і дзеркально симетричних середовищах є частковим випадком узагальненої теорії.**Аналіз точності скалярного наближення.**Хоча скалярна форма рівняння переносу не має фізичного походження, в силу своєї простоти вона використовується значно частіше, ніж строге векторне рівняння переносу. У зв’язку з цим було важливо виконати детальний кількісний аналіз похибок скалярного наближення для широкого діапазону параметрів розсіюючого дисперсного середовища. Результатами цього аналізу стали наступні основні висновки:головною причиною похибок скалярного наближення є релеївський чи квазірелеївський тип кутової залежності відношення елементів нормалізованої матриці одноразового розсіяння із сильним максимумом в області кута розсіяння ;у випадку чисто релеївського розсіяння похибки скалярного наближення можуть досягати 12% при оптичній товщині шару порядку одиниці;у випадку розсіяння полідисперсними сферичними частинками похибки скалярного наближення виявляються максимальними при ефективних розмірних параметрах частинок, близьких до одиниці. З ростом розміру частинок похибки швидко зменшуються й стають несуттєвими при ефективних розмірних параметрах більше 3.**Слабка локалізація в плоскопаралельних дисперсних середовищах.**Відсутність ефективних загальних методів розрахунку характеристик слабкої локалізації надає особливого значення строгим частковим розв’язкам задачі. Один із таких розв’язків, отриманий дисертантом, показує, що хоча рівняння переносу виведено шляхом відкидання циклічних діаграм, усі спостережні характеристики ефекту слабкої локалізації у напрямку розсіяння точно назад можуть бути знайдені шляхом розв’язання рівняння переносу. Цей результат дозволив кількісно вивчити залежність багатьох характеристик слабкої локалізації від оптичної товщини дисперсного шару й фізичних параметрів розсіюючих частинок.Інший строгий розв’язок було отримано в [94, 95] для напівнескінченого шару, який складається з непоглинаючих релеївських частинок. На основі цього розв’язку дисертант уперше теоретично передбачив поляризаційний опозиційний ефект у вигляді винятково вузького асиметричного мінімуму в лінійній поляризації на фазовому куті, близькому до кутової півширини когерентного піка в інтенсивності.Існуюча теорія була використана для аналізу великого обсягу результатів спостережень для певного класу високоальбедних безатмосферних тіл Сонячної системи. Цей аналіз дозволив зробити висновок, що факт одночасних спостережень опозиційних ефектів у яскравості й поляризації та їхню специфічну морфологію можна пояснити слабкою локалізацією електромагнітних хвиль при розсіянні світла реголітними поверхнями цих об’єктів.**Дистанційне зондування аерозолів.** Важливою мотивацією для розробки описаних вище методів теоретичного аналізу була задача глобального визначення мікрофізичних властивостей тропосферних аерозолів у земній атмосфері з орбітальних супутників. На основі поліпшених модельних розрахунків було сформульовано детальні кількісні вимоги до кліматичної програми дистанційного зондування аерозольних і хмарних частинок та проведено порівняльний аналіз можливостей різних методик дистанційного зондування, які ґрунтуються на пасивних вимірюваннях. В результаті, поставлено і детально розроблено конкретні наукові задачі для орбітального фотополяриметра APS, призначеного для високоточного визначення властивостей тропосферних аерозолів і хмар у рамках космічної місії Glory. Крім того, наявні супутникові спостереження було використано для того, щоб побудувати найтриваліший часовий ряд глобального розподілу аерозолів. У результаті було відкрито істотне зменшення середньої глобальної оптичної товщини тропосферних аерозолів за останні 20 років та виявлено супроводжуючі сильні регіональні зміни. |

 |