

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.Н. КАРАЗИНА

РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ, РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ
ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И АППАРАТУРЫ ДЛЯ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ СОЛНЕЧНОЙ
СИСТЕМЫ НАЗЕМНЫМИ И АЭРОКОСМИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

- Бельская И. Н.** – доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник НИИ астрономии Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина.
- Ефимов Ю. С.** – кандидат физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” МОН Украины.
- Кайдаш В. Г.** – кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник НИИ астрономии Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина.
- Киселев Н. Н.** – доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник Главной астрономической обсерватории НАН Украины.
- Кучеров В. А.** – кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Главной астрономической обсерватории НАН Украины (посмертно).
- Лушишко Д. Ф.** – доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник НИИ астрономии Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина.
- Мищенко М. И.** – доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник Годдардовского института космических исследований НАСА.
- Розенбуш В. К.** – доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Главной астрономической обсерватории НАН Украины.
- Тишковец В. П.** – канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Радиоастрономического института НАН Украины.
- Шаховской Н. М.** – канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” МОН Украины.

АННОТАЦИЯ

Представленная работа суммирует коллективные достижения авторов, приведшие к созданию нового научного направления в Украине – дистанционного изучения объектов Солнечной системы физически строгими и эффективными поляриметрическими методами. Она является логическим итогом многолетних теоретических и экспериментальных исследований, внесших значительный вклад в решение широкого круга фундаментальных и прикладных проблем науки: от происхождения и эволюции Солнечной системы до анализа, объяснения и предсказания глобальных изменений климата и контроля экологического состояния земной атмосферы.

Введение

Облачные и аэрозольные частицы оказывают огромное влияние на глобальный и региональный климат Земли и других планет. Микроскопические частицы, составляющие реголитовые поверхности многих тел Солнечной системы и атмосферы комет, а также частицы межпланетной пыли оказывают сильное и часто определяющее влияние на протекание многих физических и химических процессов. Более того, они являются “живыми свидетелями” истории образования и эволюции Солнечной системы. Поэтому детальное и точное знание физических и химических свойств таких частиц имеет первостепенное научное и прикладное значение. Обычно непосредственный сбор образцов и их лабораторный анализ для получения такого знания невозможен. Поэтому в большинстве случаев ученым приходится полагаться на теоретический анализ дистанционных измерений характеристик излучения, рассеянного частицами.

Благодаря сильной зависимости светорассеивающих свойств частиц от их размера, формы, ориентации и состава, дистанционные измерения электромагнитного излучения и их теоретический анализ оказываются исключительно полезным, а зачастую и единственным, средством определения физических характеристик и химического состава частиц в геофизике и астрофизике Солнечной системы.

Вопрос о том, как связаны физические характеристики изучаемых геофизических и астрофизических объектов с наблюдаемыми свойствами рассеянного излучения, является основополагающим как для дистанционного изучения нынешнего состояния этих объектов, так и для анализа их происхождения и эволюции. Для ответа на этот фундаментальный вопрос необходимо иметь наблюдательные данные, максимально полно характеризующие свойства рассеянного излучения, и средства надежной интерпретации результатов измерений. Длительное время геофизические и астрофизические исследования основывались только на таких характеристиках электромагнитного излучения, как интенсивность и ее спектральная зависимость. Оказалось, однако, что поляризационные характеристики рассеянного излучения несут неизмеримо больше информации о таких определяющих свойствах частиц, как размер, форма и показатель преломления.

Первые измерения поляризации излучения атмосферы Земли и небесных объектов (кометы, Луна) были проведены еще Араго в первой половине XIX века. Однако широкое применение поляризационных методов в дистанционном зондировании и астрофизических исследованиях началось только в конце пятидесятых – начале шестидесятых годов XX века.

Появление новых детекторов, в частности чувствительных фотоумножителей и ПЗС-матриц, сделало возможным одновременные и очень точные измерения поляризационных характеристик большого числа элементов изображения или спектра. В результате в последние десятилетия значительно выросло число приборов, предназначенных для измерения поляризации излучения объектов Солнечной системы как с Земли, так и с космических аппаратов, и радикально вырос объем высококачественных поляриметрических данных. Важную, и во многом определяющую роль в этом процессе сыграли исследования авторов данной работы.

Параллельно с созданием и улучшением наблюдательной базы поляриметрии и быстрым увеличением ее объема активно разрабатывались теоретические методы анализа измерений, основанные на строгой теории рассеяния электромагнитных волн морфологически сложными объектами, такими как облака и реголитовые поверхности. Началом послужила разработка знаменитой теории Ми, описывающей рассеяние света одиночной сферической частицей. Потребовались, однако, многолетние обширные исследования для того, чтобы создать строгую и последовательную теорию однократного и многократного рассеяния электромагнитных волн частицами произвольной формы и произвольными группами частиц. Кульминацией стала разработка авторами данной работы унифицированной микрофизической теории рассеяния, которая непосредственно вытекает из уравнений Максвелла и позволяет выполнять эффективные численно точные расчеты, непосредственно применимые к анализу реальных поляриметрических наблюдений.

В результате наших исследований и разработок поляриметрия стала одним из самых информативных, точных и эффективных методов дистанционного зондирования.

Настоящая работа суммирует достижения авторского коллектива за последние 40 лет и их фундаментальный вклад в становление и развитие такого раздела науки как поляриметрическое дистанционное зондирование Земли и других объектов Солнечной системы. Уникальность работы состоит в комплексном и всестороннем подходе, который включает:

- разработку завершенной строгой теории электромагнитного рассеяния и точных методов анализа результатов поляриметрических измерений;
- развитие теоретических основ и принципов измерения поляризованного излучения, создание прецизионной аппаратуры и проведение обширных наблюдений в широком спектральном диапазоне;
- определение оптических и физических характеристик поверхностей и атмосфер большого количества тел Солнечной системы, включая планеты, спутники планет, кольца Сатурна, астероиды, транснептуновые объекты и кометы на основе анализа наземных и аэрокосмических наблюдений и открытие новых явлений и эффектов;
- разработку и реализацию физически обоснованных методов дистанционного зондирования аэрозольных и облачных частиц в атмосфере Земли с самолетов и орбитальных спутников.

Соавторами работы являются представители ведущих украинских и зарубежных исследовательских центров – НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” МОН Украины, Главной астрономической обсерватории НАН Украины, НИИ астрономии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина, Радиоастрономического института НАН Украины, Годдардовского Института космических исследований Национального управления авиации и исследования космического пространства (США), которые были пионерами в разработке и применении поляриметрических методов в дистанционном зондировании объектов Солнечной системы.

Теоретические исследования

Необходимость строгой и надежной интерпретации поляриметрических наблюдений Земли и других тел Солнечной системы обуславливает важность понимания фундаментальных физических основ электромагнитного рассеяния и точной количественной информации о его характеристиках как функциях физических параметров рассеивающих частиц. Разнообразие

размеров, форм и показателей преломления частиц, встречающихся в естественных условиях, существенно усложняет задачу точного теоретического предсказания светорассеивающих свойств отдельных частиц. Еще бóльшие трудности вызывает проблема моделирования рассеивающих свойств больших случайных групп частиц, таких как облака. Особенно сложными объектами исследования являются плотноупакованные дисперсные среды, например, песчаные и снежные поверхности, реголитовые поверхности тел Солнечной системы, а также различные неорганические и биологические взвеси.

Сложность перечисленных задач вызвала к жизни многочисленные приближения и повсеместное их использование. К сожалению, многие приближения имеют неясное происхождение и плохо определенную область применимости. Зачастую единственным достоинством приближенного подхода является его формальная простота, позволяющая избежать трудоемких расчетов на компьютерах. Однако основным недостатком является то, что почти никогда неизвестно, насколько точным оказывается приближенное вычисление. Более того, во многих приближениях реальные физические величины подменяются искусственными модельными параметрами, в результате чего становится невозможным извлекать прямую физическую информацию из дистанционных поляриметрических наблюдений.

В силу вышесказанного, становится понятной актуальность следующих трех фундаментальных задач:

- разработка эффективного строгого подхода к решению задач светорассеяния отдельными частицами и большими группами частиц на основе прямых численно точных решений уравнений Максвелла;
- разработка эффективных приближенных решений уравнений Максвелла, которые являются асимптотически точными и имеют четко установленную область применимости;
- применение надежно обоснованных методик расчета электромагнитного рассеяния для разработки точных и информативных методов поляриметрического дистанционного зондирования, позволяющих восстанавливать физические параметры сложных и максимально реалистичных моделей рассеивающих сред.

Уникальность настоящей работы как раз и состоит в том, что она непосредственно базируется на уравнениях Максвелла и совершенно исключает использование феноменологических и эмпирических подходов. Исходя из уравнений Максвелла, в работе развит широкий круг фундаментальных аспектов теории рассеяния электромагнитных волн частицами и дисперсными средами. Более того, теория доведена до вида, в котором она может быть непосредственно использована для эффективного численного решения конкретных задач дистанционного зондирования.

Развитие методов и аппаратуры для дистанционных поляризационных наблюдений

Необходимость решения конкретных геофизических и астрофизических задач методами дистанционного зондирования инициировала разработку и создание прецизионной аппаратуры для поляриметрических исследований. Очевидными целями этого направления нашей работы стали:

- разработка принципов измерения поляризованного излучения различных объектов (точечных и протяженных);
- создание аппаратуры для апертурной и поверхностной поляриметрии и фотометрии и их техническое усовершенствование и развитие;
- разработка и реализация физических методов дистанционного зондирования аэрозольных и облачных частиц в атмосфере Земли;
- разработка методик проведения наблюдений различных объектов Солнечной системы;
- разработка методов учета случайных и систематических ошибок наблюдений;
- разработка методов анализа данных наблюдений и извлечение необходимой информации из конкретных оптических измерений.

Регулярные поляриметрические наблюдения в Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) начались в начале 70-х годов прошлого века, когда авторами был создан первый интегрирующий поляриметр. Уже первые поляриметрические обзоры звезд и наблюдения комет, проведенные в КрАО, привели к ряду открытий. Необходимость увеличения точности измерений, использование для анализа всех параметров Стокса и переход к изучению поляризации более слабых и быстро меняющихся блеск астрономических объектов способствовали развитию поляриметрических методов исследований и созданию в КрАО поляриметров последующих поколений.

Наблюдательные программы

Целый ряд оптических эффектов составляет основу взаимодействия электромагнитного излучения с веществом планетных поверхностей и других дисперсных сред, таких как атмосферы планет, кольца планет, кометы, межпланетная пыль и т.д. Состав, форма, структура и ориентация отдельных частиц, составляющих дисперсную среду, а также структура реголита (в масштабах от длины волны света до элемента разрешения приемной аппаратуры) контролируют относительный вклад различных эффектов в рассеянное излучение. Информацию об оптических и физических свойствах исследуемых объектов можно получить путем анализа наблюдений изменения их фотополариметрических характеристик с фазовым углом и длиной волны. Однако получить полные фазовые и спектральные зависимости поляризации и блеска из наземных наблюдений чрезвычайно трудно. Это связано с низкой яркостью многих объектов, ограничениями по фазовому углу, эпизодичностью появления объектов и т. д. Поэтому данные, всесторонне характеризующие такие наблюдаемые явления как отрицательная степень линейной поляризации, круговая поляризация, фотометрический и поляриметрический оппозиционные эффекты и др., отсутствовали. Это определило главное направление нашей работы в части дистанционного зондирования – создание надежной наблюдательной базы для разработки новых и проверки существующих теорий и механизмов рассеяния света и определения физических свойств избранных объектов Солнечной системы.

Конкретными задачами наблюдательных программ стали:

- реализация обширных программ поляриметрических и фотометрических наблюдений планет, спутников планет, астероидов, транснептуновых объектов и комет. Поиск объектов с нетипичными оптическими свойствами и детальное их исследование с целью выявления групп и классов объектов, связанных с разными областями их образования в Солнечной системе и эволюцией;
- изучение особенностей фазовых зависимостей блеска, цвета и поляризации излучения объектов разной природы в широком диапазоне фазовых углов и длин волн. Разделение фазовых и долготных зависимостей поляризации излучения спутников планет и астероидов, исследование их связи с альбедными и структурными неоднородностями поверхностей;
- наблюдательное подтверждение теоретического предсказания того, что узкий фотометрический оппозиционный эффект должен сопровождаться поляризационным оппозиционным эффектом в виде вторичного минимума отрицательной степени линейной поляризации вблизи оппозиции. Определение амплитудных, угловых и спектральных параметров поляризационного оппозиционного эффекта. Анализ сходства и различия фотометрических и поляриметрических оппозиционных эффектов в разных классах объектов, сопоставление их с существующими моделями, уточнение механизмов их формирования;
- решение проблемы классификации комет на основе свойств рассеянного (видимая область спектра) и теплового (ИК область) излучения пыли, изучение связи физических и динамических характеристик комет;
- поиск круговой поляризации излучения комет, изучение ее пространственного распределения по коме, исследование фазовой зависимости. Анализ возможных механизмов возникновения круговой поляризации в кометах и ориентации частиц в кометных атмосферах;
- исследование Марса, Луны и аэрозольно-облачной составляющей атмосферы Земли с помощью аэрокосмических средств;

- определение оптических и физических характеристик классов объектов, включающих планеты, спутники планет, кольца Сатурна, астероиды, Кентавры, транснептуновые объекты и кометы на основе анализа наземных и аэрокосмических наблюдений и открытие новых явлений и эффектов.

Научное и практическое значение результатов исследований

Во время выполнения данной работы получен целый ряд приоритетных результатов.

Принципиально новыми в *теоретической части исследований* являются следующие фундаментальные разработки:

1. Вывод формулы для силы давления солнечного излучения на произвольную частицу и первое теоретическое предсказание радиационного давления за счет теплового излучения электромагнитной энергии частиц.

2. Разработка общей теории рассеяния электромагнитных волн частицами, погруженными в поглощающую (например, водную) среду.

3. В рамках T -матричного метода разработаны исключительно эффективные аналитические методы расчета рассеивающих свойств групп несферических частиц, а также эффективные средства улучшения сходимости расчетов, способствовавшие радикальному расширению области применимости T -матричного метода. Разработанный и размещенный в открытом доступе в Интернете уникальный пакет T -матричных компьютерных программ нашел широкое применение и был использован в более чем 540 журнальных публикациях.

4. Первый систематический и детальный количественный анализ свойств однократного рассеяния несферических частиц. Уникальные по объему результаты строгих расчетов позволили выявить и количественно охарактеризовать сильную зависимость многих светорассеивающих свойств от формы, морфологии и ориентации частиц.

5. Создан новый раздел статистической оптики, в рамках которого многократное рассеяние света в средах, состоящих из случайно расположенных частиц, изучается на основе прямых численно точных решений уравнений Максвелла. Выполнен детальный анализ происхождения спекл-структуры при рассеянии света фиксированными группами частиц и ее замыкания в результате усреднения по положениям частиц. Впервые на основе прямых решений уравнений Максвелла однозначно продемонстрирована совокупность эффектов слабой локализации электромагнитных волн при рассеянии большими случайными группами частиц.

6. Разработан унифицированный микрофизический подход к теориям переноса излучения и слабой локализации электромагнитных волн в разреженных дисперсных средах таких как облака. Этот подход включает:

- первый прямой вывод общего уравнения переноса излучения непосредственно из уравнений Максвелла, применимый к частицам с произвольными размерами, формами и ориентациями;
- разработку общей теории слабой локализации, применимой к произвольным частицам и полностью учитывающей электромагнитную природу света;
- первый детальный анализ конкретных приближений, необходимых для вывода уравнения переноса, и места теорий переноса излучения и слабой локализации в общей иерархии проблем электромагнитного рассеяния;
- первую микрофизическую теорию переноса излучения в разреженной дисперсной среде с малыми статистическими неоднородностями.

7. Впервые разработана общая теория переноса излучения в планетных атмосферах, состоящих из частиц любых размеров, форм, ориентаций и показателей преломления.

8. Впервые выполнен детальный количественный анализ точности и границ применимости скалярного приближения уравнения переноса, широко используемого на практике для упрощения и ускорения расчетов на ЭВМ. Предложено простое физическое объяснение больших ошибок скалярного приближения в случае рассеяния чисто газовой средой.

9. Впервые дан вывод соотношения, позволяющего строго рассчитывать все характеристики слабой локализации в направлении точно назад на основе численного решения уравнения переноса. Это соотношение было использовано для детального количественного анализа зависимости характеристик слабой локализации от оптической толщины рассеивающего слоя и размера, формы и показателя преломления частиц.

10. Выполнен первый детальный анализ угловых зависимостей различных проявлений слабой локализации и эффектов плотной упаковки частиц в рассеивающей среде. Выделен новый механизм формирования оппозиционных эффектов, основанный на свойствах рассеяния неоднородных волн. Из уравнений Максвелла получены уравнения, описывающие перенос излучения и явление слабой локализации в плотноупакованных дисперсных средах, таких как реголитовые поверхности тел Солнечной системы.

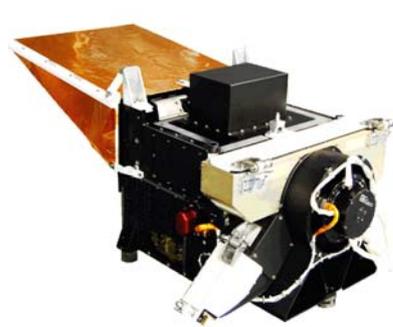
11. Впервые теоретически предсказан поляризационный оппозиционный эффект в виде узкого, асимметричного минимума поляризации на фазовом угле, сравнимом с угловой полушириной оппозиционного пика в интенсивности. Впервые сделан вывод, что совокупность уникальных оппозиционных эффектов в яркости и поляризации, типичную для определенного класса высокоальбедных безатмосферных тел Солнечной системы, можно объяснить слабой локализацией электромагнитных волн при рассеянии света на реголитовых поверхностях этих объектов.

Новыми результатами в развитии *теоретических основ, методов и аппаратного обеспечения поляриметрических наблюдений* являются следующие:

1. Разработка принципов измерения поляризованного излучения точечных и протяженных объектов.

2. Первый детальный количественный анализ научных и технических требований к климатической программе дистанционного зондирования аэрозольных и облачных частиц в земной атмосфере с орбитальных спутников.

3. Разработка поляриметрических методов дистанционного зондирования аэрозольных и облачных частиц в атмосфере Земли с самолетов и орбитальных спутников и детальное обоснование уникальной концепции фотополариметра Aerosol Polarimetry Sensor (APS) для космической миссии Glory (NASA).



Орбитальный фотополариметр APS (слева) и планируемый вид орбитального спутника Glory (справа).

4. Создание нескольких поколений поляриметров для апертурной и поверхностной поляриметрии и фотометрии тел Солнечной системы, их техническое усовершенствование и развитие. Авторы одного из созданных поляриметров и метода измерения на нем круговой поляризации получили авторское свидетельство.

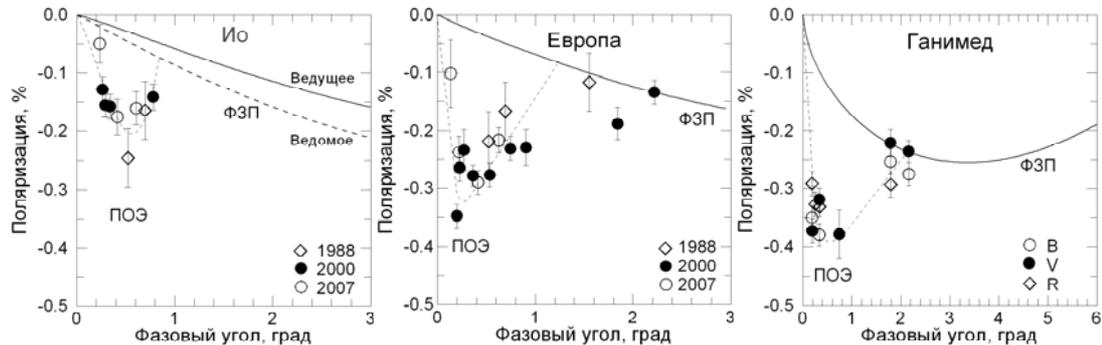
5. Первая теория составных симметричных ахроматических фазовых пластинок, состоящих из произвольного числа компонентов. Расчет характеристик и изготовление уникальных ахроматических и суперахроматических фазовых пластинок, перекрывающих всю видимую и ближнюю инфракрасную область спектра. Данные разработки защищены тремя авторскими свидетельствами и одним патентом.

6. Разработка методологии проведения наблюдений различных объектов Солнечной системы, методов учета случайных и систематических ошибок наблюдений и анализа наблюдательных данных.

Принципиально новыми результатами выполнения *обширных наблюдательных программ* являются:

1. Уникальный наблюдательный материал для тел Солнечной системы – планет, спутников планет, астероидов, кентавров, транснептуновых объектов и комет, полученный на 16-ти телескопах, расположенных как в северном, так и южном полушарии Земли (включая и 8.2-м рефлектор ЕЮО в Чили). Определены поляриметрические характеристики около 200 астероидов и более 40 комет, что составляет 70% мировых данных и по астероидам, и по кометам в международной базе данных NASA Planetary Data System. На основе результатов наблюдений открыты и изучены ранее неизвестные эффекты, индивидуальные особенности и уникальные свойства, присущие ряду исследованных астероидов, комет и спутников планет.

2. Открытие и исследование поляризационных оппозиционных эффектов для целого класса высокоальбедных объектов, включая астероиды, спутники, кольца планет. Тем самым экспериментально доказано, что эффект слабой локализации электромагнитных волн является определяющим физическим механизмом рассеяния в естественной среде Солнечной системы.



Поляризационный оппозиционный эффект для спутников Юпитера Ио, Европа и Ганимед. Сплошными линиями обозначены регулярные фазовые зависимости поляризации для всего диска Европы и Ганимеда и ведущего полушария Ио, пунктирной – то же для ведомого полушария Ио.

3. Измерение детальных фазовых зависимостей поляризации излучения спутников, астероидов, комет, транснептуновых объектов для диапазонов фазовых углов, доступных при наземных наблюдениях. Показано, что даже по единичному измерению степени поляризации вблизи минимума или максимума фазовой зависимости можно определить композиционный тип поверхности.

4. Инициирование международной кооперативной программы поляриметрических наблюдений тел пояса Койпера и кентавров. Обнаружено две группы транснептуновых тел с различными оптическими свойствами поверхностей, что, вероятно, связано с различным содержанием летучих веществ. Измеренная большая величина поляризации излучения койперовских объектов (до -2%) на предельно малых фазовых углах является уникальной для тел Солнечной системы. Впервые доказано существенное различие микроструктуры поверхностей этих тел по сравнению с малыми телами внутренней части Солнечной системы.

5. Впервые получены спектральные зависимости поляризационных характеристик поверхностей ряда безатмосферных тел. В частности показано, что спектральные зависимости отрицательной поляризации определяются типом астероида и имеют качественное сходство с аналогичными зависимостями для соответствующих метеоритных аналогов их вещества. Этот результат является важным как для установления генетической связи между астероидами и метеоритами, так и для классификации астероидов по типам.

6. Реализация обширной программы поляриметрических наблюдений астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ) и представляющих уникальную возможность исследовать фазовый ход поляризации в широком диапазоне фазовых углов, включая область максимума поляризации. Полученные результаты свидетельствуют о значительном различии в поляризующих свойствах поверхностей разных тел и об отличии максимума поляризации астероидов от максимума поляризации Луны, Меркурия, комет. Определены альbedo и диаметры ряда астероидов, сближающихся с Землей. Три из них являются *потенциально опасными объектами*, представляющими угрозу столкновения в последующие сближения с Землей, причем наши результаты являются *единственными оценками* их размеров.

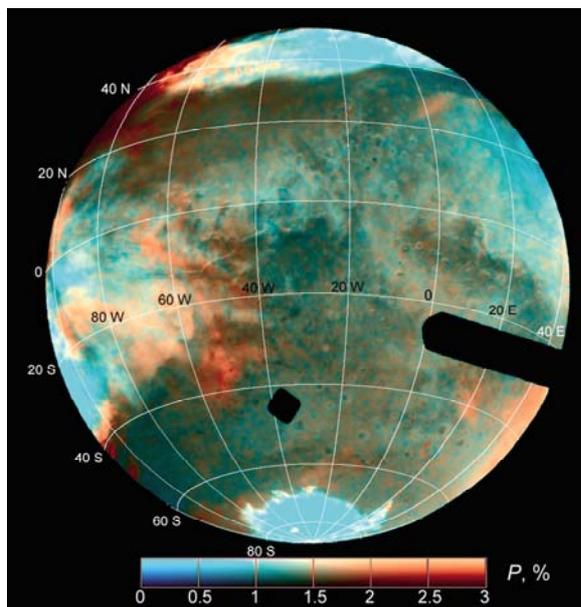
7. Впервые показано, что поверхности крупнейших астероидов М-типа, которые могут представлять собой остатки дифференцированных тел, потерявших свои силикатные оболочки в результате столкновений, не являются чисто металлическими, а содержат значительную силикатную компоненту. Наиболее подходящими метеоритными аналогами вещества М-астероидов могут быть железо-каменные метеориты и энстатитовые хондриты.

8. Открытие и исследование индивидуальных особенностей и уникальных свойств отдельных астероидов. Обнаружение астероидов с рекордно малыми ($\sim 14^\circ$) и рекордно большими ($\sim 28^\circ$) углами инверсии степени линейной поляризации, что послужило стимулом к их более детальному исследованию, выделению групп астероидов с такими же характеристиками и выдвижению новых гипотез о процессах аккреции вещества в поясе астероидов.

9. Новая калибровка шкалы поляриметрических альбедо 127 астероидов, которая позволяет получать более точные значения их альбедо и диаметров по сравнению с данными, полученными американским спутником IRAS.

10. Сравнение результатов наземных и космических исследований астероидов. Авторами проведены детальные поляриметрические наблюдения и определены физические параметры 4-х астероидов (1 Церера, 4 Веста, 21 Лютеция и 2867 Штейнс) – объектов успешно стартовавших космических миссий Rosetta и Dawn. По данным спектральных и поляриметрических наблюдений предложен вероятный состав поверхностей астероидов Лютеция и Штейнс. К настоящему времени космические данные, полученные для астероида Штейнс, подтвердили надежность поляриметрического метода определения альбедо астероидов.

11. На основе наблюдений на космическом телескопе Хаббла открыты оптически тонкие, сильно поляризующие в ближней УФ области спектра облака на высотах 30–40 км в атмосфере Марса, которые находятся на стадии самого начала формирования кристаллов H_2O на субмикронных пылевых частицах.



Распределение вариаций степени поляризации $P = (Q^2 + U^2)^{1/2}/I$ по диску Марса, наложенное на изображение планеты (фильтр F435W, 7 сентября 2003 г.).

12. Исследование оппозиционного эффекта Луны в спектральном диапазоне 0.4 – 2.0 мкм по данным КА Клементина (NASA). Показано, что из-за воздействия газовых струй двигателя лунного модуля КК Аполлон-15 на лунный грунт появились аномалии в оптических свойствах реголита. Вариации наклона фазовой функции яркости объяснены изменением структуры реголита на малых масштабах (0.1 – 10 мм).

13. Открытие и исследование отрицательной ветви линейной поляризации излучения комет, что послужило выявлению новых оптических механизмов для объяснения ее возникновения и пониманию того, что универсальным механизмом образования отрицательной ветви поляризации излучения разных объектов (дисперсные среды, реголитовые поверхности) является рассеяние света на частицах с агрегатной структурой.

14. Открытие двух групп комет, отличающихся максимальной степенью поляризации, силой избытков инфракрасного излучения, а также присутствием силикатных эмиссий в ИК области спектра. Предложена новая классификация комет на основе свойств рассеянного и теплового излучения пыли и динамических характеристик. Выявленные особенности двух групп комет связаны со свойствами поверхностей их ядер, которые зависят от времени инсоляции.

15. Открытие аномальной спектральной зависимости поляризации у группы комет и ее связь с физическими и динамическими характеристиками. Пекулярные спектральные свойства поляризации излучения комет и особый химический состав газовой компоненты кометных атмосфер могут быть связаны с местами их образования в Солнечной системе и эволюцией.

16. Первые высокоточные измерения круговой поляризации комет и исследование ее пространственного распределения. Показано, что круговая поляризация имеет четко выраженную зависимость от фазового угла. Установлено, что во всех изученных кометах круговая поляризация является преимущественно левосторонней, что может указывать на присутствие в кометах добиологических органических веществ. Поиск такой органики является одной из целей космической миссии Rosetta к комете Чурюмова-Герасименко.

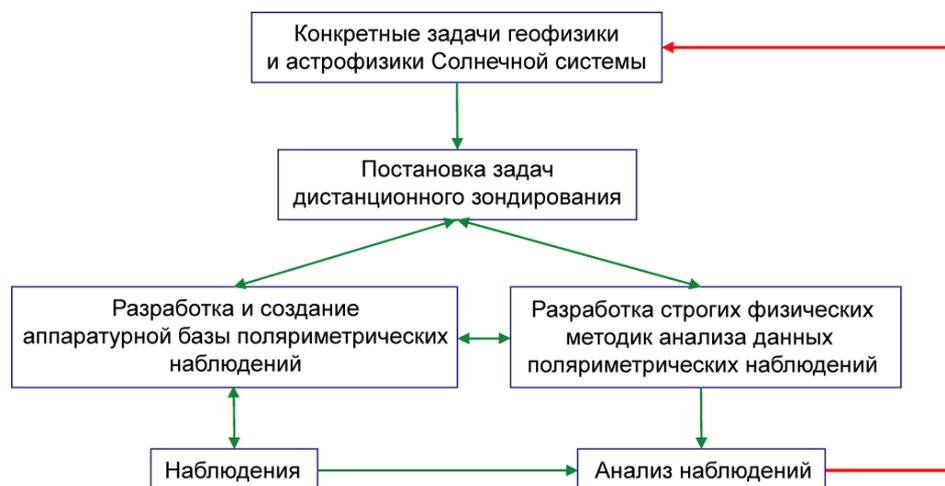
17. Первое прямое наблюдательное доказательство ориентации пылевых частиц в атмосферах комет на основе уникальных поляриметрических и фотометрических наблюдений покрытий звезд кометами и измерения круговой поляризации.

18. Открытие увеличения степени поляризации в минимумах блеска Ae/Be звезд Хербига, которое подтвердило теоретическое предсказание этого явления в результате рассеяния света на пылинках околозвездных дисков во время затмения звезд кометоподобными телами;

19. В рамках совместного проекта NASA и World Climate Research Programme под названием Global Aerosol Climatology Project получен уникальный по продолжительности временной ряд глобального распределения тропосферных аэрозолей в атмосфере Земли. Открыто существенное уменьшение средней оптической толщины тропосферных аэрозолей за последние 20 лет, оказавшее большое влияние на глобальный климат, и обнаружены сильные региональные изменения.

Заключение

Комплексный и заверченный характер нашей работы можно схематически продемонстрировать следующим образом:



Действительно, исходя из актуальных проблем и задач геофизики и планетной астрофизики, мы выполнили детальный и физически обоснованный анализ постановки задач поляриметрического дистанционного зондирования, внесли существенный вклад в разработку и создание аппаратной базы дистанционных поляриметрических наблюдений, разработали эффективные и физически обоснованные методики анализа данных наблюдений, выполнили обширные наблюдательные программы и проанализировали полученные наблюдательные данные. Тем самым было обеспечено решение исходных задач и была продемонстрирована исключительная эффективность поляриметрии как метода дистанционного зондирования. При этом очень важно, что большая часть наблюдательных данных была получена на отечественных телескопах и обсерваториях.

Разработка строгого теоретического базиса, методов интерпретации данных наблюдений и восстановления микрофизических характеристик сред и объектов по измеренному электромагнитному излучению являются исключительно важными для диагностики глобальных изменений климата и ухудшения экологического состояния атмосферы и, как следствие, для решения задачи выживания человечества. Именно комплексность и логическая завершенность нашего подхода в совокупности с фундаментальной значимостью исходных геофизических и астрофизических задач определяет ценность нашей работы и позволяет говорить о создании нового научного направления в Украине – дистанционного изучения объектов Солнечной системы физически обоснованными и эффективными поляриметрическими методами.

Результаты наших исследований имеют не только фундаментальное, но и прикладное значение. В частности, они могут быть использованы для решения проблемы астероидной опасности, а также для диагностики орбитальных космических аппаратов, без которых невозможно представить современную цивилизацию. Более того, разработанные методики теоретического анализа рассеянного света нашли широчайшее использование для оптической диагностики частиц биологического и искусственного происхождения в таких дисциплинах как медицина, биология, химия, экология, нанофизика и нанотехнология. Уникальные фазовые пластинки, изготовленные на основе теории многокомпонентных суперхроматических фазосдвигателей, приобретаются многими научными учреждениями и активно используются для поляриметрических наблюдений в КрАО, НИИ астрономии ХНУ, ГАО НАНУ, АО ОНУ, а также в обсерваториях Болгарии, Бразилии, Германии, Италии, Кореи, Нидерландов, России, Финляндии, Швейцарии, Швеции, Чили и Японии.

Наиболее важным итогом многолетней работы авторов является создание украинской школы поляриметрического дистанционного зондирования, которая во многом и значительно опередила зарубежные исследования в этом направлении. По данной тематике защищено 10 докторских и 24 кандидатских диссертации. Результаты работы изложены в 321 публикации, включая 4 монографии, напечатанные ведущими издательствами мира (Cambridge University Press, Elsevier, Springer), 24 авторские главы в коллективных монографиях, 258 статей, опубликованных в ведущих украинских и международных рецензируемых журналах (в том числе с наивысшими индексами цитирования), 5 авторских свидетельств и патентов, 6 баз данных. Представленная работа не только соответствует мировому уровню, она сама определяет его, что подтверждается количеством ссылок на публикации авторов: более 10000 ссылок в изданиях, включенных в базу данных Thomson Reuters ISI Web of Knowledge (Science Citation Index™). При этом большое количество ссылок появилось в ведущих биологических, медицинских, химических, физических и технических журналах, что свидетельствует о практическом значении данной работы, далеко выходящем за рамки поляриметрического дистанционного зондирования.

Свидетельством признания большого научного вклада авторов является присвоение их имен 6 астероидам, 3210 Lupishko, 4208 Kiselev, 4618 Shakhovskoj, 8781 Yurka, 8786 Belskaya, 18114 Rosenbush, присуждение 2-х премий им. акад. Н. П. Барабашова НАН Украины, медали Астрономического совета АН СССР “За открытие новых астрономических объектов”, медали NASA за выдающиеся научные достижения, премии им. А. С. Флеминга ун-та Дж. Вашингтона (США) и премии им. Х. Г. Хоутона Американского метеорологического общества, а также избрание главным редактором журнала *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* издательства Elsevier.

Бельская И. Н.

Лупишко Д. Ф.

Ефимов Ю. С.

Мищенко М. И.

Кайдаш В. Г.

Розенбуш В. К.

Киселев Н. Н.

Тишковец В. П.

Кучеров В. А.

Шаховской Н. М.