

2.7. ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОРАССЕЯНИЯ РЕГОЛИТОВЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

д.ф.-м.н. Ю. Г. Шкуратов, к.ф.-м.н. В. А. Псарев, к.ф.-м.н. А. А. Овчаренко

Введение

Лабораторные исследования оптических свойств структурных аналогов планетных реголитов впервые в Харьковской обсерватории начал проводить Н. П. Барабашов. В 1946 г. им, совместно с А. Т. Чекирдой, были выполнены индикатометрические измерения различных порошкообразных материалов с использованием фотоэлемента. В частности, был измерен мелкораздробленный базальт темного цвета, показавший более выраженный эффект обратного рассеяния, чем Луна (Барабашов и Чекирда, 1946). Индикатометр (прибор для измерения индикатрис рассеяния света) позволял проводить измерения при фазовых углах более 6° . Если бы этот предельный угол был меньше, открытие оппозиционного эффекта в лабораторных условиях могло быть сделано на 20 лет раньше; первая публикация на эту тему появилась лишь в 1966 г. [1]. Она вызвала сильную критику, т.к. в ней сообщалось об открытии оппозиционного пика яркости у светлых порошков, чего по представлениям того времени быть не должно (сейчас понятно, что этот эффект реален и обусловлен механизмом когерентного усиления обратного рассеяния).

Таким образом, лабораторное моделирование рассеяния света реголитоподобными поверхностями развивается в нашей обсерватории более 60 лет. Отметим, что в конце 50-х – начале 60-х годов лабораторные измерения позволили Барабашову сделать правильный вывод о структуре и несущей способности лунной поверхности. Лабораторные оптические измерения, начатые Н. П. Барабашовым, были продолжены его учеником Л. А. Акимовым, который, в частности, построил переносной индикатометр, использовавшийся для измерений фазовых зависимостей яркости образцов лунного грунта.

В настоящее время в НИИ астрономии лабораторные исследования структурных аналогов планетных грунтов активно развиваются. Эти исследования уже вышли за рамки чисто планетной тематики; они направлены на выяснения природы фотометрического и поляриметрического оппозиционных эффектов в широком физическом контексте. Лабораторные фотометрические и поляриметрические измерения позволяют производить проверку теоретических моделей рассеяния; потенциально они могут выявить новые закономерности, позволяющие усовершенствовать эти модели.

Данный раздел посвящен фотометрическим и поляриметрическим измерениям, проведенным с использованием инструментов, которые были созданы в НИИ астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина. В них для освещения используется неполяризованный источник света, что позволяет моделировать фазовые зависимости яркости и степени линейной поляризации реголитов безатмосферных небесных тел. Такое моделирование позволяет сделать выводы относительно физических свойств планетных реголитов (например, Shkuratov et al., 2004). Инструменты создавались и усовершенствовались в разное время Л. А. Акимовым, С. Ю. Бондаренко, А. А. Овчаренко, В. В. Псаревым, Д. Г. Станкевичем, Ю. Г. Шкуратовым. Следует также отметить серии измерений различных материалов (включая метеориты), выполненные Н. Н. Бельской и Д. Ф. Лупишко в связи с моделированием рассеивающих свойств поверхности астероидов.

В этом разделе мы обсуждаем результаты некоторых избранных (в основном последних по времени) измерений, которые были проведены в широком диапазоне фазовых углов, включая диапазон предельно малых углов. В частности, здесь приводится сравнение рассеивающих свойств изолированных частиц и поверхностей, состоящих из этих частиц. Данные для этого сравнения были получены в одном и том же диапазоне фазовых углов, $7 - 150^\circ$, харьковским инструментом (измерения рассеяния поверхностью) и инструментом Университета Амстердама (измерения рассеяния частиц в воздухе) (Shkuratov et al., 2006). Эта

область включает максимум положительной поляризации и часть ветви отрицательной поляризации при малых фазовых углах.

Ниже мы подробнее обсуждаем измерения, проведенные при малых углах фазы. Моделирование узкого фотометрического и поляриметрического оппозиционных эффектов в лаборатории – непростая задача, т. к. для таких измерений необходимо использование очень малых угловых апертур источника и приемника света. Один из фотополяриметров (Ovcharenko et al., 2004, Shkuratov et al., 2002) работает при фазовых углах, начинающихся от $0,2^\circ$. С помощью этого инструмента были выявлены интересные закономерности. В частности, мы нашли систематические зависимости параметров отрицательной поляризации от размеров частиц образца. Предел в $0,2^\circ$ представляется все еще слишком большим для моделирования яркостных пиков некоторых объектов. Поэтому был создан третий прибор, позволяющий проводить измерения, начиная от $0,008^\circ$ (Psarev et al., 2007).

Этот обзор представляет некоторые результаты измерений, проведенных с использованием упомянутых лабораторных фотополяриметров. Они покрывают разные, но пересекающиеся диапазоны фазовых углов. Все инструменты взаимно калиброваны путем измерения одних и тех же образцов при одинаковых фотометрических условиях. Один из приборов, работающий в диапазоне углов $2 - 150^\circ$, мы для краткости называем широкоугловым фотополяриметром, другой прибор ($0,2 - 17^\circ$) называется малоугловым фотополяриметром. Третий, использующий лазер, покрывает область фазовых углов $0,008 - 1,6^\circ$ (лазерный фотометр предельно малых фазовых углов).

Отметим большой труд по изготовлению образцов и обработке данных наших ранних фотополяриметрических измерений Н. П. Станкевич (Стадникова), Т. Б. Богдановой (Есипенко) и И. И. Латыниной. В частности, за неимением места в рабочих помещениях, Нина Петровна Станкевич изготовила методом отмучивания размерные фракции стекол разной окраски у себя в однокомнатной квартире. Почти все горизонтальные поверхности в комнате и кухне были заполнены стаканчиками с водяными взвешиваемыми порошков. Не надо говорить сколько неудобств испытали жильцы этой квартиры на протяжении нескольких месяцев во имя науки ...

Лабораторный фотополяриметр для исследования лунного грунта

Сотрудник нашей обсерватории Л. А. Акимов создал портативный лабораторный фотометр-поляриметр, который использовался для измерения индикатрис рассеяния лунного грунта. Позднее этот прибор позволял измерять также степень поляризации рассеянного света (рис. 2.7.1). В качестве источника света прибор использовал лампу накаливания. Измеренный сигнал выдавался на самописец или цифровую печать; обработка данных была тогда очень трудоемка. Минимальный фазовый угол, при котором этот прибор позволял проводить измерения, составлял 1° . Он позволил провести исследования оппозиционного эффекта яркости у многих образцов. Мы несколько раз привозили этот индикатометр в ГЕОХИ АН СССР для измерений образцов лунного грунта (Акимов и др., 1979). Пожалуй, наиболее значимым результатом этих измерений было открытие минимума фазовой зависимости показателя цвета некоторых лунных образцов (рис. 2.1.14). Этот минимум является следствием спектральных отличий индикатрис однократного рассеяния света частицами лунного грунта.

Этот прибор неоднократно совершенствовался; на нем были проведены большие серии измерений как природных образцов, так и образцов искусственного происхождения (Шкуратов и др., 1987, 1988). Одним из результатов было обнаружение значительного усиления отрицательной поляризации у смесей оптически контрастных веществ (Шкуратов, 1987). Пример таких измерений приведен на рис. 2.7.2, на котором показаны измерения светлого порошка MgO , сажи и их смеси. Аналогичные данные приведены для смеси серого и светлого стекла (менее контрастных компонент); здесь усиление отрицательной поляризации не столь сильно выражено.

Широкоугловой фотополяриметр

Этот инструмент позволяет измерять фазовые кривые яркости и степени линейной поляризации порошкообразных образцов при освещении неполяризованным светом. Фотография прибора приведена на рис. 2.7.3. Используются две спектральные полосы с λ_{eff} =

0,49 мкм и $\lambda_{\text{eff}} = 0,66$ мкм (полуширина приблизительно 10%). Поляриметрические измерения имеют точность около 0,05%. Спектральные полосы формируются светофильтрами с учетом спектральных особенностей фотометра. Измерения в диапазоне фазовых углов 2 – 150° производятся посредством поворота алидады с источником света (лампой). Широкий диапазон углов возможен, когда угол визирования относительно нормали к образцу велик; в наших измерениях он составляет 70° (рис. 2.7.3). Плоскость рассеяния перпендикулярна поверхности образца. Линейный размер порошкообразного образца примерно 10 × 20 мм. Толщина образца около 4 – 5 мм, что обеспечивает хорошее приближение к полубесконечной среде. Отражательная способность образцов определяется относительно сжатого образца Halon [2] при угле фазы 2°.

Описываемый широкоугольный фотополариметр использовался для проведения нескольких серий измерений порошкообразных образцов. В частности, были выполнены измерения размерных фракций различных материалов. Например, на рис. 2.7.4 показаны измерения порошков стекла КС-17 с разными средними размерами частиц. Хорошо видно, что с увеличением размеров частиц ветвь отрицательной поляризации становится мельче, уже и асимметричнее.

Важной задачей является сравнение фотометрических и поляриметрических измерений изолированных частиц и порошкообразных поверхностей, которые состоят из этих частиц. Такое сравнение, например, позволяет оценивать вклад однократного и многократного рассеяния в формирование максимума положительной поляризации. Оно также дает возможность проверить применимость классической теории переноса излучения к порошкообразным поверхностям. В нашем распоряжении оказались образцы различных порошкообразных материалов, для которых были измерены фазовые зависимости интенсивности и поляризации изолированных частиц с помощью установки Университета Амстердама (измерения рассеяния частиц, взвешенных в воздухе) [3]. Мы сравнивали измерения рассеяния света в диапазоне фазовых углов 7 – 150°, являющимся общим для нашего инструмента и голландского. Было показано, что обратное рассеяние порошкообразными поверхностями частично формируется одночастичным рассеянием. Кроме того, показано, что отрицательная поляризация поверхностей является остатком отрицательной поляризации рассеяния изолированными частицами (Shkuratov et al., 2004, 2006). Отчасти это относится и к максимуму положительной поляризации (Shkuratov et al., 2007). Для примера на рис. 2.7.5 показаны результаты измерений интенсивности и степени поляризации при двух длинах волн для порошка полевого шпата. Кривые представляют измерения для изолированных частиц и порошкообразной поверхности до сжатия и после. В случае изолированных частиц наблюдается сильное рассеяние вперед и сравнительно слабое увеличение интенсивности обратного рассеяния. Все сжатые образцы также демонстрируют сильное рассеяние вперед. Свободно насыпанные образцы, как правило, не показывают этой особенности.

Малоугольный фотополариметр

Этот инструмент также измеряет фазовые зависимости интенсивности и линейной поляризации света. Прибор работает в диапазоне фазовых углов 0,2 – 17° (рис. 2.7.6) с использованием неполяризованного источника света (лампа накаливания). Измерения на этом фотополариметре проводятся практически в тех же спектральных полосах, которые используются и в широкоугольном приборе. Это позволяет производить взаимную калибровку и взаимное дополнение данных. Угловой диаметр источника и приемника света составляет 0,05°.

Инструментальная (паразитная) поляризация является очень серьезной проблемой в лабораторных поляриметрических измерениях. Определение и коррекция инструментальной поляризации, связанной с источником света, – наиболее сложная проблема. Поляризация галогеновой лампы может достигать нескольких процентов. Основную часть паразитной поляризации мы компенсируем введением в световой пучок наклонной стеклянной пластинки толщиной 300 мкм. Она уменьшает аппаратную поляризацию до нескольких десятых процента. Остаточная паразитная поляризация компенсируется деполаризатором Лио. Инструментальная поляризация приемной части определяется с помощью диффузного источника света, расположенного вместо образца. Этот источник света представляет собой лампу накаливания, покрытую двумя матированными пластинками. Измерения, получаемые при двух положениях диффузного калибровочного источника света, позволяют нам определить инструментальную поляризацию приемника света. Величина инструментальной

поляризации приемника составляет около 0,03%. Она очень стабильна (с вариациями < 0,001%) и принимается в расчет при обработке результатов.

Образцы для малоуглового фотополяриметра имеют диаметр 60 мм. Изменение фазового угла производится поворотом источника света вокруг оси, лежащей на поверхности образца, приемник при измерении остается неподвижным. Оптическая схема инструмента такова, что позволяет очень близко поднести источник света к апертуре приемника. Источник света движется от приемника только по одну сторону, в широкоугловом фотополяриметре источник света может приближаться к приемнику с двух сторон.

Малоугловой фотополяриметр сконструирован так, что оптическая ось его приемника наклонена к нормали к плоскости горизонта на 5 градусов. Это позволяет нам проводить исследования как порошкообразных образцов, так и измерения коллоидных растворов в жидкости для изучения рассеяния света в разреженных средах, так как при этом блик от поверхности жидкости не ослепляет приемник света.

Измерения рассеивающих свойств образцов проводятся в два прохода, с увеличением и с уменьшением фазового угла. Отклонения между результатами позволяют оценить инструментальную погрешность. Если отклонения значительны, измерение повторяется заново. Для малоуглового фотополяриметра минимальный шаг по фазовому углу составляет $0,027^\circ$, и процесс получения данных для одного образца иногда может длиться до 70 часов для достижения необходимой точности измерения. Чтобы выбрать диапазон для более детального изучения, иногда проводятся предварительные измерения с малым разрешением по фазовому углу ($0,5^\circ$). Обычно наиболее интересной областью является диапазон самых малых углов. Альbedo образцов определяется при 2° относительно сжатого образца Halon, который используется как фотометрический стандарт и при измерениях на широкоугловом фотополяриметре. Малоугловой фотополяриметр протестирован с помощью прибора, работающего в JPL NASA (Nelson et al., 1999). Оба прибора позволяют проводить измерения при фазовых углах меньше одного градуса, где фотометрические фазовые кривые обычно показывают большой наклон. Сравнение измерений одних и тех же образцов на этих двух приборах показало хорошее согласие.

На рис. 2.7.7 представлены фазовые кривые интенсивности (нормированные на $0,2^\circ$) и степени линейной поляризации света, рассеянного порошками ярких (Al_2O_3) и темных (V_4C) частиц со средним размером около 30 мкм. Кривые получены двумя фотополяриметрами, малоугловым и широкоугловым; данные, полученные этими разными инструментами, находятся в хорошем согласии. Видно, что темные и светлые образцы демонстрируют очень разное поведение вблизи оппозиции. Для образца карборунда с размерами частиц около 3 мкм ветвь отрицательной поляризации относительно узкая, с углом инверсии α_{inv} близкими к 14° и P_{min} около $-0,7\%$. Для соответствующих фракций оксида алюминия отрицательная поляризация очень мала, около $0,15\%$. Зависимости яркости также сильно отличаются для темных и ярких поверхностей. Действительно, темный порошок показывает почти линейную фазовую кривую с амплитудой пика около 45% в диапазоне фазовых углов $0 - 20^\circ$, тогда как яркий образец оксида алюминия обнаруживает очень выраженную нелинейную зависимость при фазовых углах $< 4^\circ$. В этом случае когерентное усиление обратного рассеяния вносит основной вклад в формирование пика. Однако почти линейное уменьшение интенсивности при фазовых углах больше 4° показывает существенное влияние теневого эффекта, несмотря на высокое альbedo образца оксида алюминия.

Лазерный фотополяриметр предельно малых фазовых углов

Для проведения измерений при фазовых углах порядка нескольких тысячных градуса было решено создать прибор с большим расстоянием между источником света и образцом, используя шахту лифта в здании Харьковского национального университета. Этот инструмент позволил бы проводить измерения при расстоянии, равном 40 метрам, и достичь углов порядка $0,005^\circ$. Вскоре мы отказались от этого варианта прибора, обнаружив, что такие измерения требуют высокой чистоты рабочего помещения. Свет, рассеянный пылевыми частицами на пути лучей, может значительно исказить фазовые зависимости темных образцов, давая ложный оппозиционный пик яркости, который похож на оппозиционные пики порошкообразных поверхностей. Окончательная версия инструмента (лазерного лабораторного фотополяриметра предельно малых фазовых углов) была собрана в лаборатории (загородная наблюдательная станция), в которой расположен аналоговый процессор для

Фурье-преобразования больших изображений. Новый инструмент позволяет проводить высококачественные измерения с минимальным углом фазы $0,008^\circ$ (Psarev et al., 2007).

Лабораторный фотополариметр предельно малых фазовых углов сконструирован на базе оптической скамьи. Прибор позволяет исследовать оппозиционный эффект поверхностей сложной структуры, расположенных как вертикально, так и горизонтально. Рабочий диапазон фазовых углов прибора – $0,008 - 1,6^\circ$. Для измерений при предельно малых фазовых углах необходимы маленькие апертуры источника и приемника света и большое расстояние от них до образца. В нашем случае размер апертуры приемника составляет 1 мм, расстояние до образца – 25 м.

Лаборатория представляет собой комнату, защищенную от пыли. В измерениях в качестве источника света используется одномодовый поляризованный полупроводниковый лазер с длиной волны $0,658$ мкм и мощностью 50 мВт. Диаметр выходного пучка света – 1,4 мм. В качестве объектива приемника используется камера-обскура, представляющая собой круговой конус с усеченной верхушкой (см. рис. 2.7.8). Линейный диаметр используемых образцов – 7 см. Фазовый угол изменяется путем перемещения блока приемника. Разрешение по фазовому углу около $0,008^\circ$. Приемник состоит из камеры-обскуры с фотоумножителем внутри и соосной визирной трубкой (оптическим прицелом). Прицел нужен для наводки приемника на образец после изменения фазового угла. Каждый образец измеряется как минимум дважды, с увеличением и с уменьшением фазового угла. Совпадение этих двух зависимостей является критерием воспроизводимости измерений.

Исследование паразитного светового рассеяния пылью и воздухом является очень важным моментом при измерениях низкоальбедных образцов. Для учета такого рассеяния мы используем светофильтр, полностью поглощающий лазерный свет. Светофильтр вводится в лазерный пучок (вместо образца) с небольшим наклоном для того, чтобы отвести блик от приемника света. Таким образом, мы регистрируем только свет, рассеянный пылью в воздухе. Мы учитываем этот ложный пик при обработке данных.

Для борьбы со спекловым шумом образец устанавливается на подпружиненный держатель, который двигается во время измерений, позволяя выполнить хорошее усреднение.

В обычной схеме измерений образцы необходимо устанавливать в приборе вертикально. Однако исследования порошкообразных образцов также возможны. Для этого используется большая призма полного внутреннего отражения (10×10 см), которая поворачивает лучи на 90° вниз. Это дает возможность проводить измерения горизонтально расположенных образцов.

На рис. 2.7.9 представлены результаты измерений трех образцов с разным альбедо и структурой: очень яркая поверхность осажденного MgO, пушистый светлый порошок, состоящий из очень мелких частиц SiO₂ (размеры частиц около 10 нм), и очень темная поверхность осажденной углеродной сажи. Все измерения, представленные здесь, были сделаны при длине волны $\lambda = 0,658$ мкм. Мы использовали толстые слои материалов, чтобы избежать влияния подложки; все три поверхности очень пористые, особенно поверхность образца SiO₂. Каждая точка фазовых кривых на рис. 2.7.9 является результатом усреднения трех измерений. Продолжительность каждого измерения 2 сек. Кривые для MgO и сажи находятся в хорошем согласии с подобными зависимостями, полученными для тех же образцов на малоугловом фотополариметре. Рисунок 2.7.9 показывает, что образцы MgO и SiO₂ имеют очень выраженный оппозиционный пик при фазовых углах меньше $0,4^\circ$. Этот пик обусловлен эффектом когерентного усиления обратного рассеяния; он подобен пикам, наблюдаемым на некоторых объектах пояса Койпера и ледяных спутниках. Темный образец сажи не показывает оппозиционного пика яркости; его фазовая кривая почти линейна в диапазоне $0,008^\circ - 1,5^\circ$. Этот ход может объясняться теньвым эффектом. Пушистый образец SiO₂ демонстрирует очень узкий оппозиционный пик, начинающийся почти с $0,1^\circ$. Его амплитуда примерно равна амплитуде пика образца MgO.

Мы представили результаты нескольких экспериментов, проведенных для углубления нашего понимания влияния различных факторов на оппозиционный пик яркости и отрицательную поляризацию. Для этого использовались разные инструменты, покрывающие как малые, так и большие фазовые углы. Эти измерения уникальны; они сделали НИИ астрономии одним из мировых центров по изучению рассеивающих свойств реголитоподобных поверхностей. Наш опыт работы и ее результаты широко используются, в частности, в таких

учреждениях, как Лаборатория реактивного движения США, Военная исследовательская лаборатория США и Морская исследовательская лаборатория США.

Литература

[1] *Oetking P.* Photometric studies of diffusely reflecting surfaces with applications to the brightness of the Moon // *J. Geophys. Res.* – 1966. – V. 71, No 10. – P. 2505 – 2513.

[2] *Weidner V, Hsia J.* Reflection properties of pressed polytetrafluoroethylene powder // *J. Opt. Soc. Am.* – 1981. – 71. – P. 856–61.

[3] *Volten H, Muñoz O, Rol E, de Haan J, Vassen W, Hovenier J, Muinonen K, Nousianen T.* Scattering matrices of mineral aerosol particles at 441.6 nm and 632.8 nm // *J. Geophys. Res.* – 2001. – 106. – P. 17, 375–401.