

УДК 523.4

Причины расхождения данных фотометрических наблюдений галилеевых спутников с Земли и из космоса

А.И. Клянчин¹, В.В. Прокофьева-Михайловская²
¹Главная астрономическая обсерватория НАН Украины

²Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория»

Четыре галилеевых спутника Юпитера изучались как с борта космических аппаратов, так и с Земли астрономическими средствами. Наблюдения с борта космических аппаратов обычно проводятся при больших фазовых углах Солнца. Наблюдения с Земли ведутся при фазовых углах Солнца от 1° до 12°. Большие ошибки положений спутников при обработке взаимных явлений имеют место потому, что при их обработке использовались кривые блеска, которые были получены из карт, построенных по космическим данным. Это может объясняться только наличием ярких пятен на поверхностях затмеваемых спутников. Около 30 лет назад было изучено обратное когерентное усиление рассеяния. Такое явление происходит на реголите, покрывающем безатмосферные тела Солнечной системы. Наличие обратного когерентного рассеяния Солнечного света при малых фазовых углах Солнца позволяет объяснить отличие данных космических наблюдений и наземных фотометрических измерений яркости галилеевых спутников Юпитера.

ПРИЧИНИ РОЗХОДЖЕННЯ ДАНИХ ФОТОМЕТРИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ГАЛІЛЕЄВИХ СУПУТНИКІВ ІЗ ЗЕМЛІ ТА З КОСМОСА, Клянчин А.І., Прокоф'єва-Михайловська В.В. — Чотири галілеевих супутника Юпітера вивчалися як з борту космічних апаратів, так і з Землі астрономічними засобами. Спостереження з борту космічних апаратів зазвичай проводяться при великих фазових кутах Сонця. Спостереження з Землі ведуться при фазових кутах Сонця від 1 до 12 градусів. Великі помилки положень супутників при обробці взаємних явищ мають місце тому, що при їх обробці використовувалися їх криві блиску, які були отримані з карт, побудованих за космічними даними. Це може пояснюватися тільки наявністю яскравих плям на поверхнях затмюються супутників, що призводить до іншого розподілу яскравості по диску супутника. Близько 30 років тому було вивчено зворотне когерентне посилення розсіювання. Таке явище відбувається на реголіті, що покриває безатмосферні тіла Сонячної системи. Наявність зворотного когерентного розсіювання сонячного світла при малих фазових кутах Сонця дозволяє пояснити відмінність даних космічних спостережень і наземних фотометричних вимірів яскравості галілеевих супутників Юпітера.

THE REASON FOR THE DIFFERENCE DATA OF PHOTOMETRIC OBSERVATIONS GALILEAN SATELLITES FROM EARTH AND FROM SPACE, by Klianichin A.I., Prokof'eva-Mikhailovskaya V.V. — The four Galilean satellites of Jupiter have been studied with cosmic devices and from the Earth by astronomical means. Observations on board the spacecraft are usually obtained at large phase angles of the Sun. Observations from Earth are being done at phase angles of the Sun from 1 to 12 degrees. Large errors in the processing of the provisions satellite mutual phenomena occur because, in their treatment are used their light curves, which were obtained from the maps constructed from the spacecraft data. This can be explained only by the presence of bright spots on the surfaces of the eclipsed satellite, which leads to a different distribution of brightness across the disk of the satellite. About 30 years ago has been studied the inverse of coherent amplification of scattering. This phenomenon occurs in the regolith, covering the atmosphere-free bodies solar system. The presence of the inverse coherent scattering of the solar light at small phase angles of the Sun can explain the difference between the data of spacecraft observations and ground-based photometric measurements of the brightness of the Galilean satellites of Jupiter.

Ключевые слова: реголит; фазовый угол.

Key words: regolith; phase angle.

1. ВВЕДЕНИЕ

В фотометрических исследованиях галилеевых спутников ныне крайне заинтересована астрометрия и небесная механика. Современная астрометрическая точность превышает 10^{-8} угл. сек. Составление эфемерид и предсказание взаимных явлений спутников Юпитера, по которым можно уточнить их координаты, нуждаются в знании точных фотометрических характеристик спутников. Сравнение наземных наблюдений, проводимые в малом интервале фазовых углов освещения Солнцем, с наблюдениями космических аппаратов, проводимыми в широком интервале углов, показывает сильное расхождение данных. В Москве выполнено сравнение кривых блеска Галилеевых спутников Юпитера в зависимости от угла их вращения, полученных из картографии спутников космическими аппаратами [16] и из наземной фотометрии. Обнаружено несовпадение сравниваемых результатов, которому не найдено никаких объяснений [17]. В этой статье предложено объяснение этого эффекта действием обратного когерентного рассеяния, которое наблюдается с Земли.

2. ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГАЛИЛЕЕВЫХ СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА

Четыре самых ярких спутника Юпитера были открыты Галилео Галилеем в первый же вечер наблюдений — 7 января 1610 года с помощью своей новой, только что изготовленной зрительной трубы. В честь первооткрывателя эти спутники — Ио, Европа, Ганимед, и Каллисто — получили название галилеевых. Их открытие послужило первым доказательством того, что вокруг планеты (не считая Земли) могут обращаться спутники.

Блеск спутников зависит от угла освещения их Солнцем, а также от их вращения вокруг оси, которое синхронизовано с обращением вокруг Юпитера.

Ио является самым необычным спутником нашей солнечной системы. Его альbedo составляет 0.62, радиус орбиты — $421,7 \cdot 10^3$ км. или 5.95 радиуса Юпитера, эксцентриситет — 0.004, период обращения вокруг Юпитера — 1.7691 суток. Размер радиуса — 1820 км. Основной особенностью Ио является вулканизм. Вулканические плюмажи поднимаются на 70–280 км над поверхностью, скорость выброса составляет около 1 км/с. Ударные кратеры практически отсутствуют. Причиной вулканизма являются приливные гравитационные воздействия со стороны Юпитера, Европы и Ганимеда. Ио имеет приливной выступ и испытывает сильную либрацию. Состав продуктов извержения — сера, сернистый газ и некоторые сульфиды. Они придают оранжевый цвет поверхности. На Ио нет воды или льда. Плотность атмосферы из двуокиси серы в 10 млн. раз меньше, чем у поверхности Земли.

Спутник Европа по размеру является наименьшим из галилеевых спутников, его радиус всего 1530 км. Радиус его орбиты составляет 671 034 км. или 9.47 радиуса Юпитера, эксцентриситет — 0.009, наклон орбиты — 0.470 град. Период обращения вокруг Юпитера составляет 3.551181041 суток. Альbedo спутника — 0.68. Внешняя водно-ледяная кора Европы имеет глубину порядка 100 км. Температура поверхности — -145°C . На Европе нет возвышенностей более 100 м высотой. Это одно из самых гладких твердых тел в Солнечной системе. На Европе было найдено только семь кратеров с диаметрами 10–30 км., а в 2000 г. космический корабль «Галилео» обнаружил крупный кратер с диаметром около 80 км, светлые лучи которого простираются почти на 800 км. Ледяная кора довольно подвижна и неоднократно раскалывалась от внутренних напряжений и тектонических процессов. Космический аппарат «Галилео» нашел на Европе ионосферу, что указывает на существование слабой атмосферы у спутника. Давление ее не превосходит 1 микропаскаль.

Ганимед является наикрупнейшим спутником в Солнечной системе, его диаметр составляет 5270 км. Он состоит, в основном, из горных пород и водяного льда. Его альbedo составляет 0.43 ± 0.02 , плотность — 1.9 г/см^3 , период — 7.16 земных суток. 40% поверхности Ганимеда представляют собой древнюю ледяную кору, покрытую многочисленными метеоритными кратерами. Борозды занимают остальные 60% площади Ганимеда. На Ганимеде имеется вулканическая активность. Толщина водяного слоя между каменистыми породами и льдом не превосходит нескольких километров. Благодаря металлическому ядру у Ганимеда очень сильное магнитное поле. Атмосфера Ганимеда очень разрежена. Она имеет давление, в 10^{11} раз меньшее, чем земная атмосфера. На поверхности Ганимеда имеются ударные кратеры. Они достаточно плоские, неглубокие, с низкими стенками. Возможно, вязкая ледяная кора сглаживает детали рельефа. Поскольку в «свежих» кратерах имеется более высокое содержание льда, то можно считать, что Ганимед покрыт узким покрывалом, состоящим из темного вещества, а подповерхностные слои состоят из водяного льда.

Спутник Каллисто является одним из самых кратерированных тел и третьим по величине спутником в Солнечной системе. Его радиус равен 4840 км, период обращения вокруг Юпитера — 16.7 суток, радиус орбиты — около 2 млн. км, что составляет около 26.6 радиусов Юпитера. Каллисто имеет наименьшую плотность из всех галилеевых спутников 1.8 г/см^3 , его альbedo — всего 0.17 ± 0.02 . Оценки дают состав: 40% льда и 60% силикатов и железа. Тектонической активности нет. Поверхность Каллисто на невидимой с Юпитера стороне до предела насыщена кратерами. На обращенной к Юпитеру стороне видна огромная многокольцевая структура Валхалла с яркой центральной областью. Кратеры на Каллисто имеют слабо выраженный вал и небольшую глубину. Предполагается, что поверхность Каллисто покрыта ледяной корой толщиной 200 км, под которой находится слой воды толщиной около 10 км. Обнаружена крайне слабая атмосфера, имеющая давление лишь 10^{-6} Па. Ее давление в 10^{11} раз меньше давления Земной атмосферы.

3. РЕГОЛИТ НА ПОВЕРХНОСТЯХ БЕЗАТМОСФЕРНЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ И ОБРАТНОЕ КОГЕРЕНТНОЕ РАССЕЯНИЕ

Реголит — это рыхлая горная порода на верхней части слоя поверхности, размер зерен которой составляет от 1 до 0,5 мм и меньше. Факторами образования реголита являются действия метеоритных бомбардировок, ультрафиолетовых лучей, солнечного ветра и, возможно, температурного выветривания. Впервые детально был изучен реголит Луны, доставленный в земные лаборатории советскими и американскими аппаратами. Автоматическая станция «Луна-16» доставила 101 г грунта 24 сентября 1970

года. «Луна-20» и «Луна-24» доставили грунт из трёх районов Луны: Моря Изобилия, материкового района вблизи кратера Амегино и Моря Кризисов в количестве 324 г, и он был передан в ГЕОХИ РАН для исследования и хранения.

На галилеевых спутниках может присутствовать реголит в результате метеоритной бомбардировки и влияния солнечного ветра и высокоэнергетических частиц. В статье [13] сообщалось, что на изображении Ио может присутствовать реголит, который образуется в зоне вокруг вулкана Пеле и в результате возможные бомбардировки осколков изверженных пород и метеоритов, а также, предполагается, бомбардировки высоко-энергетических частиц и температурного выветривания. На поверхности Европы, возможно, существует реголит светлого цвета. Каллисто — это самый кратерированный спутник в Солнечной системе. На нем есть реголит.

Эффект когерентного обратного рассеяния был предсказан еще в 1969–73 годах. Исследования эффекта были проведены во многих физических лабораториях мира. Оппозиционный эффект увеличения яркости безатмосферных тел получил объяснение после открытия и исследований обратного когерентного рассеяния в неупорядоченных системах частиц. Явление оказалось универсальным, так как оно связано с общими свойствами рассеяния света пористыми средами. Пик обратного когерентного рассеяния определяется диффузионными путями квантов, которые проходят в глубине рассеивающей среды. Крылья пика определяются путями, которые идут в рассеивающей среде неглубоко, и связаны с малым числом актов рассеяния.

Когерентное рассеяние квантов происходит в достаточно рыхлой среде, каковой является реголит, покрывающий поверхность большинства безатмосферных тел Солнечной системы. При падении на такую поверхность когерентной плоской волны в каждом акте упругого рассеяния изменяется направление волны. Выяснилось, что каждой волне, обходящей ряд рассеивателей, соответствует волна, обходящая тот же ряд рассеивателей в обратном направлении. Такие волны когерентны и они могут интерфери-



Рис. 1. Лунный грунт, доставленный из моря Изобилия космическим аппаратом «Луна-16». Левая (верхняя) часть пробы грунта представляет собой мелкий реголит с размерами от долей микрона до миллиметров. Его плотность невелика и составляет 1.2 г/см^3 . Его пористость достигает 30%.

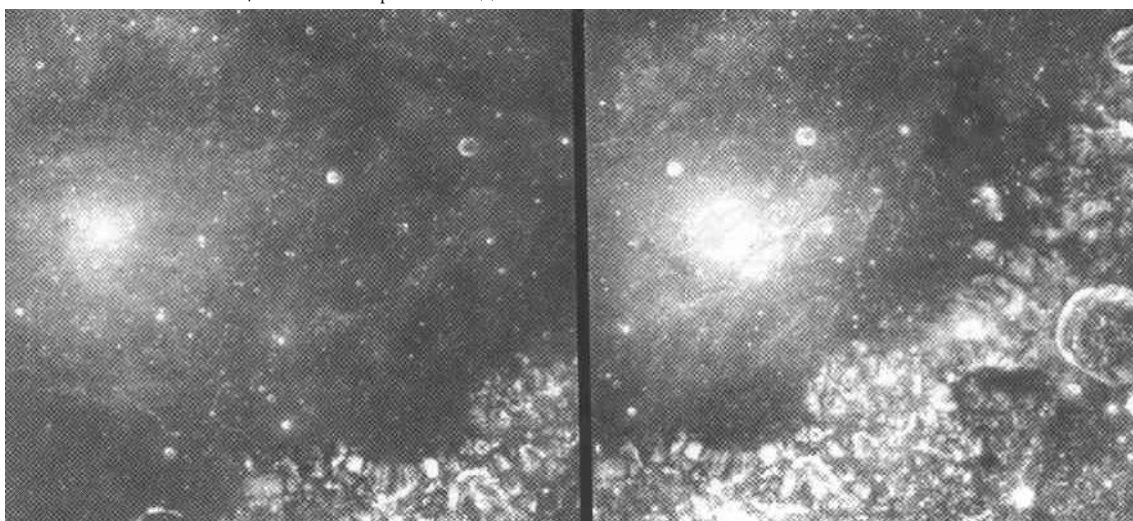


Рис. 2. Два изображения окрестностей места посадки КА «Луна-24», снятые камерой на орбитальном модуле КА «Аполлон-17». Светлое пятно создано когерентным обратным рассеянием солнечного излучения.

ровать [4]. В случае рассеивания назад оптические пути волн и сдвиг фаз будут строго одинаковы. Показано также, что эффект имеет место в случае, когда размеры рассеивающих частиц сравнимы с размерами длины волны падающего света, и поверхность тела имеет порошкообразную структуру.

В настоящее время основным механизмом формирования оппозиционного эффекта принято считать явление когерентного усиления обратного рассеяния. Сущность этого явления заключается в том, что при многократном рассеянии света в порошкообразной среде значительную часть траекторий луча света можно разделить на пары, в которых выходящие из среды лучи интерферируют между собой. Этот механизм впервые был изучен в работах [1, 7]. После этого он интенсивно изучался рядом исследователей, но в основном вне астрофизического аспекта. Впервые вопрос о применении интерференционного механизма для объяснения оппозиционного эффекта яркости безатмосферных тел поставлен в работе [2]. В более поздних работах [3, 5, 6] происходит развитие этого подхода.

4. ВЫВОДЫ

Наблюдения галилеевых спутников, проведенные в течение 4-х лет в НИИ КраО в полосе V, и приведение их к фазовому углу Солнца 6° позволили построить достаточно уверенные кривые блеска спутников в полосе V фотометрической системы Джонсона. Они хорошо согласуются с другими кривыми блеска, построенными по наземным наблюдениям. Таким образом, причиной расхождения кривых блеска галилеевых спутников, полученных с Земли и по картам, построенным по данным космических аппаратов, является распределение яркости по диску спутника, которое зависит от угла освещения поверхности спутника Солнцем. Поэтому мы делаем вывод, что для анализа фотометрии взаимных явлений галилеевых спутников надо использовать наземные кривые блеска спутников, желательно полученные при тех же или близких фазовых углах Солнца.

1. Акимов Л.А. О влиянии мезорельефа на распределение яркости по диску планеты // *Астрономический журнал*. — 1975. — **52**, Вып.3. — С. 635–641.
2. Гнедин Ю.Н., Долгинов А.З. Теория многократного рассеяния // *ЖЭТФ*. — 1963. — **45**. — С. 1136–1149.
3. Длугач Ж.М., Мищенко М.И. Когерентное обратное рассеяние как один из возможных механизмов формирования оппозиционного пика яркости у ряда тел Солнечной системы // *Астрон. Вестн.* — 1999. — **33**, № 6. — С. 356–346.
4. Длугач Ж.М., Мищенко М.И. Влияние формы частиц реголитового слоя на характеристики оппозиционного пика яркости, обусловленного когерентным обратным рассеянием // *Тезисы докладов «Астрономия-2005: состояние и перспективы развития»*. Труды ГАИШ. — 2005. — **78**. — С. 81.
5. Кузьмин В.Л., Романов В.П. Когерентные эффекты при рассеянии света в неупорядоченных системах // *Успехи физ. наук*. — 1996. — **166**, № 3. — С. 247–277.
6. Шкуратов Ю.Г. О природе оппозиционного эффекта яркости и отрицательной поляризации света твёрдых космических поверхностей // *Астрон. циркуляр*. — 1985. — № 1400. — С. 3–6.
7. Шкуратов Ю.Г. Дифракционный механизм формирования оппозиционного эффекта яркости поверхностей со сложной структурой // *Кинемат. и физ. неб. тел.* — 1988. — **5**, № 3. — С. 21–29.
8. Шкуратов Ю.Г. Луна далекая и близкая. — Харьков, 2006. — 182 с.
9. Черкасов И.И., Шварев В.В. Грунт Луны. — М.: Наука, 1975.
10. Hapke B. Coherent backscatter and the radar characteristics of outer planet satellites // *Icarus*. — 1990. — **88**. — P. 407–417.
11. Mishchenko M.I., Dlugach J.M. Coherent backscatter and the opposition effect for E-type asteroids // *Planet. Space Sci.* — 1993. — **41**. — P. 173–181.
12. Muinonen K. Electromagnetic scattering by two interacting dipoles // *Proc. URSI Electromagnetic Theory Symposium*. — Stockholm, 1989. — P. 428–430.
13. Simonelli D. P., Veverka J., McEwen A. S. and Galileo Imaging Team Io: Galileo evidence for major variations in regolith properties // *Geophysical Research Letters*. — 1997. — **24**, № 20. — P. 2475.
14. Shkuratov Yu.G., Kreslavsky M.A., Ovcharenko A.A., Stankevich D.G., Zubko E.S. Opposition effect from Clementine data and mechanisms of backscatter // *Icarus*. — 1999. — **141**. — P. 132–155.
15. Watson K.M. Multiple scattering of electromagnetic waves in a under-dense plasma // *J. Math. Phys.* — 1969. — **10**. — P. 688–702.
16. <http://astrogeology.usgs.gov/Projects/JupiterSatellites/>
17. http://www.sai.msu.ru/research/report_2006.html

Поступила в редакцию 16.08.2012