

УДК 521.182; 523.44

А. Казанцев, канд. фіз.-мат. наук,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ПРОБЛЕМА ПОХОДЖЕННЯ ЛЮКІВ КІРКВУДА В ПОЯСІ АСТЕРОЇДІВ ТА УМОВИ В РАННІЙ СОНЯЧНІЙ СИСТЕМІ

Проаналізовано розподіли орбіт астероїдів, що перебувають в околі резонансів 3:1, 5:2 та 2:1 із Юпітером. Кількість орбіт у резонансі 2:1 у десятки разів перевищує відповідну кількість орбіт в інших двох резонансах. Практично всі тіла в цих резонансах мають розміри менші за 10 км. Показано, що понад 2 млрд років тому в люку 2:1 було кілька десятків тіл розмірами понад 50 км.

Обчислено еволюцію відібраних резонансних орбіт на сотні тисяч років з урахуванням збурень від восьми великих планет і релятивістських ефектів у русі перигеліїв орбіт. Для всіх орбіт у резонансах 3:1 та 5:2 підтверджено можливість зростання ексцентриситетів до величин, достатніх для зближень із Марсом, що може забезпечити вихід тіл із люків. У резонансі 2:1 достатнього зростання ексцентриситетів орбіт не виявлено. Таке зростання може відбуватися за рахунок дії негравітаційних ефектів. Дією ефекту Ярковського можна пояснити вихід із люка астероїда розміром 5 км за період близько 1 млрд років.

Щоб пояснити утворення люка 2:1 та виходу з нього астероїдів із розмірами в десятки кілометрів, потрібно припустити, що фізичні умови для тіл у поясі астероїдів у більш ранню епоху істотно відрізнялись від теперішніх.

Ключові слова: астероїди, резонанси, люки Кірквуда, ефект Ярковського.

Вступ. Існування люків у поясі астероїдів виявлено Кірквудом понад 150 років тому. Ці люки існують в околі тих значень великих півосей орбіт a_c , де середньодобові рухи астероїда n_a відносяться до середньодобових рухів Юпітера n_J , як цілі числа

$$n_a/n_J = p/q. \quad (1)$$

Таке співвідношення називають сумірністю або резонансом. Великі півосі орбіт малих тіл здійснюють періодичні коливання відносно значення a_c в околі сумірності. Тому співвідношення (1) для всіх орбіт у сумірності виконується лише наближено.

За 150 років проведено велику кількість досліджень орбіт астероїдів, що перебувають у різних резонансах з Юпітером. Виявлено ряд особливостей еволюції таких орбіт. Зокрема встановлено, що зони резонансів у поясі астероїдів є одними з головних джерел поповнення популяції астероїдів, що наближаються до Землі [2].

Водночас, до сьогодні не розроблено загального механізму походження люків. У деяких роботах як такий механізм пропонували враховувати взаємні зіткнення астероїдів у резонансах [8]. Інші автори вважали, що в зонах резонансів просто не утворилися астероїди шляхом злипання планетозималей, як це відбувалося поза резонансами [7]. Подібні механізми не знайшли підтримки інших науковців.

Найпоширенішою точкою зору стосовно походження люків є вихід астероїдів за межі резонансу після зближень із великими планетами, зокрема з Марсом. Такі зближення можуть відбуватися у разі збільшення ексцентриситетів резонансних орбіт астероїдів. Наприклад, у роботі [17] указано на можливість зростання ексцентриситетів орбіт у резонансі 3:1 ($a_c = 2.500$ а. о.) від 0.05 до $e > 0.3$. Цього достатньо для зближень із Марсом. Наведений висновок було підтверджено в [15, 19]. Крім того, у цих роботах показано можливість помітного зростання ексцентриситетів орбіт і в резонансі 5:2 ($a_c = 2.828$ а. о.). Однак у резонансі 2:1 ($a_c = 3.278$ а. о.) можливості значного зростання ексцентриситетів орбіт у цих роботах не було виявлено. Таку можливість показано в роботі [4], в якій крім гравітаційного впливу великих планет було враховано й дію негравітаційного ефекту Ярковського. У роботі стверджується, що час виходу тіл розмірами до 5 км має становити від кількох сотень мільйонів років до 1 млрд років. Можливість виходу з люка великих тіл не розглядалась. Таким чином, механізм походження люків у поясі астероїдів і донині залишається не повністю розв'язаною проблемою.

Відбір резонансних астероїдів. Усі числові розрахунки в цій роботі виконували за методом і програмою, описаними в [9]. Зазвичай враховували збурення від усіх великих планет (Меркурій–Нептун). Враховували також релятивістські ефекти у зміщенні перигеліїв орбіт. Усі астероїди брали як безмасові тіла. Точність розрахунків на інтервалі 50 000 років становить 1×10^{-7} а. о. по великій півосі та 1×10^{-7} по ексцентриситету. Такої точності досягають за відсутності зближень малих тіл із планетами.

Для повнішого описання проблеми люків розглянемо розподіл орбіт в околі сумірностей 3:1, 5:2 та 2:1 з Юпітером. Саме тут розташовано найбільш виражені люки в поясі астероїдів. Для кожної сумірності існує своя резонансна зона, тобто область у координатах $a - e$, в якій орбіти ще можуть перебувати в резонансі. Зазвичай резонансна зона має форму перевернутого зрізаного конуса.

На рис. 1–3 наведено розподіли орбіт астероїдів у координатах $a - e$ в околі резонансів 3:1, 5:2 та 2:1. Тут зображено орбіти тіл з абсолютними зоряними величинами $H < 12^m$. Орбіти відібрано з каталогу MPC на 31.05.2022 р. З рисунків добре видно сам факт існування люків в околі резонансів. Разом із тим, наведені розподіли не свідчать про повну відсутність резонансних астероїдів у цих люках. Такі астероїди є, але вони зазвичай мають менші розміри (більші значення H).

Зроблено відбір у цих трьох сумірностях усіх резонансних астероїдів з $H < 16^m$. Спочатку визначено межі резонансних зон у координатах $a - e$. Для цього виконано числові розрахунки еволюції модельних орбіт у резонансах із трьома початковими значеннями ексцентриситетів (0.05, 0.15 та 0.30) на відносно короткі інтервали (до 3 000 років). За такий час великі півосі орбіт уже здійснюють кілька коливань відносно значення a_c . Це дає можливість визначити діапазони зміни a для різних e . Амплітуди коливань великих півосей орбіт істотно залежать і

від початкових значень середньої аномалії M . Межі резонансних зон визначено за максимальними амплітудами коливань великих півосей. На рис. 4 наведено хід еволюції орбіт у координатах $a - e$ в резонансі 5:2 для різних початкових значень e та M (суцільні лінії). Початкові значення кута нахилу i брали 5° . При більших нахилах амплітуда коливань a зменшується. Отже за нашими розрахунками визначалися максимально широкі резонансні зони (на рис. 4 позначено пунктиром). Аналогічно визначалися межі резонансних зон у сумірностях 3:1 і 2:1.

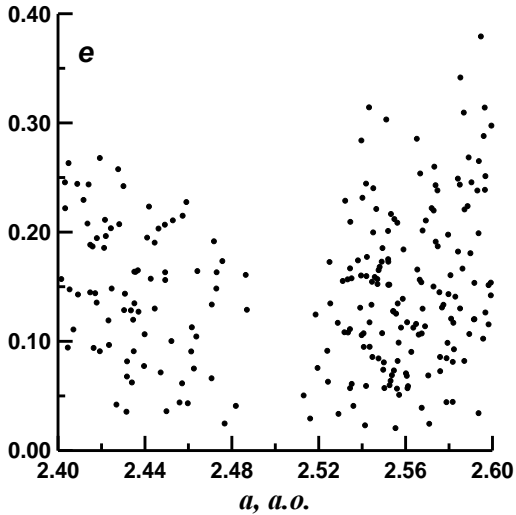


Рис. 1. Розподіл $a - e$ орбіт астероїдів з $H < 12^m$ в околі резонансу 3:1

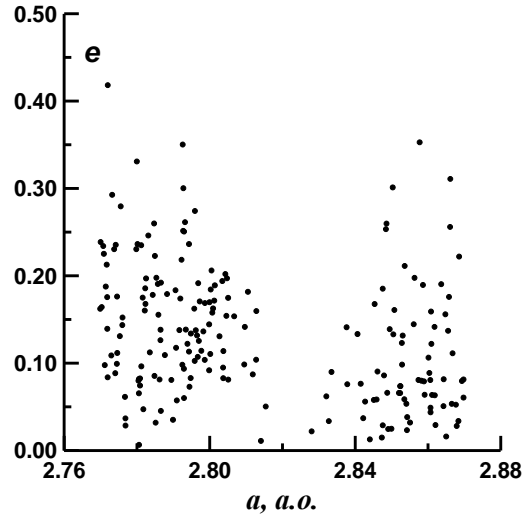


Рис. 2. Розподіл $a - e$ орбіт астероїдів з $H < 12^m$ в околі резонансу 5:2

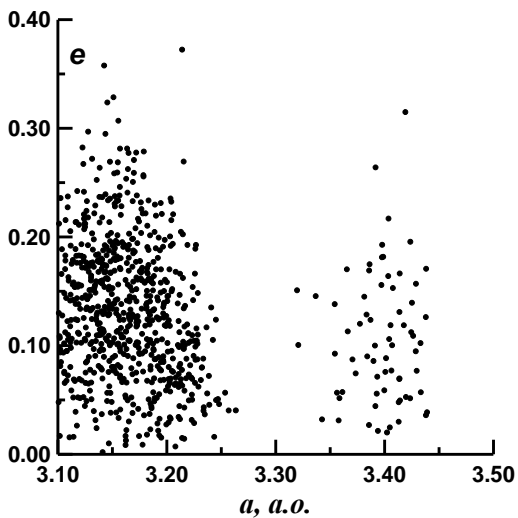


Рис. 3. Розподіл $a - e$ орбіт астероїдів з $H < 12^m$ в околі резонансу 2:1

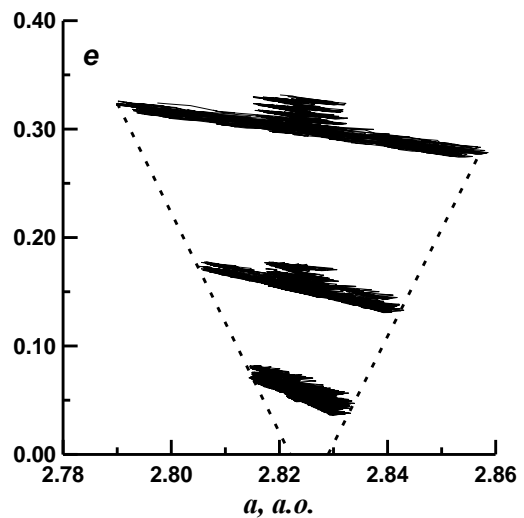


Рис. 4. Еволюція орбіт в координатах $a - e$ в резонансі 5:2

Потім із каталогу MPC на 31.05.2022 р. були відібрані всі орбіти з елементами a, e в межах резонансних зон та з $H < 16^m$. У сумірності 3 :1 таких орбіт виявилось 1538, у сумірності 5:2 – 1593, у сумірності 2:1 – 3535. У кожному з масивів за числовими розрахунками еволюції орбіт на інтервали до 1000 років виявлялися резонансні орбіти. На такому інтервалі вже видно, перетинає велика піввісь даної орбіти значення a_c , чи ні. У сумірності 3:1 виявлено 17 резонансних орбіт, у сумірності 5:2 – 7, у сумірності 2:1 – 341. На рис. 5–7 наведено розподіли в координатах $a - e$ всіх відібраних орбіт у межах кожної з трьох резонансних зон. Резонансні орбіти позначено квадратами.

Розміри практично всіх тіл на резонансних орбітах у цих трьох люках не перевищують 10 км. Лише в люку 2:1 три астероїди мають розміри від 10 до 20 км, один астероїд (1362, Griqua) – близько 30 км. Усі інші – менше 10 км.

Механізм поповнення люків. З наведених даних видно, що в сумірності 2:1 перебуває значно більше резонансних орбіт, ніж у двох інших. Причому ефект селекції може лише зменшувати відносну кількість орбіт у зоні сумірності 2:1. Порівняння рисунків 1–3 та 5–7 показує, що в цих люках колись були досить великі тіла, які вже покинули люки. Нині там є тіла значно менших розмірів. Такі тіла можуть попадати в люки у процесі зближень чи зіткнень з іншими астероїдами або під час руйнування великого тіла. Зрозуміло, що це можливо для тіл, які рухаються орбітами, розташованими поблизу резонансних зон. Після такої події тіло практично одразу може потрапляти в люк. Однак такі події відбуваються досить зрідка.

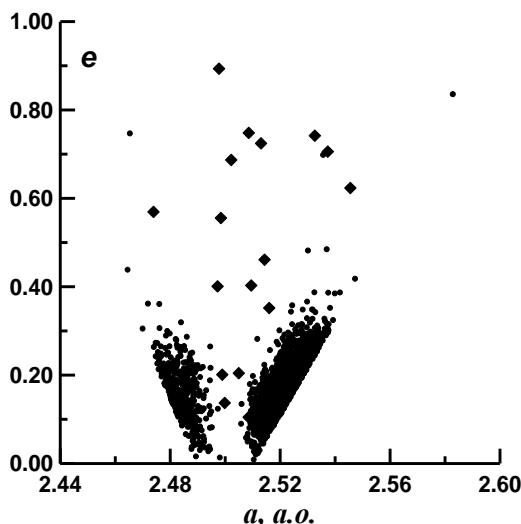


Рис. 5. Резонансна зона з резонансними орбітами (квадрати) у сумірності 3:1

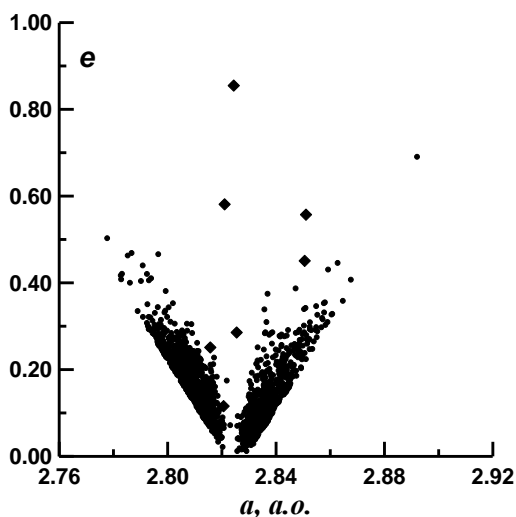


Рис. 6. Резонансна зона з резонансними орбітами (квадрати) у сумірності 5:2

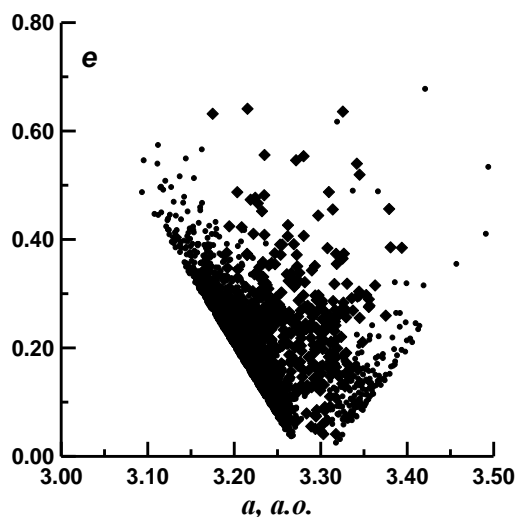


Рис. 7. Резонансна зона з резонансними орбітами (квадрати) у сумірності 2:1

Крім того, тіла малих розмірів можуть попадати в люки і з більш віддалених зон, але за довгий час. Таке можливо за рахунок дії ефекту Ярковського. Саме ефект Ярковського вважають головним механізмом поповнення люків. Хоча вказаний ефект змінює орбіту тіла дуже повільно, але він діє одразу на велику кількість тіл на відміну від зіткнень чи зближень.

Зауважимо, що концентрація тіл ліворуч від люка 2:1 значно більша, ніж праворуч (див. рис. 3). Тому можна вважати, що переважна більшість тіл у люку перейшли туди з лівого боку ($a < a_c$). У цій зоні розташовано кілька великих сімейств астероїдів, зокрема сімейство Феміди та Хігії. Саме великі сімейства астероїдів поблизу резонансів можуть бути вагомими джерелами поповнення люків. Про це свідчать розподіли орбіт сімейств у таких координатах: власна велика піввісь – розмір ($a' - D$). Власні елементи орбіт сімейств – це елементи орбіт a , e та i , на які не діють довгоперіодичні коливання. Фактично для кожного тіла в сімействі власні елементи є постійними. Відповідні дані можна знайти в роботі [12]. У цій статті наведено власні елементи та розміри тіл для 76 сімейств астероїдів. Загальна кількість астероїдів становить понад 38 000. Назва сімейства відповідає номеру найбільшого астероїда в ньому. Наприклад, сімейство 008 відоме як сімейство Флори.

Якщо члени сімейства відібрані правильно, то розподіл $a' - D$ матиме центральний максимум із крилами в обидва боки, наприклад сімейство 163 (рис. 8). Якщо орбіта батьківського тіла сімейства розташована поблизу резонансу, то розподіл $a' - D$ може мати зрізане крило, наприклад сімейство 024 – Феміди (рис. 9). Тут край правого крила сімейства зрізаний резонансом 2:1. Оскільки орбіти в резонансі зазнають значних змін, такі тіла не розглядають як члени сімейства. Є й інше сімейство зі зрізаним крилом резонансом 2:1: сімейство 010 – Хігії (рис. 10). Для детальнішої картини в розподілі $a' - D$ тіла розмірами понад 100 км на цьому рисунку не показано.

Специфічний розподіл $a' - D$ сімейства (центральный максимум із крилами в обидва боки) може бути й первинного походження. За руйнування батьківського тіла фрагменти (члени сімейства) розлітаються в різні боки з певними швидкостями. У середньому, чим менший розмір фрагмента, тим більша швидкість, тобто тим більша різниця між великими півосями орбіт батьківського тіла та фрагмента.

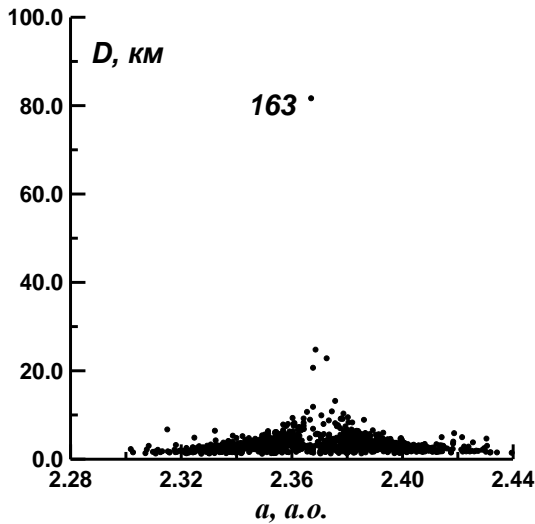


Рис. 8. Розподіл $a' - D$ сімейства 163

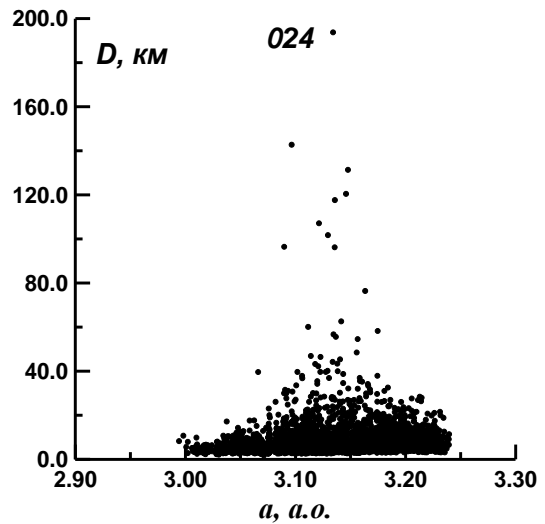


Рис. 9. Розподіл $a' - D$ сімейства Феміди

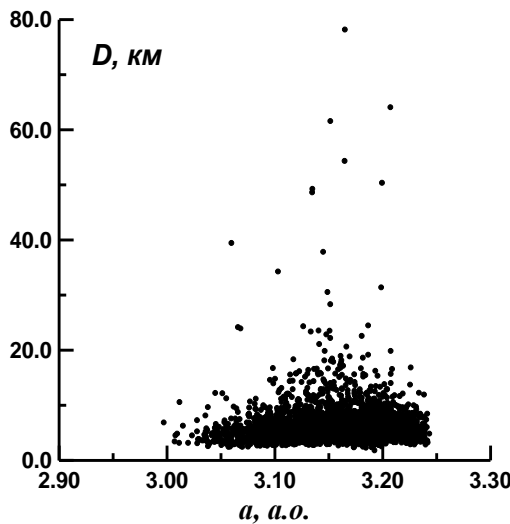


Рис. 10. Розподіл $a' - D$ сімейства Хигії

Зазначимо, що залежності $D(a')$ сімейств астероїдів науковці розглядають, як результат дії ефекту Ярковського [1]. Дія цього ефекту формує розподіли $a' - D$ якісно схожі з розподілами, утвореними у процесі руйнування тіл. Однак вважають, що швидкості розльоту фрагментів недостатні для формування існуючих крил у розподілах сімейств [1].

Є й інші аргументи на користь домінуючого впливу ефекту Ярковського на формування залежностей $D(a')$ сімейств астероїдів. Так, у [6] виявлено анізотропний розподіл напрямків осевого обертання астероїдів у сімействах. Тіла з прямим обертанням зазвичай містяться у правих крилах, а зі зворотним – у лівих. Саме так мають бути орієнтовані осі обертання астероїдів, якщо крила формуються дією ефекту Ярковського.

У роботі [10] виявлено зменшення середнього значення альбеда астероїдів зі збільшенням власних великих півосей для майже всіх коректно відібраних сімейств. Зрозуміло, що таке зменшення не могло утворитися під час руйнування батьківського тіла.

Розподіли $a' - D$ зі зрізаними крилами сімейств астероїдів Феміди (рис. 9) та Хигії (рис. 10) показують, що фрагменти уламків батьківських тіл цих сімейств у свій час попали в люк 2:1. Зрозуміло, що астероїди на орбітах ліворуч від люка, що не належать до сімейств (астероїди фону), також потрапили в люк. Тому серед відібраних 341 тіл на резонансних орбітах можуть бути як астероїди від сімейств, так і астероїди фону. Спробуємо відокремити одні від інших. Для цього розглянемо розподіл кількості резонансних орбіт за нахилом. Це має сенс, оскільки нахили резонансних орбіт у процесі еволюції змінюються у відносно невеликих межах.

Залежність $N(i)$ для резонансних орбіт показано на рис. 11. На рис. 12 зображено залежність $N(i)$ для астероїдів фону ліворуч від резонансу з абсолютними зоряними величинами $H < 16^m$ та елементами орбіт: $a = 3.20 - 3.25$ а. о., $e = 0 - 0.30$. Загальна кількість таких орбіт становить 8120. Порівняння рис. 11 та 12 показує, що головний максимум у розподілі $N(i)$ резонансних орбіт ($i = 0^\circ - 5^\circ$) утворений не астероїдами фону. Цей максимум створено, головним чином, тілами сімейств Феміди та Хигії.

Власні нахили орбіт тіл сімейства Феміди становлять $0.5^\circ - 2.8^\circ$, нахили сімейства Хигії $4.2^\circ - 6.0^\circ$ [13]. Звичайно, діапазон оскулюючих елементів орбіт дещо ширший, але лише трохи. Виконані розрахунки показали, що для 112 зі

133 резонансних орбіт із нахилами $0^\circ\text{--}5^\circ$ самі нахили залишаються в тому ж діапазоні ($0^\circ\text{--}5^\circ$) упродовж десятків тисяч років. Тому, якщо не всі, то більшість тіл на резонансних орбітах із нахилами $i < 5^\circ$ цілком обґрунтовано можна вважати тілами із сімейств Феміди та Хігії. Крім того, враховуючи діапазони власних нахилів орбіт цих сімейств, можна вважати, що більшість резонансних орбіт з $i < 5^\circ$ належать до сімейства Феміди. Відповідно до [13] поблизу резонансу 2:1 немає інших сімейств із власними нахилами менше 8° .

Поблизу резонансів 3:1 та 5:2 також є орбіти астероїдів фону. Крім того, там є і сімейства астероїдів із крилами, зрізаними цими резонансами: сімейство 472 поблизу резонансу 3:1 та сімейство 208 поблизу резонансу 5:2. Отже як астероїди фону, так і уламки батьківських тіл сімейств потрапили в кожен із цих трьох люків. Однак нині кількість резонансних орбіт у люку 2:1 набагато більша, ніж в інших двох. Указана різниця потребує пояснення.

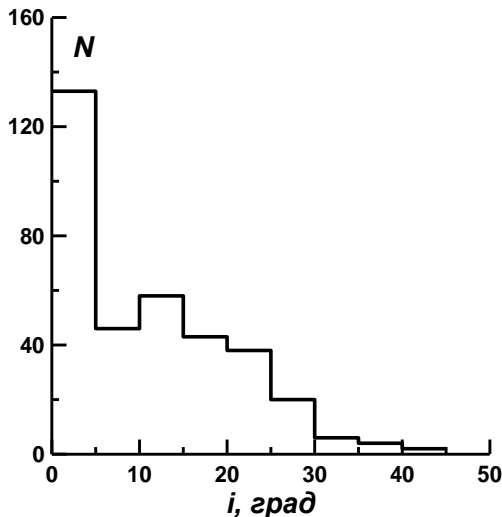


Рис. 11. Розподіл $N(i)$ резонансних орбіт у люку 2:1

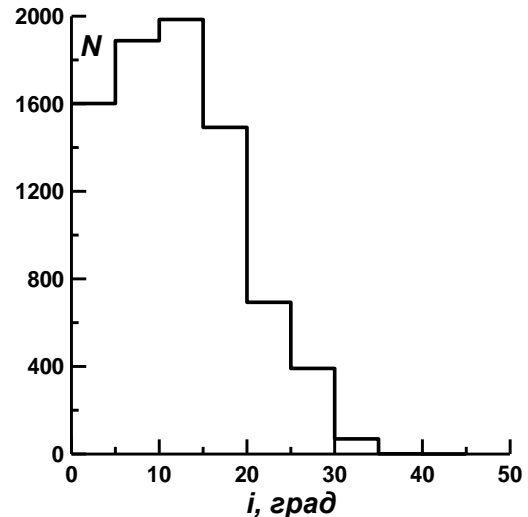


Рис. 12. Розподіл $N(i)$ орбіт астероїдів фону ліворуч від люка 2:1

Механізм виходу астероїдів із люків. Як зазначено раніше, вихід тіл із люків 3:1 та 5:2 можна пояснити зближеннями з Марсом після достатнього збільшення ексцентриситетів орбіт. У цих резонансах таке збільшення можливе [15, 17, 19]. У цій роботі також зроблено відповідні оцінки. Виконано числові розрахунки еволюції орбіт у сумірностях 3:1 та 5:2 з різним набором початкових елементів. Отримано, що в сумірності 3:1 для всіх орбіт відбувається зростання ексцентриситетів від 0.05–0.10 до 0.32 і більше на інтервалах 20–50 тис. років. На інтервалах понад 150 тис. років у деяких орбітах ексцентриситети зростають до значень понад 0.60. У сумірності 5:2 для всіх орбіт відбувається зростання ексцентриситетів від 0.05–0.10 до 0.40–0.60 за кілька десятків тисяч років еволюції. Отже в обох цих резонансах усі тіла набувають можливість зближатися з Марсом.

У резонансі 2:1 значного зростання ексцентриситетів орбіт не виявлено [15, 19]. Водночас, люк дійсно утворився, оскільки великі тіла існують з обох сторін люка (рис. 3). Тому реальний механізм виходу тіл із люка мав існувати.

Щоб велике тіло покинуло люк, воно має зазнати зближення з планетою. А таке можливо лише тоді, коли тіло розміщене на орбіті зі значним ексцентриситетом. За нашими розрахунками, афелійна відстань орбіти Марса змінюється в межах 1.62–1.71 а. о. з періодом близько 500 000 років, а перигелійна відстань орбіти Юпітера змінюється в межах 4.88–5.07 а. о. з періодом близько 1 млн років. Отже, для зближення з Марсом тіла на орбіті в резонансі 2:1, ексцентриситет цієї орбіти має бути не менше 0.48. Для зближення з Юпітером ексцентриситет резонансної орбіти має бути приблизно таким самим.

Можна бачити, що серед резонансних орбіт є орбіти зі значними ексцентриситетами (див. рис. 7). Для восьми з них ексцентриситети перевищують 0.50. Отже тіла на цих орбітах можуть мати зближення з планетами й виходити з резонансу. У роботі [11] знайдено 6 астероїдів з $H < 18^m$, які в наступні кілька тисяч чи кілька десятків тисяч років мають перейти в популяцію Кентаврів.

У цій роботі виконано числові розрахунки еволюції орбіт у резонансі 2:1 із різними початковими елементами на інтервали в сотні тисяч років. Враховувались збурення від всіх планет (Меркурій–Нептун), а також релятивістські ефекти у зміщенні перигеліїв орбіт. Зростання ексцентриситетів орбіт від 0.10, 0.15 та 0.20 до значень, достатніх для зближень тіл із планетами, що має місце в резонансах 3:1 та 5:2, не виявлено. Ці розрахунки збігаються з результатами робіт [15, 19]. Разом усе це пояснює значну кількість невеликих астероїдів у резонансі 2:1 та майже повну їхню відсутність у двох інших резонансах. Але не зрозумілим залишається відсутність великих тіл ($H < 12^m$) в усіх трьох резонансах (див. рис. 1–3). З рис. 3 видно, що концентрація тіл ліворуч від люка 2:1 значно більша концентрації тіл праворуч. Яка була концентрація тіл у самому люку до їхнього виходу з нього, сказати важко. Але у будь-якому разі, вона мала бути не менша, ніж концентрація праворуч. А праворуч розміщено близько 30 тіл із розмірами понад 50 км, з яких 11 мають розміри понад 100 км.

Зрозуміло, що час перебування менших тіл у люку може бути лише коротшим. Тому тіла, що перебувають у люку нині (тіла на резонансних орбітах) потрапили туди значно пізніше, ніж утворився сам люк. Колишні великі тіла вийшли з люка. Вихід тіл із люків 3:1 та 5:2 можна пояснити зближеннями з Марсом. Але який мав бути механізм виходу тіл із люка 2:1?

Наші розрахунки еволюції орбіт у резонансі 2:1 виконано з урахуванням збурень від усіх великих планет, а також релятивістських ефектів у русі перигеліїв орбіт. І ці розрахунки, як і розрахунки інших авторів, не виявили достатнього зростання ексцентриситетів. Напевне в реальності існують (чи існували раніше) деякі фактори, які не

були враховані ні в наших розрахунках, ні в інших роботах, але які могли привести до помітного зростання ексцентриситетів резонансних орбіт.

Тут можна звернути увагу на існуючу нині модель міграції планет. Відповідно до цієї моделі планети-гіганти зайняли свої теперішнє положення на орбітах навколо Сонця після тривалої міграції. Як видно з рис. 1–3, положення всіх резонансів відповідають сучасному значенню великої півосі орбіти Юпітера. Тому, якщо така міграція і була, то великі тіла вийшли з люка 2:1 уже після її зупинення. Таким чином, вихід великих тіл із люка 2:1 навряд чи може бути обумовлений відмінням від сучасного розташування великих планет.

Залишається розглянути можливий вплив негравітаційних ефектів (НГЕ). Таким НГЕ може бути ефект Ярковського. По-перше, існують вказівки на зростання ексцентриситетів резонансних орбіт під дією ефекту Ярковського [3, 18]. По-друге, як уже зазначено раніше, у роботі [4] вказано на можливість виходу тіл із резонансу 2:1, якщо врахувати ефект Ярковського. Щоправда в цій роботі розраховувалась еволюція орбіт тіл відносно невеликих розмірів (до 18 км). Відповідно до [4], час виходу тіл розмірами до 5 км має становити від кількох сотень мільйонів років до 1 мільярда років. Оскільки додатковий імпульс тіла за рахунок ефекту Ярковського dp приблизно обернений його розміру, то час виходу з люка тіл розміром 50 км має становити близько 10 млрд років. Отже бачимо, що і врахування ефекту Ярковського не може пояснити вихід великих тіл із люка 2:1.

У роботі [4] розрахунки виконували на інтервали в кілька мільярдів років. Точність розрахунків на такі довгі інтервали визначити складно. Ми використали інший підхід для оцінювання впливу ефекту Ярковського на вихід тіл із люка 2:1, виконуючи розрахунки на значно коротші інтервали, де точність обчислень ще можна вважати задовільною.

Можливий вплив НГЕ на еволюцію резонансних орбіт

Вплив модельного НГЕ. Суть ефекту Ярковського полягає в отриманні тілом додаткового імпульсу dp за рахунок перевищення (в інфрачервоному діапазоні) поглинутої сонячної радіації. Існує певна затримка dt між моментом поглинання сонячної радіації та її перевищенням. У цьому разі виникає додаткова швидкість dv до геліоцентричної швидкості тіла vh . Збільшення геліоцентричної швидкості залежить не лише від маси тіла, а й від елементів його орбіти, альbedo поверхні, орієнтації осі та періоду осьового обертання.

Для тіла на коловій орбіті максимум додаткової швидкості буде у випадку, коли вісь обертання тіла буде перпендикулярна до площини орбіти, а величина dt становитиме чверть періоду його осьового обертання. За прямого обертання додаткова швидкість буде додатною, а за зворотного – від'ємною.

Дія ефекту Ярковського занадто мала, щоб бути помітною в еволюції орбіти астероїда розміром кілька кілометрів на інтервалах у тисячі чи десятки тисяч років. Тому ми виконали розрахунки еволюції орбіт з урахуванням модельного НГЕ. Суть дії такого НГЕ відповідала дії ефекту Ярковського. Змінювалися значення альbedo астероїда, періоди осьового обертання й орієнтація осі. Тільки величина додаткової швидкості вибиралася значно більшою, ніж у випадку реального ефекту Ярковського.

Виконано числові розрахунки еволюції орбіт тіл у резонансі 2:1 із додаванням штучного імпульсу в широкому діапазоні. У випадку, коли вісь обертання була перпендикулярна до площини орбіти астероїда, величина додаткової швидкості dv змінювалася в межах від 0.01 мм/с за добу до 5.0 мм/с за добу. Відповідні значення dv додавали до геліоцентричної швидкості тіла vh на кожному кроці інтегрування. Напрямок осьового обертання обирався як прямий ($dv > 0$), так і зворотний ($dv < 0$).

Як зазначено вище, точність наших розрахунків на інтервалі 50 000 років становить 1×10^{-7} а. о. по великій півосі й 1×10^{-7} по ексцентриситету. Зі зростанням інтервалу розрахунків похибка зростає нелінійно і на інтервалі в 600 000 років збільшується приблизно на 4 порядки. Для оцінювання умов зближень астероїдів із планетами така точність недостатня. Але для визначення часу зростання ексцентриситетів орбіт у резонансі 2:1 така точність ще може бути прийнятною.

Розрахунки показали, що для всіх додатних значень dv справджується систематичне зростання ексцентриситетів резонансних орбіт на відміну від випадків $dv = 0$ (рис. 13). Середній час зростання ексцентриситетів te майже лінійно залежить від величини $1/dv$ (рис. 14). У випадку максимального значення dv (5 мм/с за добу) час зростання ексцентриситетів від 0.15 до 0.50 становить близько 1300 років, у разі мінімального (0.01 мм/с за добу) – близько 600 000 років. Розрахунки для ще менших значень dv проводити недоцільно, оскільки інтервали інтегрування становитимуть уже мільйони років і точність обчислень буде дуже низькою.

За від'ємних значень dv орбіти виходить із резонансу в зону великих півосей орбіт $a < a_c$ (рис. 15). Отже всі тіла мають вийти з резонансу при дії НГЕ незалежно від напрямку додаткової швидкості.

Вплив ефекту Ярковського на вихід астероїдів із люка. Оцінено вихід із люка 2:1 модельного астероїда розміром 5 км з урахуванням дії ефекту Ярковського. Такий розмір близький до середнього розміру тіл на відібраних орбітах з $e > 0.5$ у резонансі 2:1. Абсолютна зоряна величина цих астероїдів становить від 14^m до 16^m . Були прийняті такі значення альbedo p та середньої густини ρ модельного астероїда: $p = 0.05$, $\rho = 1$ г/см³. Ці значення близькі до середніх значень реальних тіл на зовнішньому краю головного поясу астероїдів.

Кількість сонячної радіації, яка падає на одиницю площі поверхні тіла на відстані 3.30 а. о. від Сонця можна оцінити за сонячною сталою. Якщо вся поглинута радіація буде випромінюватись у напрямку, протилежному вектору геліоцентричної швидкості астероїда vh , то додаткова швидкість, отримана таким модельним астероїдом, становитиме приблизно 1×10^{-5} мм/с за добу. Якщо отримана вище залежність $te(dv)$ зберігається до таких малих значень dv , то час зростання ексцентриситетів орбіт у резонансі 2:1 від 0.15 до 0.50 має становити близько 600 млн років.

Цю оцінку отримано у припущенні, що вся поглинута радіація випромінюється у напрямку, протилежному вектору vh . Зрозуміло, що в реальності кванти мають випромінюватись у всю півсферу. У разі рівномірного розподілу напрямків випромінювання час зростання ексцентриситетів орбіт має становити близько 1 млрд років. Однак це також мінімальний час. Адже вказану оцінку отримано для випадку максимально сприятливої орієнтації півсфери випромінювання відносно напрямку вектора vh . Зрозуміло, що така орієнтація буває далеко не завжди. Тому в більшості випадків час te для 5-кілометрового астероїда становитиме понад 1 млрд років. Можна додати, що час виходу таких тіл із люка навряд чи істотно відрізнятиметься від часу te .

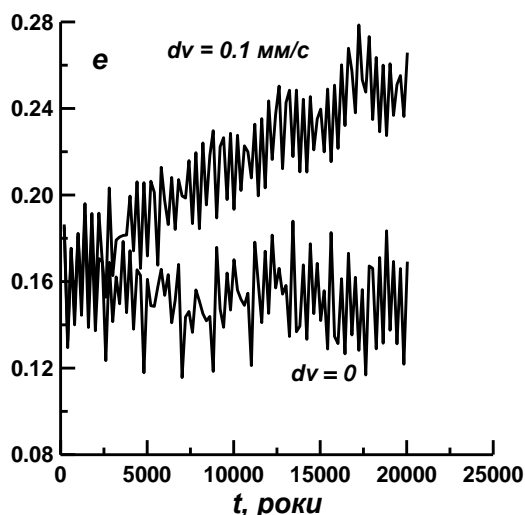


Рис. 13. Залежність $e(t)$ для резонансної орбіти під дією ефекту Ярківського та без нього

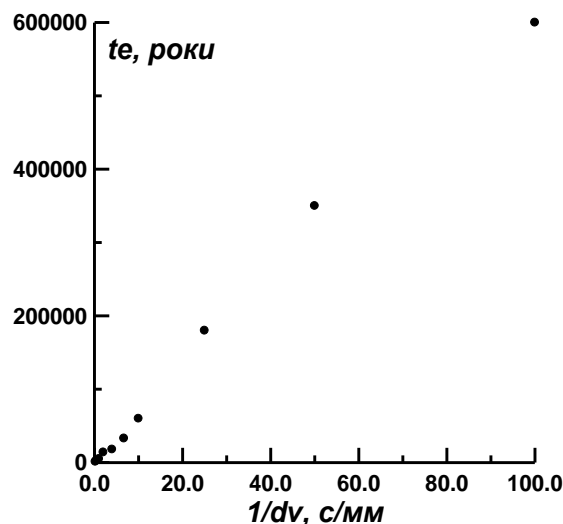


Рис. 14. Залежність середнього часу зростання ексцентриситетів від величини $1/dv$

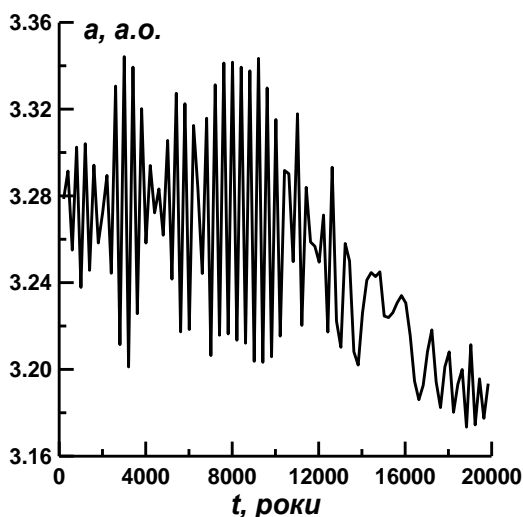


Рис. 15. Залежність $a(t)$ для орбіти при $dv = -0.1$ мм/с за добу

Отримана тут оцінка часу виходу з люка 2:1 тіла розміром 5 км досить близька до відповідної оцінки, отриманої в [4], де використано зовсім інший підхід до розрахунків. Але середня густина тіл була прийнята така, як і в нашому варіанті. Тому можна вважати, що час виходу з люка 2:1 тіл розміром близько 5 км з урахуванням ефекту Ярківського справді має становити близько 1 млрд років чи навіть більше.

Час перебування окремих реальних орбіт астероїдів у резонансі 2:1 оцінити складно. Можна лише припустити, що орбіти з більшими ексцентриситетами перебувають у резонансі довше, ніж із меншими.

Можливе пояснення походження люка в сумірності 2:1 у далекому минулому. Якщо час виходу з люка 2:1 тіл розміром 5 км становить 1 млрд років чи більше, то як зазначено раніше, час виходу тіл розмірами 50 км і більших має становити десятки мільярдів років. Отже походження люка 2:1 (див. рис. 3) не пояснюється і за дії ефекту Ярківського. Хоча формально цей ефект може пояснити утворення люка 2:1. Але для цього потрібно припустити, що у далекому минулому інтенсивність сонячної радіації була значно потужнішою, ніж нині. Коли таке могло бути?

Як показано вище, нині в резонансі 2:1 перебувають орбіти десятків тіл, утворених у процесі руйнування батьківського тіла сімейства Феміди. Вік цього сімейства оцінюється від 2.4 до 3.8 млрд років [16]. Зрозуміло, що в люк 2:1 уламки потрапили не одразу після руйнування батьківського тіла. За зробленими оцінками, час переміщення тіл сімейства Феміди від місця руйнування (3.14 а. о.) до резонансу 2:1 (3.28 а. о.) під дією ефекту Ярківського становить 100–200 млн років. За межами резонансів ефект Ярківського змінює лише велику піввісь орбіти, а ексцентриситет залишається майже незмінним. Отже такі тіла потрапили в люк 2:1 понад 2 млрд років тому. Якщо значно потужніша інтенсивність Сонця дійсно справджувалася, то таке мало би бути до моменту утворення сімейства Феміди. Інакше тіла із цього сімейства не лише перемістилися б у люк 2:1, а й повністю з нього вийшли б.

На можливість потужнішого сонячного випромінювання в далекому минулому вказано й у інших публікаціях [5, 14]. Зокрема в [5] зазначено, що на молодому Сонці мали відбуватися в сотні разів частіше та в десятки разів потужніші

рентгенівські спалахи, порівняно із сучасним Сонцем. А потік енергетичних протонів від раннього Сонця був у 100 000 разів більшим.

Отже, зроблене тут припущення про значно більшу інтенсивність сонячної радіації в далекому минулому має певне незалежне підтвердження. Якщо наведене припущення отримає остаточне підтвердження з чіткими кількісними характеристиками, то це, крім іншого, закріє і питання походження люків Кірквуда в поясі астероїдів.

Висновки. Походження люків у резонансах з Юпітером 3:1 та 5:2 можна пояснити зростанням ексцентриситетів резонансних орбіт під дією гравітації планет Сонячної системи і наступними зближеннями тіл із Марсом.

Зростання ексцентриситетів орбіт у резонансі 2:1, яке є достатнім для зближень тіл із планетами, можна пояснити дією ефекту Ярковського. Для виходу з резонансу 2:1 тіла розміром 5 км потрібно близько 1 млрд років.

Щоб пояснити утворення люка 2:1 і виходу з нього астероїдів із розмірами в десятки кілометрів, потрібно припустити, що фізичні умови для тіл у поясі астероїдів у більш ранню епоху істотно відрізнялись від нинішніх. Зокрема й інтенсивність сонячної радіації в ранній Сонячній системі могла бути значно більшою порівняно із сучасною.

Список використаних джерел

1. Bottke W. F. et al. Dynamical Spreading of Asteroid Families by the Yarkovsky Effect // Science. 2001, V.294. PP. 1693–1696.
2. Bottke W. F. et al. Debaised Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects // Icarus. 2002, №2(156). PP. 399–433.
3. Brož M., Vokrouhlický D. Asteroid families in the first-order resonances with Jupiter // MNRAS. 2008, №2(390). PP. 715–732.
4. Chrenko O. et al. The origin of long-lived asteroids in the 2:1 mean-motion resonance with Jupiter // MNRAS. 2015, №3(451). PP. 2399–2416.
5. Feigelson E. D., Garmire G. P., Pravdo S. H. Magnetic Flaring in the Pre-Main-Sequence Sun and Implications for the Early Solar System // ApJ. 2002, №1(572). PP. 335–349.
6. Hanuš J. et al., An anisotropic distribution of spin vectors in asteroid families // A&A. 2013, V.519. id.A134. 19 pp.
7. Heppenheimer T. A. On the Origin of the Kirkwood Gaps // Celest. Mech. 1980, №3(22). PP. 297–304.
8. Jefferys W. H. Nongravitational forces and resonances in the solar system // AJ. 1967, V.72. PP. 872–875.
9. Kazantsev A. M. A Simple Method for Numerical Calculations of the Evolution of Orbits of Near-Earth Asteroids // SoSyR. 2002, №1(36). PP. 43–49.
10. Kazantsev A. M., Kazantseva L. V. Additional criteria for identifying the asteroid families and confirmation of the effect of spatial separation of family members according to their albedos // CPSPB. 2014, V. 30. PP. 255–260.
11. Kazantsev A. M., Kazantseva, L. V. On a possibility of transfer of asteroids from the 2:1 mean motion resonance with Jupiter to the Centaur zone // MNRAS. 2021, №1(505). PP. 408–414.
12. Masiero J. R. et. al. Asteroid Family Identification Using the Hierarchical Clustering Method and WISE/NEOWISE Physical Properties // ApJ. 2013, №1(770). article id. 7. 22 pp.
13. Milani A. et. al. Asteroid families classification: Exploiting very large datasets // Icarus. 2014, V.239. PP. 46–73.
14. Mishra R. K., Marhas K. K. Meteoritic evidence of a late superflare as source of ^7Be in the early Solar System // Nat. Astron. 2019, №3. PP. 498–505.
15. Moons M. Review of the dynamics in the Kirkwood gaps // Cel. Mech. Dyn. Astron. 1996, №1-2(65). PP. 175–204.
16. Spoto F., Milani A., Knežević Z. Asteroid family ages // Icarus. 2015, V.257. PP. 275–289.
17. Wisdom J. The origin of the Kirkwood gaps - A mapping for asteroidal motion near the 3/1 commensurability // AJ. 1982, V.87. PP. 577–593.
18. Xu Y.-B., Zhou L.-Y., Ip W.-H. Transit of asteroids across the 7/3 Kirkwood gap under the Yarkovsky effect // A&A. 2020, V.637. id.A19. 9 pp.
19. Yoshikawa M. Motions of asteroids at the Kirkwood gaps II. On the 5:2, 7:3, and 2:1 resonances with Jupiter // Icarus. 1991, №1(92). PP. 94–117.

Надійшла до редколегії 27.09.2022

A. Kazantsev, PhD

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

THE PROBLEM OF THE ORIGIN OF KIRKWOOD GAPS IN THE ASTEROID BELT AND CONDITIONS IN THE EARLY SOLAR SYSTEM

The orbits of asteroids from the MPC catalogue of January 21, 2022 with absolute magnitudes $H < 16^m$, in the 3:1, 5:2 and 2:1 mean motion resonances (MMRs) with Jupiter were selected. The number of the orbits in the 2:1 MMR is dozens of times greater than in two other resonances. They are fragments of parent bodies of neighbour asteroid families, in particular the Themis family, in the 2:1 MMR.

The sizes of almost all bodies in resonant orbits do not exceed 10 km. It is shown that in the past, there were bodies of much larger sizes in these three gaps. In particular, more than two billion years ago there were several tens of bodies with sizes of more than 50 km in the 2:1 gap, including those with sizes of more than 100 km.

Numerical calculations were performed to evaluate the evolution of the selected resonant orbits over hundreds of thousands years. Perturbations from all eight major planets and the relativistic effects of orbital perihelion displacement were taken into account. For all orbits in the 3:1 and 5:2 MMRs an increase in the orbit eccentricities, which are sufficient for the bodies to approach Mars, was confirmed. It can explain the exit of asteroids from these two gaps. In the 2:1 MMR, a sufficient increase in the orbit eccentricities was not detected. Such increase in orbit eccentricities in this resonance may occur due to the action of non-gravitational effects (NGEs). The action of the Yarkovsky effect may explain exit of an asteroid with a size of 5 km from the 2:1 MMR over a period about 1 billion of years or more. It takes tens of billions years for large bodies that were once there, to exit from the 2:1 gap, under the action of the Yarkovsky effect of today power.

To form the gap in the 2:1 resonance at the very beginning, the physical conditions for bodies in the asteroid belt had to be significantly different from the today ones. Most likely, the NGEs were influencing a much stronger on bodies in the asteroid belt in the early Solar system as compared with the today NGEs. In particular, the radiation of the Sun in the early Solar system could be much more intense, in comparison with the today one.

Key words: asteroids, resonances, Kirkwood gaps, Yarkovsky effect.