

НЕУСТОЙЧИВОСТ И ХАОС В СЛЪНЧЕВАТА СИСТЕМА

Стойчо Панчев^{*}

Феноменалният успех на Нютоновата динамика в макросвета и по-специално при приложението ѝ към проблемите на небесната механика, преди всичко към движението на небесните тела от Слънчевата система, утвърди схващането за безупречната подреденост и стабилност на тази система и на нейната предсказуемост за неограничен период от време в бъдеще. Пръв, който се усъмни в това преди един век, бе А. Поанкаре. Той не само се усъмни, но и доказа с известни до тогава и създадени от него средства от арсенала на класическата математика, че въпреки детерминистичния характер на Нютоновите уравнения на движение, тяхната нелинейност може да бъде източник на неустойчивост и в консервативни системи, каквато е Слънчевата, (а и всяка друга звездна или галактична система), да доведе до непериодично, силно нерегулярно, случайно подобно движение, което в съвременна терминология наричаме детерминистичен хаос. Самият Поанкаре е бил шокиран от този свой теоретичен резултат и не го развива по-нататък. Следва половин век на “затишие” по проблема, когато се развива сега наречената КАМ-теория (Колмогоров-Арнолд-Мозер) и се появяват компютрите, без които съвременните постижения в тази област са немислими.

Явлението, за което става дума, води началото си от задачата за 2-те тела с маси M_1 , M_2 в небесната механика, решена изчерпателно още от самия Нютон. Всяко от тях, Слънцето и Земята, Земята и Луната, двойните звезди и т.н. се движат по елиптични орбити около общия гравитационен център на системата. Добавянето само на едно (трето) тяло изменя коренно ситуацията. Задачата става аналитично нерешима. Ако обаче третото тяло е много по-малко по маса от другите две ($m_3 \ll M_1, M_2$), задачата се решава сравнително лесно. Резултатът е, че освен периодични и квазипериодични орбити са възможни и хаотични траектории на m_3 в реалната конфигурация на M_1 и M_2 .

Освен познавателно, в този резултат има и конкретно практическо значение. Слънчевата система “гъмжи” от множество малки тела в нея – астероиди, комети, а във втората половина на 20-ти

^{*} академик, Физ. факултет на СУ “Св. Кл. Охридски”

век и изкуствени спътници. Те са “прашинки” в сравнение с големите тела – Слънце, планети и техните естествени спътници. Следователно, движението на тези малки тела може да бъде описано със схемата $m_3 < M_1, M_2$. Нека например се интересуваме от изпращане на космически апарат до Луната. Едно от решенията е това да стане по елипсата на Хохман, която тангира до ниска околоземна стартова орбита на спътника и до такава около Луната. По този начин космонавтите на Аполо достигнаха до Луната за 3 дни. Възможно е обаче и друго решение, отчитащо хаотичността на траекторията на малкото тяло в реалната конфигурация Земя-Луна. “Неудобството е, че за такъв полет ще са нужни 10 000 години. Но хаотичните орбити са необикновено чувствителни към малки корекции. Така времето може да се намали до практически приемливи граници при големи икономии на гориво и увеличен товар. За превозване на товари за бъдещи строежи на Луната това е от значение, но за пътнически рейсове е неприемливо. Принципът за контрол над хаотичните траектории на малки небесни тела обаче е с обща приложимост и може да се използва например за предпазване на Земята от бъдещи космически катастрофи при опасност от сблъсквания с астероиди или комети.

Друг пример от този вид е астероидният пояс между Марс и Юпитер (над 4000 картотекирани), може би останки от планета на това място. Големи тела са Слънцето и Юпитер, а малките – астероидите. Съгласно теорията, при определени “резонансни” периоди T_A и T_J на обиколка около Слънцето са възможни неустойчиви орбити на малките тела, “внезапни” нараствания на ексцентрицитета на орбитите им и напускане на пояса. Точно това се наблюдава в разпределението на астероидите на този пояс. Подобно обяснение може да се даде и на “празнината на Касини” в знаменития пръстен на Сатурн. В тези примери имаме демонстрация на орбитален хаос на малки тела.

Що се отнася до самите планети и техните спътници и до Слънчевата система като цяло, то нещата са по-сложни. Още Поанкаре показва, че тя вероятно не е устойчива, макар че откакто съществува тя не дава реални признаци за това. Обаче най-нови числени експерименти с Нютоновите уравнения на движение показват, че начална грешка от 15 метра в определяне на положението на Земята върху орбитата ѝ след 10 милиона години ще нарасне на 150 m, а след 100 милиона години – на 150 милиона километра, т.е. колкото е разстоянието между Земята и Слънцето. За първия срок предсказуемостта е практически перфектна, а за втория - тотално компрометирана. Подобни резултати има и за други планети от

Слънчевата система. В това далечно бъдеще Земята пак ще обикаля около Слънцето между Венера и Марс, но сезоните ще бъдат календарно изместени, което едва ли е толкова важно.

Драматични последици биха настъпили ако хаосът се прояви в промяна на разстоянието на планетите, включително на Земята, до Слънцето или в друг астрономически параметър, от който зависи количеството на получаваната лъчиста енергия от Слънцето. При ограничена траектория (т.е. орбита) разстоянието може да се промени поради нерегулярни промени в ексцентрицитета (l) на орбитите - от почти кръгови ($l \rightarrow 0$) до силно сплеснати ($l \rightarrow 1$) и обратно. При големите планети (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) такова нещо се смята за невъзможно, но при малките (Земя, Марс, Венера) е възможно за срок от порядъка на възрастта им. Теоретически Марс може да “срещне” Земята, а Меркурий – Венера или да “изпадне” от Слънчевата система.

Друг параметър, който може да се намира в хаотичен режим, е наклонът Θ на собствените оси на въртене на планетите спрямо орбиталните им равнини (които почти съвпадат с равнината, в която самата Слънчева система лежи). В сегашната епоха Θ има следните стойности: Меркурий – 0° , Венера – 178° , Земя – $23,44^\circ$, Марс – $23,98^\circ$, Юпитер – $3,12^\circ$, Сатурн – $26,73^\circ$, Нептун – $29,56^\circ$, Уран – $97,86^\circ$, Плутон – 50° . Бавните промени на Θ , наречени прецесия, са добре известни. За Земята тя е с период 26 000 г., а хаотични такива са невъзможни поради стабилизиращата роля на Луната. Ако я нямаше прецесията, тя би имала период 75 000 г., а Θ щеше да се колебае и хаотично от 0° до 90° . Такава е ситуацията с Марс. Меркурий сега е в регулярен режим на Θ , но в миналото е попадал в хаотичен. Най-загадъчна е Венера с $\Theta = 178^\circ$ и обратно на другите планети околоосно въртене. Смята се, че това е свързано с хаотичност в миналото ѝ.

Промените на Θ (прецесионни и хаотични) са важни, защото от тях зависи географското разпределение на лъчистата слънчева енергия, постъпваща към планетата, в частност Земята. Това определя климата и условията за евентуално възникване и еволюция на живот върху планетата. В това отношение Земята е уникална вероятно не само в границите на Слънчевата система.

Има още едно явление, което трябваше да се има предвид наред с коментираните до тук. Това е така нареченото инерционно движение на Слънцето около центъра на масите на Слънчевата система. То се дължи на променливото положение на планетите в нея и преди всичко

на най-големите (Юпитер и Сатурн), на които се пада 93 % от масата на цялата планетна система. Областта, в която Слънцето осъществява това движение, е с размер 4,4 слънчеви радиуса - почти колкото разликата между най-голямото и най-малкото разстояние от Земята до Слънцето при обиколката ѝ по елиптичната орбита. Както се вижда, това представлява истинска задача за 3 тела. Решена числено относно движението на Слънцето, се получава интересен резултат:

Епохи на регулярни траектории се редуват с епохи на хаотични. Първите траят около 50 г., а вторите - около 180 г. заедно с преходния период, т.е. напълно обозрими. Нещо повече, забелязва се корелация на инерционното движение на Слънцето с неговата активност – висока в епохите на регулярност и ниска в тези на хаотичност (напр. минимумът на Маундер). Ако това е причинно-следствена връзка, тя би могла да има прогностично значение. Последната епоха на регулярност е 1910-1960 г. Сега, до 2040 г., се намираме в епоха на хаотичност. Според някои автори вулканичната дейност на Земята и климатът също реагират (пряко или косвено) на този вид движение на Слънцето, което между другото води до вариации с около 0,1 % на изпращаната към Земята лъчиста енергия. По такъв начин земни явления се оказват свързани не само с Луната, но и с най-големите планети на Слънчевата система.

Но най-интересният пример за хаотично поведение на голямо небесно тяло от Слънчевата система, наблюдавано сега, в реално време, е спътникът Хиперион на планетата Сатурн. Той обикаля около нея за 21 денонощия по орбита с необичайно голям ексцентрицитет ($e \approx 0,1$). По своята орбита той изпитва ротационен хаос – за няколко обиколки скоростта на въртене и наклонът на оста му претърпяват значителни промени (хаотичен “танц”). Причина за това е силно асферичната му форма. По данни на Voyager-2 размерите му са 190/145/114 km с ± 15 km грешка. Този факт е много важен, защото води до това, че трите главни оси на инерционния елипсоид на спътника са различни. Но както е известно от механиката на твърдите тела, въртенето около дългата и късата ос е устойчиво, а около средната – неустойчиво. Периодът на въртене на спътника около оста му е 13 денонощия и не е синхронизиран с периода на въртене около Сатурн, какъвто например е случаят с нашата Луна (резонанс 1:1). Хиперион е твърде далече от Сатурн и слабо усеща приливното му влияние, а освен това е в орбитален резонанс 4:3 с Титан, също спътник на Сатурн. Поради това орбитата му не може да намали ексцентрицитета си и да се доближи до кръгова с течение на времето,

както е нормално. Тогава и хаосът в поведението му би изчезнал. За това Хиперион е уникален пример в наше време за голямо тяло от Слънчевата система с регулярна орбита и хаотично въртене. То бе предсказано теоретично, а данните от Voyager-2 го потвърдиха.

Хиперион обаче не е единствен спътник в Слънчевата система с неправилна форма. Такива са и спътниците Фобос и Деймос на Марс. Сега тяхното поведение е регулярно, но съгласно числените модели, в миналото Деймос е прекарал 100 милиона, а Фобос 10 милиона години в състояние на ротационен хаос. Същото се предполага и за по-малката луна на планетата Нептун, наречена Нереида.

Признаци за хаотично поведение в наше време се забелязват засега само при най-външната планета Плутон. Орбитата му се пресича с тази на Нептун, но сблъскване е изключено поради специфично синхронизиране на движенията им. Други характеристики според възможните сега наблюдения имат твърде нерегулярни изменения с времето, обаче тестовете за хаос не водят до определено заключение. Ако нови наблюдения покажат, че тази планета е в хаотичен режим, това ще промени сегашната представа в това отношение за останалите планети, независимо че Плутон е малка планета. Това, разбира се, не означава, че “още утре” планетите ще започнат да се блъскат една с друга. По принцип хаотичното поведение е ограничено и означава преди всичко непредсказуемост.

Космически хаос присъства и е присъствал навсякъде в Слънчевата система, особено в историята на вътрешните ѝ планети. Изобщо организацията на планетната система е силно свързана с хаотичната ѝ еволюция. Сега обаче резонансите и гравитационно-приливни връзки между тях водят до това, че Слънчевата система като цяло може да се разглежда като практически устойчива във времеви мащаби от порядъка на възрастта ѝ – 5 милиарда години.

Следователно, няма основание за тревога!

