

Приливи и отливи

Подслушан разговор на плажа между баща, който явно е учил някога физика, и син:

– “Защо има приливи?”

– Защото Луната привлича водата.

– А силата, с която я привлича Слънцето?”

– Тя е много по-малка, защото Слънцето е много по-далече от Земята.”

Приливите и отливите са наистина едно от впечатляващите природни явления, каквито са небесната дъга, мълниците, северните сияния и т.н. Затова, въпреки че у нас те не се наблюдават, мнозина са чели или чували за тях, така че стремежът да бъдат обяснени в училище е естествен (особено сред географите, които, според мен, никога не са го правили успешно). И, въпреки че обяснението не е предвидено (между впрочем – правилно) като елемент на общообразователния минимум по физика, ние трябва да сме готови да задоволим в това отношение любопитството на всяко дете, което прояви интерес към този въпрос.

Цитираният диалог е типичен, но по същество – неверен. И ето защо. На въпроса “Коя е причината Луната да обикаля около Земята?” отговорът “Силата, с която Земята я привлича.” може да се смята достатъчен, но привличането на водата към Луната не може да се смята за вярна (или най-малкото – за изчерпателна) причина за приливите и отливите. Не, че това привличане няма отношение към обяснение на явлението, но то не е достатъчно. Не е достатъчно, защото предполага, че когато на обърнатата към Луната земна половина има прилив, на обратната страна трябва да има отлив: елементарното съждение е, че водата, като лесно подвижна, под влияние на привличането се “стича” от по-далечната страна на Земята и се натрупва на по-близката до Луната половина.

Съждението изглежда логично, но, за беда, противоречи на действителността: оказва се, че когато на дадено място има прилив, в същия момент има прилив (а не отлив!) и на диаметрално противоположната точка от земното кълбо. Разбира се, отделният човек не може да установи наличието на две приливни вълни, защото не може да бъде едновременно на две места, но съвкупността от всички наблюдения показва, че това е точно така.

Има обаче и друг, в известен смисъл по-прост факт, който вече е достъпен за всеки наблюдател, и който не се обяснява с елементарното “привличане на водата от Луната”. Това е фактът, че на всяко място, на което се наблюдават приливи и отливи, в едно денонощие приливите са **два**. А нали над дадено място Луната се появява в небосклона само веднъж на денонощие?!

Малко по-сложен анализ изисква вторият въпрос в диалога. Наистина ли силата, с която Слънцето привлича водните маси на океаните, е много по-малка от силата, с която ги привлича Луната? Вярно е, че в сравнение с Луната, Слънцето е много по-далеч от Земята, но затова пък масата му е много по-голяма. За да проверим достоверността на втория отговор, трябва да използваме данни за масите на Слънцето и Луната, за съответните разстояния до Земята, както и закона на Нютон за гравитацията.

Известно е, че разстоянието $r_{Сл.}$ от Земята до Слънцето е около 390 пъти по-голямо от разстоянието $r_{Л.}$ от Земята до Луната. В същото време масата $M_{Сл.}$ на Слънцето е 27 000 000 пъти по-голямо от масата $M_{Л.}$ на Луната.

Като имаме предвид тези връзки, нека пресметнем отношението между гравитационната сила $F_{Сл.}$, с която Слънцето привлича едно земно тяло с маса m , и силата $F_{Л.}$, с която Луната привлича същото тяло. Като използваме традиционното означение G за гравитационната константа и закона на Нютон за гравитацията, за въпросното отношение получаваме:

$$\frac{F_{\text{Сл.}}}{F_{\text{Л.}}} = \frac{G \frac{mM_{\text{Сл.}}}{r_{\text{Сл.}}^2}}{G \frac{mM_{\text{Л.}}}{r_{\text{Л.}}^2}} = \frac{M_{\text{Сл.}}}{M_{\text{Л.}}} \left(\frac{r_{\text{Л.}}}{r_{\text{Сл.}}} \right)^2 = \frac{27000000}{390^2} \approx 180.$$

И така, оказва се, че вторият отговор на бащата е абсолютно погрешен: силата, с която Слънцето привлича телата върху Земята, не само не е по-малка – тя е около 180 пъти по-голяма от силата, с която ги привлича Луната. Защо тогава като причина за приливите и отливите сочим Луната, а не Слънцето?

Виждаме, че както при първия въпрос, и при втория наличието на самата гравитационна сила не обяснява явлението. Нещо повече – нейното самостоятелно отчитане води до парадокс, защото наблюдателен факт е, че приливите наистина са свързани с положението преди всичко на Луната, а не толкова на Слънцето. Така, че отново остава основният проблем – проблемът за истинската причина за приливите и отливите.

Качествен отговор. Ако трябва просто да назовем причината, нейното име е **нехомогенността (нееднородността) на гравитационното поле**. По-точно – нехомогенността на гравитационното поле на Луната и нехомогенността на гравитационното поле на Слънцето. Ако не желаем да използваме полевата терминология, а предпочитаме да говорим за сили, трябва да кажем: *причина за приливите и отливите е не самата гравитационна сила, а разликата между големините на силите, с които Луната (или Слънцето) привлича намиращите се в различни точки от земната повърхност тела.*

И двата начина за изказване, за назоваване на причината са верни, но те не обясняват *механизма* на явлението. А този механизъм може да бъде изяснен по различни начини, които могат да се намерят в литературата (поне два от тях се намират в старите годишници на сп. Физика¹). Аз ще изложа това обяснение, което за мен изглежда най-естествено и лесноразбираемо, макар да знам, че мнозина го смятат недостатъчно ясно и убедително.

Да започнем с това, че всяко движение на тяло по ограничена траектория около гравитационен център може да се разглежда като **падане** с определено ускорение. Падането наричаме свободно, когато движението е без начална скорост. Падането може да бъде с постоянно ускорение (ако се извършва в близост до земната повърхност) или по-сложно – ако промените в разстоянието до гравитационния център не могат да бъдат пренебрегнати. Движенията на изкуствените спътници около Земята могат да се разглеждат като едно безкрайно във времето падане, движението на Земята около Слънцето също представлява своеобразно падане към него и т.н.

От тази гледна точка, ако се поставим на мястото на един стъпил на Луната наблюдател, движението на Земята около нея може да се уподоби също на едно безкрайно падане, падане под влияние на силите, с които Луната привлича земните тела. И на това място трябва да съобразим, че различните тела по земната повърхност се намират на различни разстояния до Луната (или по-точно – до центъра на Луната). Това е следствие от факта, че диаметърът на Земята (12 000 km) не е пренебрежимо малък спрямо средното разстояние до Луната (380 000 km):

$$\frac{12800}{380000} \approx 0,034.$$

Разликата е повече от 3 %, което означава, че гравитационната сила, с която Луната привлича едно тяло, разположено в най-близката до Луната точка от земната

¹ Вж. напр. моята статия “За праха в орбиталните станции и океанските приливи” в кн. 5 на списанието от 1994 г.

повърхност, ще бъде забележимо (колко – ще видим по-долу) по-голяма, отколкото ако тялото се намира в диаметрално противоположната точка от земното кълбо – тази разлика в големините на силите представлява всъщност резултатът от **нехомогенността** на лунното гравитационно поле.

Да разгледаме сега три тела, лежащи върху един земен диаметър, чието продължение минава през центъра на Луната: две от тях върху земната повърхност, а третото – в центъра на Земята. По силата на гореказаното за силите можем да заключим, че най-близкото до Луната тяло би трябвало да “пада” към нея с най-голямо ускорение, най-далечното – с най-малко ускорение, а това, което е в центъра на Земята “пада” с някакво средно ускорение. Заради тази разлика в ускоренията най-близкото до Луната тяло би избързвало в падането си спрямо тялото от центъра на Земята, т.е. то би се отдалечило от центъра на Земята. В същото време най-далечното тяло, обратно, би изостанало в “падането си” в сравнение централното тяло, а това означава, че и то би се отдалечило от центъра на Земята.

Накрая, вместо за какви да е тела, нека говорим за това, което ни интересува – за водни маси, които се отличават със свойството, че могат да текат. Океанските води на обрънатата към Луната земна половина “падат” към Луната с по-голямо ускорение, отколкото земното ядро, те избързват спрямо него и затова в тази половина на Земята се наблюдава прилив. Водите от противоположната половина на Земята обратно – изостават спрямо земното ядро в “падането” си към Луната. Ето защо и там се наблюдава повдигане на водното равнище, но в посока, обратна на посоката в “лицевата” половина на Земята. Точно това е един от начините за обяснение на наличието едновременно на две приливни вълни върху земната повърхност.

Друг начин за обяснение може да се намери в статията на Ева Божурова², в която обаче съществено се използва понятието инерчна сила, което излиза извън рамките на учебните програми за общообразователния минимум.

На същото качествено равнище можем да търсим обяснение и на факта, че за приливите и отливите “виним” Луната, а не Слънцето, въпреки че гравитационното привличане към Слънцето е почти 200 пъти по-голямо, отколкото към Луната. Причината този път наистина е огромното разстояние до Слънцето. Тъй като то е от порядъка на 150 000 000 km, в този случай относителната разлика между разстоянията до Слънцето на най-далечната и най-близката до него точки от земната повърхност е само

$$\frac{12800}{150000000} \approx 0,000085$$

– една наистина нищожно малка величина. Това означава, че върху земната орбита нехомогенността на гравитационното поле на Слънцето е много по-малка, отколкото нехомогенността на полето на Луната.

По-нагледна представа за нехомогенността на полетата може да получим, като използваме езика на силовите линии. Знаем, че хомогенно поле означава първо, успоредни силови линии и, второ, еднакво гъсто разположени линии. Силовите линии на полето (гравитационно, електростатично и т.н.) на точков източник са лъчи, излизащи от (или влизащи в) източника и равномерно разпределени във всички посоки на пространството. Ако разглеждаме полето в една *фиксирана* и *ограничена* пространствена област (в нашия случай роля на такава област играе земното кълбо), характерът на полето зависи от разстоянието между областта и източника: колкото по-далече от източника е областта, толкова по-малки ъгли ще сключват помежду си силовите линии, *които я пробождат*, а също така толкова по-малка ще бъде разликата

² Божурова Е. “Приливни взаимодействия между космическите тела”, Физика, 2, 2003.

в гъстотата на линиите при влизане и при излизане от областта. Това означава, че колкото по-далече е областта от източника, с толкова по-добро приближение можем да смятаме полето в нея за хомогенно.

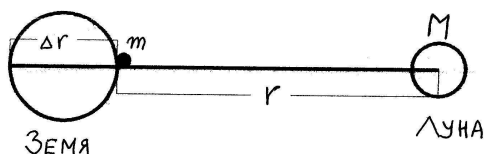
В светлината на току що казаното гравитационното поле на Слънцето в рамките на Земята е много по-хомогенно, отколкото полето на разположената относително близо Луна. Дали обаче това е достатъчно, за да твърдим, че приливите, причинени от Слънцето, са много по-слаби от тези, които предизвиква Луната? Към подобно предположение ни насочва полученото по-горе нищожно малко отношение 0,000085. На поставения въпрос не можем да отговорим, докато не преминем от качествено на количествено равнище, защото, както видяхме в началото, заради огромната маса на Слънцето, съотношението между самите полета е обратното – гравитационното поле на Слънцето има почти 200 пъти по-голям интензитет.

Количествено разглеждане. За да спазим все пак традицията, нека формулираме разглеждания проблем във вид на задача.

Задача. Сравнете разликата между гравитационните сили, които действат на едно тяло, когато то се намира в диаметрално противоположни спрямо Луната точки от земната повърхност, и разликата между силите, действащи на тялото, когато се намира в диаметрално противоположни спрямо Слънцето точки от земната повърхност.

Решение. На тяло с маса m , намиращо се на разстояние r от тяло с маса M (фиг. 1), действа гравитационна сила с големина:

$$(1) \quad F = G \frac{mM}{r^2}.$$



Фиг. 1.

Ако увеличим разстоянието с Δr , силата намалява и става равна на:

$$(2) \quad F' = G \frac{mM}{(r + \Delta r)^2}.$$

Нека е изпълнено неравенството $\Delta r \ll r$ и преобразуваме дясната страна на (2) така, че да изразим F' чрез F :

$$F' = G \frac{mM}{r^2 \left(1 + \frac{\Delta r}{r}\right)^2} = \frac{F}{1 + 2\frac{\Delta r}{r} + \left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2} \approx \frac{F}{1 + 2\frac{\Delta r}{r}}.$$

Тук, при последното преобразование в знаменателя, сме пренебрегнали събираемото

$\left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2$ спрямо единицата, тъй като то е квадрат на малка величина. По-нататък за

преобразуване на оставащата дроб използваме формулата за сума на безкрайна геометрична прогресия:

$$\frac{1}{1 + \varepsilon} = 1 - \varepsilon + \varepsilon^2 - \varepsilon^3 + \dots \quad (\text{за } |\varepsilon| < 1).$$

Тъй като в нашия случай $\varepsilon = 2\frac{\Delta r}{r} \ll 1$, отново пренебрегваме членовете със степени, по-висока от 1 и получаваме:

$$F' \approx F \left(1 - 2 \frac{\Delta r}{r} \right),$$

или, тъй като ни интересува разликата от двете сили:

$$(3) \quad \Delta F = F - F' = 2 \frac{\Delta r}{r} F.$$

И в двата разглеждани случая $\Delta r = 12800$ km е диаметърът на Земята, а търсим отношението между разликата $\Delta F_{\text{Л.}}$, дължаща се на привличането от Луната, и разликата $\Delta F_{\text{Сл.}}$, дължаща се на привличането от Слънцето. С помощта на формула (3) за това отношение намираме:

$$(4) \quad \frac{\Delta F_{\text{Л.}}}{\Delta F_{\text{Сл.}}} = \frac{2 \frac{\Delta r}{r_{\text{Л.}}} F_{\text{Л.}}}{2 \frac{\Delta r}{r_{\text{Сл.}}} F_{\text{Сл.}}} = \frac{F_{\text{Л.}} \cdot r_{\text{Сл.}}}{F_{\text{Сл.}} \cdot r_{\text{Л.}}} \approx \frac{390}{180} \approx 2,2,$$

като за отношенията на двете сили и на двете разстояния сме използвали стойностите, посочени в началото.

И така, вижда се, че наистина силите, предизвикващи приливи и дължащи се на Луната, са над два пъти по-големи от тези, дължащи се на Слънцето. Или с други думи: лунните приливи са повече от два пъти по-големи от слънчевите.

Коментар. Разбира се въпросите, свързани с приливите и отливите са и многобройни, и значително по-сложни, отколкото ги представихме по-горе. Един от неразгледаните проблеми е например защо максимумът на един прилив в даден момент не се намира в точката от земната повърхност, която е най-близо до Луната. Друг е въпросът за влиянието на приливите и отливите върху периода на околоосното въртене на Земята и т.н. Тяхното разглеждане читателят може да намери в по-сериозните учебници по физика.

Не бива да се мисли, че щом в България не можем да наблюдаваме приливи и отливи, няма и смисъл да се занимаваме с тяхното обяснение. Оказва се, че наличието на тези явления се отчита в най-неочаквани области, за което свидетелстват следните два примера.

Съществува хипотеза, че наличието на приливи и отливи е играло ако не решаваща, то поне ускоряваща роля за възникване на живота върху земната суша. Наистина, известно е, че преди милиарди години животът на Земята се заражда в океаните, където протичат началните етапи на еволюцията на живите организми. Някои организми, обитаващи прибрежните води, понякога оставали на сухо и загивали, когато при отлив водата се оттегля навътре в океана. Така – докато по пътя на еволюцията не започнали да се появяват приспособления, позволяващи им да дочакат успешно във въздуха следващия прилив и да попаднат отново в естествената си среда. По-нататъшната еволюция на тези приспособления позволила на част от организмите изобщо да продължат живота си постоянно на сушата, във въздушна среда.

Вторият пример е свързан с функционирането на големите ускорители на елементарни частици. Така например, пръстенът на големия електрон–позитронен ускорител LEP, чиито диаметър е 8,5 km, се деформира от приливно–отливните сили с около 2 mm при всеки лунен цикъл. Макар и малка спрямо общия размер, тази деформация не е пренебрежима и учените коригират по подходящ начин ускоряващите полета.

Може би за учениците ще бъде любопитно и да научат, че същите сили са причина вътре в изкуствените спътници на Земята прахът да се отлага не само по “пода”, т.е. в точките, най-близки до Земята, но и в противоположно разположените – по “тавана”. Ето защо на шеговития въпрос “Как учен, затворен в модул от

Международната космическа станция без илюминатори, може да разбере дали модулет е неподвижен на Земята, или лети в Космоса?” един от възможните отговори е: “Като наблюдава къде се събира прахът в модула – само по пода, или както по пода, така и по тавана.”

Допълнителен въпрос. Има един въпрос, който няма отношение към приливно-отливните явления на Земята, но също е свързан с гравитационните сили, свързващи Слънцето, Земята и Луната.

Ще използваме въведените до тук означения. Тъй като разстоянието Луна–Земя е малко спрямо разстоянието Земя–Слънце, по-долу ще смятаме, че и Луната отстои от Слънцето на разстояние $r_{Сл.}$. Тогава за силите, с които Слънцето и Земята привличат Луната, можем да запишем:

$$F_{Сл.} = G \frac{M_{Л.} M_{Сл.}}{r_{Сл.}^2} \quad \text{и} \quad F_{З.} = G \frac{M_{Л.} M_{З.}}{r_{Л.}^2}$$

Като вземем предвид, че масата на Слънцето е 330 000 пъти по-голяма от масата на Земята, а Слънцето е 390 пъти по-далеч от Луната, отколкото Земята, за отношението на двете сили намираме:

$$\frac{F_{Сл.}}{F_{З.}} = \frac{M_{Сл.}}{M_{З.}} \left(\frac{r_{З.}}{r_{Сл.}} \right)^2 = \frac{330000}{390^2} \approx 2,2.$$

И така, Слънцето привлича Луната със сила, над два пъти по-голяма от силата, с която я привлича Земята³. Това заключение може да поради следния въпрос. Щом силата, с която Слънцето привлича Луната е по-голяма от силата, с която я привлича Земята, защо Луната обикаля около Земята, а не около Слънцето?

Въпросът е подвеждащ, защото в него не отчитаме, че заедно със Земята, “придружавайки”, така да се каже, Земята, и Луната обикаля около Слънцето. На фиг. 2 е показано Слънцето, част от траекториите на Земята и на Луната и техните примерни положения в рамките на един месец (така, както би ги видял един наблюдател, неподвижен спрямо Слънцето). В случая за опростяване смятаме, че орбитите на Земята и Луната лежат в една равнина. Тъй като за година Луната обикаля Земята



Фиг. 2.

приблизително 13 пъти, по целогодишната траектория на Земята ще се нанесат около 13 “вълнички”, подобни на изобразената. Фигурата ясно показва, че Луната наистина обикаля около Слънцето⁴. Разбира се, на фигурата не са спазени мащабите нито по отношение на размерите на небесните тела, нито по отношение на разстоянията между

³ Съвпадението на числената стойност на това отношение с полученото по формула (4) е чисто случайно. Че това е така можем да съобразим ако не от другаде, то поне от факта, че отношението във формула (4) не зависи от масата на Земята, докато току що полученото – зависи.

⁴ За да бъдем по-прецизни, би трябвало да кажем, че по гладката крива (частта от елипса) се движи не центърът на Земята, а общият център на масите на системата Земя–Луна. Това означава, че и по траекторията на Земята има “вълнички”, но, поради значителната разлика между масите на Земята и на Луната, тяхната амплитуда е по-малка от амплитудата на лунните “вълнички”.

тях. При спазване на тези мащаби “вълничките” на траекторията на Луната биха били незабележими.

Факти относно приливните вълни

- Амплитудата на приливните вълни далеч от бреговете, в дълбокия океан, е около 1 m.
- Прибрежните вълни могат да бъдат повече от 10 пъти по-големи от тези в средата на океана.
- Амплитудата на приливните вълни в земната кора е около 20 cm.
- Гравитационната сила, с която Слънцето привлича Земята, е 178 пъти по-голяма от силата, с която Луната привлича Земята.
- Отношението между приливните сили, действащи върху Земята от страна на Слънцето и от страна на Луната, е 0,465.
- Приливните сили предизвикват промени във височината на човешкото тяло, които са 10^{-16} част от тази височина, т.е. около 1000 пъти по-малки от диаметъра на един атом. За сравнение, промяната, предизвикана от собственото тегло на тялото, е 10^{-2} част от височината му.
- Триенето между земните пластове, предизвикано от приливните вълни, удължава денонощието с 1,6 милисекунди на столетие.
- Ъгловата скорост на околоосното въртене на Земята е $7,29 \cdot 10^{-5}$ rad/s.
- Ъгловата скорост на Луната при обикаляне около Земята е $2,67 \cdot 10^{-6}$ rad/s.
- Полярният диаметър на Земята е 12 710 km, екваториалният – 12 756 km, а разликата им – 46 km.
- Разликата между двата радиуса е 23 km, т.е. 0,4 % от стойността им.
- Центробежното ускорение върху земната повърхност, дължащо се на денонощното въртене на Земята, е $0,034 \text{ m/s}^2$.
- Центробежното ускорение върху земната повърхност, дължащо се на обикалянето на Земята около центъра на масите на системата Земя – Луна, е $3,3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$.

(Тези факти са взети от интернет-страницата на Доналд Симанек - <http://www.lhup.edu/~dsimanek/home.htm>.)