

**POR QUE A LUA NÃO CAI NA TERRA?
¿POR QUÉ LA LUNA NO CAE EN LA TIERRA?
WHY DOES THE MOON NOT DROP ON EARTH?**

Domingos Savio de Lima Soares *
dsoares@fisica.ufmg.br

* Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - Brasil

Resumo

O presente artigo apresenta uma parte do estudo de Newton sobre a gravitação envolvendo a questão de por que a Lua não cai na Terra, além de analisar alguns aspectos do Projeto Apollo para a Lua nas décadas de 1960 e 1970 e da exobiologia e exoecologia.

PALAVRAS CHAVE: Lua, Gravidade, Projeto Apollo.

Resumen

Este artículo presenta una parte del estudio de gravitación de Newton que involucra la pregunta de por qué la Luna no cae sobre la Tierra, además de analizar algunos aspectos del Proyecto Apollo a la Luna en los años sesenta y setenta e de la exobiología e exoecología.

PALABRAS CLAVE: Luna, Gravidad, Proyecto Apollo.

Abstract

The present paper shows partially a Newtonian study on gravitation involving the question why the Moon do not fall down on the Earth. Some aspects of the flights to the Moon by the Apollo's Project in the 60's and 70's years and about the exobiology and exoecology will be analyzed.

KEYWORDS: Moon, Gravity, Apollo's Project.

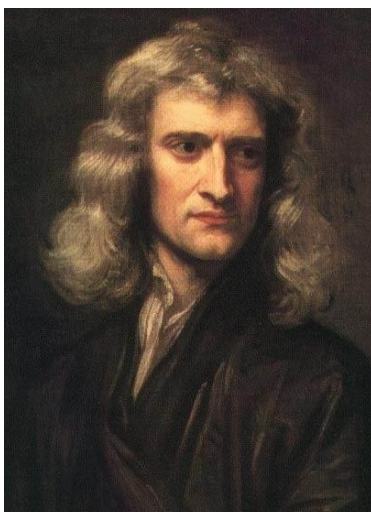
I. Introdução

-Cair ou não cair, eis a questão...

Bom, na verdade a Lua cai... Mas ela faz isto na medida certa, de tal forma que nunca atinge o solo. Quer dizer —, então ela não cai!

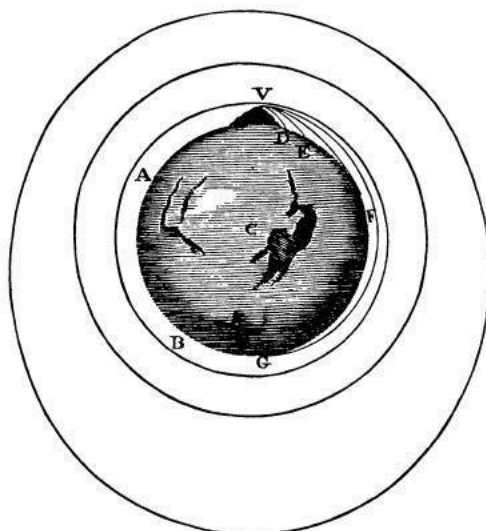
O melhor que temos a fazer é consultar o grande sábio inglês Isaac Newton (1643-1727 – Figura 1). No Livro III (NEWTON, 2008) de sua grande obra de 1687 "Princípios Matemáticos da Filosofia Natural", ele discute a questão da permanência dos planetas em determinadas órbitas em torno do Sol. A força que mantém um planeta em órbita é denominada "força centrípeta", que, por sua vez, significa "força dirigida para o centro". Este centro é exatamente onde está localizado o Sol. No caso da Lua, a força centrípeta que atua sobre ela está dirigida para o centro da Terra (Figura 2).

Figura1. Retrato de Isaac Newton (1643-1727).



Fonte: Godfrey Kneller em 1689(Crédito: Domínio Público).

Figura2. Esta figura é apresentada no Livro III da obra de Isaac Newton denominada "Princípios Matemáticos da Filosofia



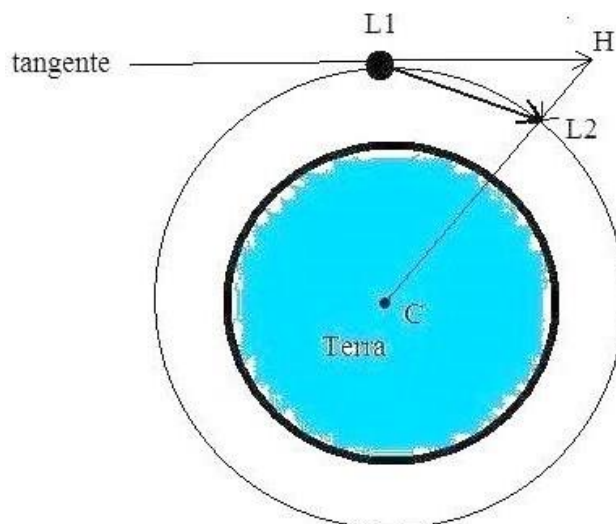
Natural". Pedras são lançadas do alto de uma montanha com velocidades cada vez maiores, até que uma delas entra em órbita da Terra e, portanto, não atinge mais o solo.

Fonte: Domínio público.

O que diz Newton? Em sua linguagem um tanto formal, apropriada para um texto científico, ele afirma: — Que por intermédio das forças centrípetas os planetas são mantidos em certas órbitas, podemos facilmente entender, se considerarmos os movimentos dos projéteis; pois uma pedra arremessada [do alto de uma montanha] é forçada pela ação de seu próprio peso para fora de uma trajetória retilínea — a qual ela descreveria devido apenas ao arremesso inicial —, e impelida a descrever uma linha curva no ar; e através desta forma arqueada é finalmente trazida para baixo, ao chão; e quanto maior é a velocidade com que ela é arremessada, tanto maior é a distância que ela percorre antes de cair na Terra. Podemos portanto supor a velocidade de tal maneira aumentada que ela descreveria arcos de 1, 2, 5, 10, 100, 1000 milhas antes de atingir a Terra, até que, finalmente, excedendo os limites da Terra, ela passaria ao espaço, sem tocá-la|| (figura 2).

Estas são as palavras do grande acadêmico de Cambridge! Podemos aplicar o seu brilhante raciocínio ao movimento da Lua em torno da Terra. Vemos então que ao mesmo tempo que a Lua cai em direção ao centro da Terra ela simultaneamente move-se na direção transversal. E faz isto na medida certa de tal forma a manter-se sempre acima da superfície. Ou seja, de forma a manter-se em órbita da Terra.

Figura 3. Movimento da Lua ao redor da Terra.



Fonte: Acervo do autor.

A Lua se movimenta de L1 para L2 (figura 3). Simultaneamente ao movimento tangencial L1-H ela realiza o movimento centrípeto H-L2 e assim progressivamente descreve uma órbita ao redor da Terra, sem atingir a sua superfície. Em outras palavras, ela não "cai" na Terra.

Para terminar, uma bela imagem da Terra e da Lua juntas, vistas da superfície lunar pelos astronautas da Apollo 11.

Figura 4. A Terra crescente (foto da Apollo 11)



Fonte: Mailer (2019, p. 274).

A tripulação da Apollo 8 foi a primeira a registrar esta vista da Terra, a aproximadamente 5 graus acima do horizonte lunar, no dia 22 de dezembro de 1968.

2. Quedas na Lua: “um pequeno tombo para um homem ...”

O programa de TV a cabo, da GloboNews, *Espaço Aberto – Ciência e Tecnologia*, exibiu, no dia 08 de agosto de 2011, uma entrevista com o ex-astronauta Eugene Cernan, o qual, entre outras missões, comandou, em dezembro de 1972, a última missão tripulada à Lua, a Apollo 17. Ficou conhecido como *o último homem na Lua*, pois foi o último a entrar no módulo lunar ao final da missão.

Os entrevistadores foram três meninos e uma menina e a entrevista durou pouco mais de 20 minutos. A missão Apollo 17 foi a última a levar astronautas à superfície da Lua. A missão durou 3 dias na Lua, e ocorreu em dezembro de 1972, há quase 40 anos.

Figura 5. Eugene Andrew Cernan, engenheiro e astronauta, nasceu no dia 14 de março de 1934 e faleceu no dia 16 de janeiro de 2017 aos 82 anos.



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Eugene_Cernan

Um dos meninos entrevistadores, Daniel Turela Rodrigues (14 anos), fez a seguinte pergunta:

— *Como foi o momento em que o Sr. caiu na Lua, levou um tombo?||*

Eugene Cernan comentou que o peso de qualquer coisa na Lua é 1/6 do peso na Terra, e isto facilitava os saltos na sua superfície. Então, a maneira mais eficiente de se movimentar era dando pulinhos, como coelhos. Por outro lado, quando havia a necessidade de se parar, ou de se fazer uma curva, a dificuldade era grande e muitas vezes eles sofriam pequenas quedas.

Os tombos na Lua colocam em evidência três leis importantíssimas da **mecânica newtoniana**: lei da gravitação universal, 1ª e 2ª leis do movimento. A lei da gravitação universal explica porque o peso na superfície da Lua é igual a um sexto do peso na superfície da Terra. Com o auxílio desta lei, podemos expressar matematicamente esta afirmação escrevendo

$$\frac{GM_{\text{Lua}}}{R_{\text{Lua}}^2} = \frac{1}{6} \frac{GM_{\text{Terra}}}{R_{\text{Terra}}^2}$$

onde, G é a constante da gravitação universal, os M s representam as massas ($7,349 \times 10^{22}$ kg e $5,9736 \times 10^{24}$ kg) e os R s representam os raios (1.737,4 km e 6.378,1 km) da Lua e da Terra, respectivamente. $GM_{\text{Lua}}/R_{\text{Lua}}^2$ é uma constante chamada *aceleração gravitacional na Lua* (g_{Lua}).

Da mesma forma, $GM_{\text{Terra}}/R_{\text{Terra}}^2$ é uma constante chamada *aceleração gravitacional na Terra* ($g_{\text{Terra}} \approx 9.8 \text{ m/s}^2$). De acordo com a lei da gravitação universal, um corpo de massa m possui o peso mg_{Lua} na superfície da Lua e mg_{Terra} na Terra, portanto, $mg_{\text{Lua}} = 1/6 mg_{\text{Terra}}$ porque $g_{\text{Lua}} = 1/6 g_{\text{Terra}}$.

A 1ª lei é a famosa *lei da inércia*, e ela diz que todo corpo permanece em repouso ou em movimento retilíneo uniforme desde que não haja forças atuando sobre ele. Para mudar o estado de movimento, a 2ª lei nos diz que é necessária uma força proporcional à mudança desejada - ou seja, à aceleração multiplicada pela *massa* do corpo, que é uma medida de sua inércia. A inércia é a propriedade que todos os corpos têm de resistir a uma mudança em seu estado de repouso ou movimento.

Ora, o peso na Lua é 1/6 do peso na Terra, mas a massa não muda! Em outras palavras, a inércia de um corpo não muda. E note que Eugene Cernan usava um equipamento de quase 100 kg! Somando tudo, ele *-carregava* uma inércia de quase 180 kg! A sua própria massa - cerca de 80 kg - mais a massa de seu macacão e equipamento, que como foi dito era de quase 100 kg. Ao tentar parar ou fazer uma pequena curva ele precisava de ter força muscular para parar 180 kg, ou para fazer com que 180 kg de massa realizassem uma pequena curva! Acrescente-se o fato de que a sua velocidade muitas vezes era grande e, portanto, a aceleração necessária para uma parada súbita ou fazer uma curva rápida deveria ser grande também. A força requerida também é grande porque ela é igual a *massa vezes aceleração*, como vimos.

Qual é a melhor estratégia para não se cair? A massa não pode ser mudada, logo devemos mudar a aceleração. Eugene Cernan e seu companheiro deveriam parar *lentamente* e fazer curvas de *baixa velocidade* (lembrar que as coisas ficam ainda mais complicadas numa curva, pois a aceleração é proporcional ao *quadrado* da velocidade).

O astronauta chamou também a atenção para o centro de gravidade alto, em relação ao chão, do conjunto astronauta, vestimenta e equipamento. Especialmente nas curvas, isto aumenta consideravelmente a instabilidade provocando quedas. E podemos adicionar: as muitas irregularidades do terreno e a pouca flexibilidade da vestimenta e equipamento do astronauta. Todos estes fatores, mais o jogo implacável entre peso e massa (inércia), discutido acima, foram os causadores das inúmeras quedas na Lua.

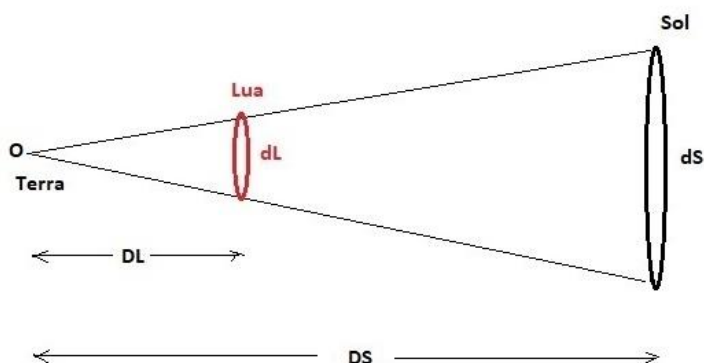
Para apreciar os tombos lunares de Eugene Cernan e seu companheiro, consultem o site: <https://www.youtube.com/watch?v=ZjOnsbodCus>.

3. Uma coincidência cósmica sem causa?

No dia 21 de agosto de 2017 ocorreu um eclipse do Sol. O disco lunar passou lentamente pela frente do disco solar e, em alguns locais da Terra, a sombra da Lua tornou o dia em noite por quase 3 minutos. Este é o chamado eclipse total do Sol. Em outros locais tivemos eclipses parciais (inclusive, em parte do Brasil) e em outros locais não houve eclipse.

Um eclipse total acontece porque o disco lunar é aproximadamente do mesmo tamanho que o disco solar quando visto da Terra. E isto é uma grande coincidência. O Sol está a 150 milhões de quilômetros da Terra (D_S) e a Lua a cerca de 400 mil quilômetros (D_L). Os seus diâmetros reais (d_S e d_L) são tais que a estas distâncias são vistos com os mesmos tamanhos aparentes projetados na abóbada celeste ($\theta = d_S/D_S \approx d_L/D_L \approx 0,5$ grau). Por que esta coincidência?

Figura 6. Os tamanhos aparentes da Lua e do Sol quando vistos da Terra pelo observador em O são aproximadamente os mesmos, ou seja, $d_S/D_S \approx d_L/D_L \approx 0,5$ grau.



Fonte: Acervo do autor.

Sabemos que a Lua tem uma importância fundamental para a qualidade do ambiente terrestre, a saber, na manutenção de uma sucessão suave de estações do ano. Isto é o resultado da ação da Lua na estabilização da inclinação do eixo de rotação da Terra (cf. Soares 2007 em <http://www.fisica.ufmg.br/dsoares/rare/rare.htm>). A vida humana no planeta é mais sustentável sem mudanças drásticas e imprevisíveis do clima. Devemos a estabilidade sazonal ao nosso satélite. Mas isto não requer que $d_S/D_S \approx d_L/D_L$.

A Lua se afasta da Terra atualmente cerca de 4 cm por ano. A causa do aumento da distância Terra-Lua (D_L) é a transferência de energia rotacional da Terra para a energia orbital da Lua devido à interação gravitacional no sistema. Utilizando-se a lei da gravitação universal bem como a lei da conservação do momento angular obtém-se este resultado.

Em 100 milhões de anos a distância Terra-Lua passará a ser 4.000 km maior e, conseqüentemente, o tamanho aparente da Lua será 1% menor. A idade da Terra é de mais de 4 bilhões de anos, então, com a mudança do tamanho aparente da Lua em 1% a cada 100 milhões de anos — ou a uma taxa maior no passado — a coincidência mencionada acima fica evidente. Por que o tamanho aparente da Lua é o mesmo do Sol exatamente agora quando nós, seres inteligentes — capazes, por exemplo, de prever com antecedência a ocorrência de eclipses — andamos pelo planeta Terra?

Há ainda outros fatores que podem ser considerados e que poderiam ter impedido a coincidência como, por exemplo, o tamanho da Lua (massa e densidade). Se a densidade da Lua fosse diferente de seu valor atual a coincidência não existiria.

Uma coincidência cósmica sem causa?

A resposta deve estar na evolução dinâmica do sistema Terra-Lua-Sol, a qual não é bem entendida porque existem, antes de tudo, mais do que uma teoria para a formação da Lua. Para lançar alguma luz sobre o problema, podemos investigar outra coincidência no sistema Terra-Lua-Sol, a saber, a quase igualdade da razão entre a densidade média da Lua e do Sol com a razão entre as forças de maré diferenciais exercidas pela Lua e pelo Sol sobre a Terra.

As densidades médias da Lua e do Sol são:

$$\rho_L = \frac{M_L}{d_L^3},$$

$$\rho_S = \frac{M_S}{d_S^3},$$

onde M_L e M_S são as massas da Lua e do Sol e o fator numérico $\pi/6$ da expressão do volume foi omitido. Agora, calculemos as forças diferenciais de maré sobre massas m separadas por uma distância Δr , na superfície da Terra, exercidas pela Lua e pelo Sol, sendo estas ΔF_L e ΔF_S (cf., por exemplo, —Efeitos de Maré||, por K. Oliveira Filho e M.F. Saraiva, em <http://astro.if.ufrgs.br/fordif/node2.htm#SECTION00110000000000000000>).

$$\Delta F_L = 2Gm \frac{M_L}{D_L^3} \Delta r$$

$$\Delta F_S = 2Gm \frac{M_S}{D_S^3} \Delta r,$$

onde, G é a constante de gravitação universal.

Façamos $f_1 = \rho_L/\rho_S$ e $f_2 = \Delta F_L/\Delta F_S$. Pode-se encontrar, inserindo as quantidades conhecidas nas expressões acima, que

$$f_1 = \frac{\rho_L}{\rho_S} = 2,38,$$

$$f_2 = \frac{\Delta F_L}{\Delta F_S} = 2,19.$$

Daí, é razoável fazer-se a aproximação $f_1 \approx f_2$ e com esta igualdade aproximada obtém-se

$$\frac{\rho_L}{\rho_S} = \frac{M_L d_S^3}{d_L^3 M_S} \approx \frac{\Delta F_L}{\Delta F_S} = \frac{M_L D_S^3}{D_L^3 M_S},$$

a qual pode ser escrita como

$$\frac{d_S^3}{D_S^3} \approx \frac{d_L^3}{D_L^3},$$

e finalmente como

$$\frac{d_S}{D_S} \approx \frac{d_L}{D_L},$$

significando, naturalmente, que a Lua e o Sol têm aproximadamente o mesmo tamanho aparente no céu.

Por que as razões f_1 e f_2 são aproximadamente iguais? Tal resultado e sua consequência imediata ($d_S/D_S \approx d_L/D_L$) mostram que a explicação procurada para a coincidência apresentada no início deve estar de fato no estudo da evolução dinâmica secular do sistema de três corpos constituído pela Terra, Lua e Sol, uma tarefa, sem dúvida, extraordinária.

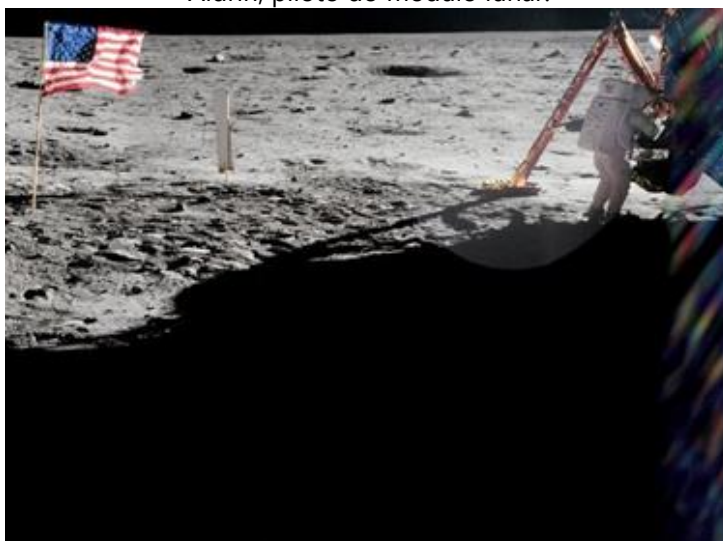
4. Morte e vida na Lua: explorando os limites da exobiologia e da exoecologia

No dia 20 de julho de 2019 comemoramos os 50 anos da descida do homem na Lua. Este feito foi realizado pelo povo norte-americano, inicialmente com a missão Apollo 11 (figura 7), e repetido pelas Apollos 12, 14 (figura 8), 15, 16 e 17. Seis Apollos, ao todo. O foguete Saturno que impulsionou os módulos de comando, de serviço e lunar em direção à Lua, era gigantesco: quase 120 m de altura. Ele pode ser comparado, em altura, ao maior dos edifícios do Conjunto JK, em Belo Horizonte ou à Catedral da cidade de Maringá. Quem estiver na Praça Raul Soares, e olhar para o alto dos 33 andares do maior dos edifícios, terá uma ideia da altura do foguete Saturno.

A Apollo 13 deveria ter descido na Lua (figura 9), mas, logo no início da viagem, uma explosão de um tanque de oxigênio danificou parte do módulo de serviço, e a missão se transformou numa luta pelo salvamento dos seus três astronautas. Isto acabou acontecendo, e o fato memorável foi registrado, de forma ficcional, mas com grande dose documental, em um filme, que gozou de enorme sucesso nas telas de todo o mundo.

Nenhum homem morreu na Lua. Mas, e se isto tivesse acontecido?

Figura 7. O comandante da missão Apollo 11, astronauta Neil Armstrong, na superfície da Lua, fotografado por Buzz Aldrin, piloto do módulo lunar.



Fonte: NASA (2019).

A Lua é um ambiente bastante inóspito para o homem. As temperaturas no solo lunar são elevadíssimas de dia e baixíssimas de noite. A sonda da NASA, Lunar Reconnaissance Orbiter, ou LRO, está presentemente em órbita da Lua, tendo sido lançada da Terra em 18 de junho de 2009. O seu objetivo é fazer um mapeamento da superfície lunar e realizar medições variadas, inclusive da temperatura. Os primeiros resultados da LRO mostram que a temperatura no interior de crateras profundas, localizadas no pólo Sul da Lua, e que nunca recebem a luz solar, pode chegar a -238 graus centígrados, muito pouco acima do zero absoluto, $-273,15$ graus.

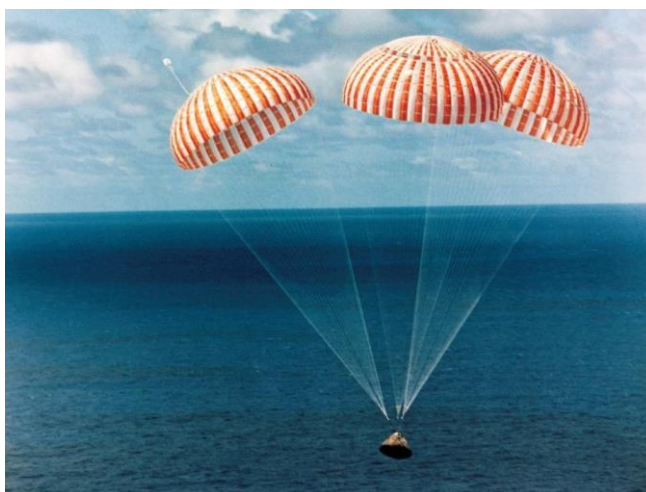
Ao longo do equador lunar — faixa próxima aos locais de descida de algumas missões Apolo —, as temperaturas ultrapassam os $+100$ graus, ao meio dia, e chegam a -180 graus durante a noite. A propósito, na Terra, existem determinados organismos chamados genericamente de "extremófilos", literalmente, amantes dos extremos, que vivem em condições extremas de temperatura e pressão. Eles são encontrados, por exemplo, nas profundezas oceânicas e nas proximidades de vulcões.

Vamos agora imaginar um astronauta morto na Lua. Os astronautas eram profissionais extremamente motivados, pois esta possibilidade - a morte em serviço - era bastante real. Só algo a meio caminho entre

a loucura e a lucidez - mais próximo da loucura - pode justificar a aceitação de tamanho risco. Mas eles aceitaram os riscos, confiaram na tecnologia desenvolvida para aquele fim, e aqui estamos nós agora a especular sobre a pior possibilidade de todas: a morte em pleno solo lunar!

O astronauta é um organismo composto por 10 trilhões de células - número este maior do que o número de estrelas da Via Láctea, cerca de 100 bilhões. Ele não está solitário, no entanto, mas acompanhado de aproximadamente 100 trilhões de micro-organismos, os quais vivem simbioticamente em vários órgãos de seu corpo - assim como ocorre no corpo de todos nós.

Figura 8. O módulo de comando da Apollo 14 aproxima-se da superfície do Oceano Pacífico, em 9 de fevereiro de 1971.



Fonte: NASA, 2019

Figura 9. Lua quase cheia espetacular fotografada da Apollo 11, por ocasião de sua viagem de volta à Terra



Fonte: MAILER (2019).

Em outras palavras, o astronauta morreu, mas isto não pode ser afirmado de imediato relativamente aos seus trilhões de companheiros de jornada espacial. Estamos, portanto, frente a uma extraordinária experiência de exobiologia - a biologia fora do planeta Terra - e de exoecologia - a ecologia fora de nosso maltratado quinhão neste universo. Os números são muito grandes: trilhões e trilhões de microorganismos - bactérias, vírus, etc. - lutando pela sobrevivência.

A teoria da evolução pela seleção natural de Charles Robert Darwin (1809-1882) está especialmente fundamentada nestes dois ingredientes: a luta pela sobrevivência e um número muito grande de lutadores.

Haveria um vencedor? Teríamos então vida após a morte na Lua? Ou haveria uma pasteurização eficaz e completa?

De qualquer forma, é muito confortador saber que nenhum astronauta morreu em solo lunar, e que a experiência de exobiologia e de exoecologia descrita acima está ocorrendo apenas em nossa imaginação.

Referências

MAILER, N. **Moonfire: a épica jornada da Apollo 11**. Berlin: Taschen, 2019.

NASA, Apollo 17 EVAs 8 (Schmitt falls down on the Moon). Disponível em:

<<https://www.youtube.com/watch?v=ZjOnsbodCus>>.

Acesso em: 10 set 2019.

NASA – **National Aeronautics and Space Administration oficial site**. Disponível em:

<https://www.nasa.gov/mission_pages/apollo/index.html>.

Acesso em: 10 set 2019. NASA, Apollo 17 EVAs 8 (Schmitt falls down on the Moon). Disponível em:

<<https://www.youtube.com/watch?v=ZjOnsbodCus>>.

Acesso em: 10 set 2019.

NEWTON, I. **Principia: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural**. Tradução de A. K. T. Assis. São Paulo: EDUSP, 2008.

SOARES, D.S. On the Rare Earth Hypothesis, ICEx; UFMG, 2007. Disponível em:

<<http://www.fisica.ufmg.br/dsoares/rare/rare.htm>>.

Acesso em: 10 set 2019.

SOARES, D.S. **Dedução da força diferencial**. Disponível em:

<<http://astro.if.ufrgs.br/fordif/node2.htm#SECTION00110000000000000000>>. Acesso em: 10 set 2019.

Recebido em: 15/11/2019

Aceito em: 30/12/2019

Endereço para correspondência:

Nome: Domingos Savio de Lima Soares

Email: dsoares@fisica.ufmg.br



Esta obra está licenciada sob uma [Licença Creative Commons Attribution 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)