

NOVAS PERSPECTIVAS SOBRE A HIPÓTESE DA PANSPERMIA

Ivan Gláucio Paulino Lima

Doutor em Biofísica pelo Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho, da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Coordenador de Astrobiologia do Grupo de Estudo e Divulgação de Astronomia de Londrina (igplima@gmail.com), Londrina-PR, Brasil.

RESUMO

Nas últimas décadas, a possibilidade de existência de vida em outros lugares do universo se tornou tema de grande interesse científico devido principalmente ao desenvolvimento tecnológico e ao rápido aumento do conhecimento humano sobre a natureza do sistema solar e da nossa vizinhança na galáxia. Sendo a Terra um sistema fisicamente aberto e, portanto, passível de receber material extra-planetário, torna-se cada vez mais plausível a hipótese de que organismos simples possam ter colidido com o planeta Terra após um longo período de permanência no espaço e desenvolvido, ao longo da evolução, as formas de vida conhecidas (hipótese da panspermia). Inúmeros experimentos científicos tem sido realizados tanto em laboratório como na região da órbita terrestre, com o intuito de caracterizar os riscos envolvidos em cada etapa de um eventual processo natural de transferência interplanetária de material biológico. Neste artigo, será apresentado um breve levantamento histórico desta hipótese, seguido dos principais resultados experimentais, bem como suas implicações para a evolução da vida na Terra.

PALAVRAS-CHAVE: radiação, vácuo, *Deinococcus radiodurans*, simulação experimental, vida extraterrestre

NEW PERSPECTIVES ON THE PANSPERMIA HYPOTHESIS

ABSTRACT

In recent decades, the possibility of life elsewhere in the universe became a subject of great scientific interest mainly due to technological development and the rapid increase of human knowledge about the nature of the solar system and our neighborhood in the galaxy. As the Earth is a physically open system and therefore eligible to receive extra-planetary material, it becomes increasingly plausible that simple organisms may have collided with the planet Earth after a long stay in space and developed throughout evolution, the life forms known today (the panspermia hypothesis). Numerous scientific experiments have been conducted both in laboratory and at Earth orbit, in order to characterize the risks involved in each step of a natural process of interplanetary transfer of biological material. In this paper, a brief historical survey of this hypothesis is presented, followed by the main results and their implications for the evolution of life on Earth.

KEYWORDS: radiation, vacuum, *Deinococcus radiodurans*, experimental simulation, extraterrestrial life

INTRODUÇÃO

A hipótese da panspermia (literalmente, "sementes em toda parte") postula que as sementes da vida são prevalentes em todo o Universo e que a vida na Terra poderia ter aparecido após uma colisão com essas sementes (ARRHENIUS, 1903).

Apesar de sofrer com o preconceito da comunidade científica conservadora, esta hipótese tem sido sujeita a sucessivos testes teóricos e experimentais, de maneira que atualmente, o conhecimento sobre a possibilidade de ocorrência de processos naturais de transferência interplanetária de material biológico permite a consideração de novos cenários plausíveis.

As consequências destes novos cenários estão diretamente relacionadas com a evolução da vida na Terra na medida em que ampliam o conceito de transferência horizontal de genes para escalas cosmológicas de espaço e de tempo. Não obstante, as novas perspectivas da hipótese da panspermia, além de motivar o desenvolvimento de novos programas de busca por vida extraterrestre, abrem possibilidade para o desenvolvimento de novos e produtos e processos para a aplicação em diversos setores, como por exemplo a própria exploração espacial.

LEVANTAMENTO HISTÓRICO

O filósofo grego Anaxágoras (500-428 aC) afirmava que as sementes da vida estão presentes em todo o universo (NICHOLSON, 2009). Sua afirmativa se tornou o ponto de partida filosófico de uma hipótese conhecida hoje como panspermia. A hipótese da panspermia postula que a vida poderia se originar em qualquer lugar do universo onde as condições são favoráveis, e que existem mecanismos para o movimento da vida de um local para outro através do espaço. Assim, a vida abundante observada no planeta Terra pode não ter se originado aqui. Um pensamento científico sobre panspermia começou a ganhar impulso no século XIX, depois que os químicos Thenard, Vauquelin e Berzelius nos anos 1830 relataram a descoberta de compostos orgânicos em amostras de meteorito. A possibilidade de que estes materiais carbonados efetivamente representam matéria viva inspirou o médico alemão H.E. Richter a propor em 1865, um mecanismo para panspermia, em que os meteoros passando pela atmosfera da Terra em um ângulo muito raso poderia coletar microorganismos presentes na atmosfera antes de continuar sua trajetória pelo espaço (NICHOLSON, 2009).

A idéia original de Richter sobre meteoros como veículos de transferência para a vida através do espaço foi ampliada por dois dos principais físicos da época, Hermann von Helmholtz e William Thomson (Lord Kelvin). Em 1871, cada um propôs uma hipótese com muitos detalhes do que é conhecido desde então por vários nomes, tais como litopanspermia ("panspermia associada a rochas"), panspermia balística ou transpermia, onde a transferência poderia funcionar por impactos cósmicos. Thomson propôs que meteoros ou asteroides colidindo com um planeta contendo vida como o planeta Terra pode ejetar rochas contendo seres vivos para o espaço. De maneira semelhante, rochas ejetadas de outros planetas que contém vida podem ter inoculado a Terra primitiva. Além de meteoritos, von Helmholtz incluiu cometas como possíveis veículos e propôs um conceito chave para a

litopanspermia – que os organismos do planeta doador e do planeta receptor compartilham um ancestral comum. Um mecanismo alternativo para a panspermia foi posteriormente proposto pelo químico sueco Svante Arrhenius, laureado com o Prêmio Nobel de Química em 1903 por sua teoria eletrolítica de dissociação. De acordo com Arrhenius, esporos poderiam ser transportados através do espaço pela pressão da radiação emitida por estrelas, numa versão da panspermia conhecida hoje como radiopanspermia (ARRHENIUS, 1903). Atualmente é sabido que a radiação ultravioleta solar intensa é letal para microrganismos não blindados. Arrhenius contribuiu muito para a popularização da hipótese da panspermia por meio de artigos, livros e palestras públicas sobre o tema. Atualmente é o nome mais associado à panspermia (NICHOLSON, 2009).

Em meados do século XX, Sir Fred Hoyle e Chandra Wickramasinghe propuseram uma versão não muito aceita da panspermia chamada de panspermia cíclica. De acordo com esses autores, os grãos de poeira interestelar são na verdade microrganismos viáveis que foram amplificados no interior quente e aquoso dos cometas, sendo posteriormente inoculados em planetas através de impactos e por deposição de partículas. Segundo esta hipótese, após nova amplificação nos planetas, o material biológico resultante acaba voltando para o espaço e inicia um novo ciclo de dispersão (WICKRAMASINGHE, 2003).

A hipótese da panspermia como postulada por Arrhenius em 1903 considera que estruturas de organismos vivos podem existir por todo o universo e são capazes de se desenvolver em qualquer ambiente favorável. Esta hipótese implica que durante a evolução do universo, condições favoráveis ao desenvolvimento da vida prevaleceram em diferentes locais e em diferentes épocas. Por exemplo, no início do desenvolvimento do sistema solar, quando as condições da Terra primitiva eram inóspitas para o desenvolvimento da vida, condições favoráveis ao desenvolvimento de seres vivos podem ter existido simultaneamente em outros corpos do sistema solar (tais como Marte, Vênus, Europa – lua de Júpiter ou Titã – lua de Saturno) e também em corpos de outros sistemas planetários. A hipótese da panspermia não impõe a pré-condição de que a vida terrestre tenha necessariamente se originado na Terra. Os sistemas vivos podem ter se originado em outro lugar do sistema solar ou do universo e ter sido transportados para a Terra, onde encontraram condições favoráveis para o crescimento, proliferação e evolução, resultando em sistemas mais complexos. Uma vez estabelecida, a vida na Terra também estaria sujeita à transferência e dispersão para outros corpos celestes (BAGLIONE et al., 2007).

Desde a sua formulação, a hipótese da panspermia tem sido alvo de muita crítica, com argumentos tais como: (i) ela não pode ser testada, (ii) ela transporta o problema da origem da vida para outro lugar e época da evolução do universo, e (iii) organismos vivos não podem sobreviver longos períodos de exposição ao ambiente hostil encontrado no espaço. Entretanto, evidências experimentais apresentadas pela biologia, astronomia e geologia, têm levado a novas considerações sobre a possibilidade da ocorrência de processos naturais de transporte interplanetário de seres vivos, particularmente microrganismos (BAGLIONE et al., 2007).

LITOPANSPERMIA

Atualmente, a litopanspermia é a versão mais aceita da hipótese da panspermia. Segundo esta versão, formas de vida simples, provavelmente microbiana, são capazes de sobreviver a três processos principais: (i) o mecanismo

de escape, ou seja, a ejeção do material contaminado do planeta para o espaço, normalmente causado por um grande impacto sobre o planeta de origem dos microrganismos, (ii) a exposição às condições inóspitas do espaço através de escalas de tempo comparáveis com aquelas experimentadas pelos meteoritos marcianos (estimada em 1-15 milhões de anos), e (iii) o processo de aterrissagem de forma a permitir a deposição não-destrutiva do material biológico no planeta destinatário (HORNECK et al., 2003).

As etapas de escape e entrada são críticas devido à grande quantidade de energia que pode ser imposta aos organismos dentro de um curto período de tempo. Portanto, estudos recentes têm investigado essas etapas (BURCHELL et al., 2004; COCKELL et al., 2007; STOFFLER et al., 2007; HORNECK et al., 2001b; HORNECK et al., 2008; MOELLER et al., 2008a; DE LA TORRE et al., 2009; FAJARDO-CAVAZOS et al., 2005; FAJARDO-CAVAZOS et al., 2009). Todos estes trabalhos relatam a sobrevivência de uma pequena fração da população inicial de células e demonstram que alguns tipos de microrganismos são capazes de sobreviver a grandes impactos, com liberação de energia comparáveis aos processos de impactos de asteróides.

Além desses experimentos de impacto físico, vários tipos de microrganismos, tais como esporos de bactérias ou fungos e vírus, bem como biomoléculas, como DNA, aminoácidos e lipossomas, têm sido expostos às condições do espaço de maneira selecionada ou combinada, tanto fora do campo magnético da Terra (Apollo 16), ou na baixa órbita terrestre (LEO) nas missões a bordo do Spacelab 1, Spacelab D2, ERA no veículo EURECA, LDEF, Biopan no veículo FOTON, e também exposição na Estação Espacial Internacional (HORNECK et al., 2010; OLSSON-FRANCIS e COCKELL, 2010). Parâmetros extraterrestres, tais como alto vácuo, radiação ultravioleta solar intensa, diferentes componentes da radiação cósmica e extremos de temperatura afetaram a estabilidade genética dos organismos no espaço, levando a taxas de mutação aumentadas, danos ao DNA e inativação celular (HORNECK, 1999). A radiação ultravioleta solar extraterrestre tem sido demonstrada como o fator mais letal para as amostras totalmente expostas, enquanto que baixas pressões e baixas temperaturas são na verdade fatores preservantes para organismos que toleram essas condições (WEBER e GREENBERG, 1985). Notavelmente, quando protegidos contra a incidência de radiação UV solar, esporos da bactéria *Bacillus subtilis* sobreviveram por mais de cinco anos no espaço (HORNECK et al., 1994).

HORNECK et al. (2008) testaram a primeira etapa da hipótese da litopanspermia, expondo os esporos de *B. subtilis*, células da cianobactéria *Chroococcidiopsis* e talos e ascocarpos do líquen *Xanthoria elegans* a choques de pressões na faixa de 5 a 40 Giga Pascal. Seus resultados suportam a hipótese de que material biológico pode ser ejetado com êxito de planetas, sendo possível que a própria Terra primitiva tenha sido contaminada em processo semelhante.

Em vista desses resultados surpreendentemente positivos e favoráveis à hipótese da panspermia, a etapa crítica da reentrada do processo foi verificada pelo experimento "Stone" da ESA (COCKELL et al., 2007). Estes autores demonstraram que a cianobactéria endolítica *Chroococcidiopsis* sp. inoculada em uma amostra de rocha metamórfica (gnaisse) não resistiu a rápida re-entrada na atmosfera da Terra devido ao aquecimento extremo alcançado até ~ 5 mm de profundidade da rocha. Este resultado indica a impossibilidade de transferência interplanetária de

microrganismos fotossintéticos nos moldes da hipótese da litopanspermia (COCKELL et al., 2007), sugerindo que a fotossíntese pode ter aparecido independentemente no planeta Terra (FOUCHER et al., 2010).

Embora as chamas provocadas pelo atrito com a atmosfera podem ter entrado por trás da amostra e queimado o biofilme, as transformações mineralógicas observadas na superfície da rocha indicam que a temperatura na parte de trás atingiu 650°C, muito alta para a estabilidade de qualquer composto orgânico (FOUCHER et al., 2010). Portanto, mesmo que as chamas não tenham atingido o biofilme, uma camada de 2 cm de proteção rochosa não é suficiente para proteger microrganismos endolíticos. Na superfície terrestre, microrganismos endolíticos fotossintéticos, tais como *Chroococcidiopsis*, precisam ter um mínimo de acesso à luz e, portanto, não penetram na rocha a uma profundidade superior a 5 mm.

Entretanto, microrganismos litotróficos não são dependentes de luz, ou seja, podem obter carbono e energia a partir de fontes inorgânicas. Eles são colonizadores bastante comuns em rochas e tem sido encontrados em grandes profundidades em minas de ouro com 3 km de profundidade na África do Sul (LIN et al., 2006). Sabendo-se que rochas ejetadas durante um impacto podem ser provenientes da sub-superfície da crosta terrestre (MELOSH, 2003), é possível que as rochas contendo microrganismos litotróficos em suas fraturas pode ser ejetado pelo impacto. De fato, se a vida ainda está presente em Marte, ela irá ocorrer em ambientes protegidos subsuperfície. HORNECK et al. (2001a) demonstraram que esporos microbianos podem resistir às condições do espaço se protegidos por uma camada de rocha, mas a sobrevivência de microrganismos à entrada atmosférica ainda não tinha sido testada até os experimentos Stone 5 e 6 (FOUCHER et al., 2010).

EXPERIMENTOS EM ÓRBITA

A sobrevivência de diversos modelos biológicos já foi testada em condições do espaço no dispositivo ERA (*Exobiology Radiation Assembly*), colocado em órbita numa missão da ESA chamada Eureka. DOSE et al. (1995, 1996) relataram que embora não tenha sido possível registrar a taxa de sobrevivência da bactéria *Deinococcus radiodurans* devido às condições de armazenamento das amostras antes e depois da missão, a quantidade de quebras de fita dupla do DNA (DSB) por cromossomo foi determinada. Se exposto à luz solar ($\lambda > 170\text{nm}$, sendo $4 \times 10^8 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ para o intervalo de 175 a 340 nm) em camadas de cerca de 1,5 milímetros, apenas os décimos superiores na camada de 1 milímetro do topo são afetados, onde mais de 12 quebras de fita dupla (DSB) foram detectados em comparação com 8 DSB para o controle no escuro. Os dados obtidos com as amostras equivalentes aos controles revelaram que *D. radiodurans* sobrevive relativamente bem (15-35% de sobrevivência) se for mantido em argônio seco por 17 meses, mas a sobrevivência em argônio úmido (acima de 20% de umidade relativa) foi inferior a 0,01% quando expostos durante o mesmo período de tempo. A sobrevivência pode ser melhorada em até 100%, se as células forem desidratadas na presença de matéria orgânica (triptona-extrato de levedura) (DOSE et al. 1995, 1996).

Outros microrganismos também foram testados no espaço. De acordo com DOSE et al. (1996), monocamada de esporos, conídios ou células vegetativas são extremamente sensíveis às condições do espaço (vácuo e radiação solar). Multi-camadas ou aglomerados macroscópicos, no entanto, podem resistir por meses ou

anos, mesmo quando expostos à luz solar plena. Embora as camadas superficiais de células sejam inativadas, elas continuam protegendo as camadas inferiores dos potenciais danos causados pela radiação UV e também pela desidratação.

SAFFARY et al. (2002) verificaram os efeitos da radiação ultravioleta extrema (EUV), com $\lambda = 30.4$ nm, em *Bacillus sp.* e *D. radiodurans* durante vôo de foguete. A exposição à radiação EUV diminuiu a sobrevivência de ambos os organismos em uma ordem de magnitude em relação à sua tolerância à dessecação. Resultados semelhantes foram reportados pela primeira vez para um modelo de arqueia halofílica, representada por um novo isolado do gênero *Haloarcula* exposto às condições reais do espaço por 15 dias no dispositivo Biopan-1 (MANCINELLI et al., 1998). Este isolado foi obtido a partir de cristais de sal (NaCl) e apresenta alta resistência à desidratação. Uma vez que a radiação EUV interage fortemente com alvos biológicos, SAFFARY et al. (2002) atribuíram tal inativação a danos celulares diferentes de DNA, tais como danos na membrana e em proteínas de superfície. Por outro lado, outras formas de organismos osmofílicos, como os líquens, foram capazes de restaurar completamente a sua capacidade de colonização e atividade fotossintética após uma exposição contínua de 16 dias às condições reais de espaço no dispositivo Biopan-5 (SANCHO et al., 2007).

O Biopan consiste numa cápsula capaz de abrigar amostras biológicas e bioquímicas para experimentos na baixa órbita terrestre (LEO). Após a preparação e o carregamento das amostras, a cápsula contendo as amostras é transportada ao local de montagem do foguete russo *Foton*. A cápsula pode ser aberta e fechada por telecomando, os dados sobre o funcionamento geral são armazenados durante o vôo e as condições do ambiente espacial são monitoradas por um conjunto de sensores integrados, sendo que a ocorrência de temperaturas indesejadas pode ser contrabalanceada por mecanismos ativos, através de aquecedores, ou por meios passivos, através de materiais isolantes térmicos, além do próprio fechamento da cápsula (BAGLIONE et al., 2007).

As amostras carregadas no Biopan correspondem a experimentos de exobiologia, radiobiologia, e ciências de materiais, com o propósito de se avaliar os efeitos individuais ou combinados da radiação ultravioleta solar, radiação cósmica, vácuo, temperaturas extremas e microgravidade em modelos biológicos, espécimes materiais e componentes eletrônicos. Após um teste bem sucedido em 1992, o programa Biopan completou 5 missões operacionais em 1994, 1997, 1999, 2005 e 2007. Em 2002, uma unidade de vôo foi perdida em uma falha de lançamento do foguete *Foton M-1* (BAGLIONE et al., 2007).

O dispositivo Biopan tem sido utilizado em diversos tipos de experimentos, tais como a sobrevivência de modelos microbianos eucarióticos e procarióticos, bem como comunidades microbianas presentes em solos permanentemente congelados (Permafrost), tanto às condições inóspitas do espaço como às variações bruscas das condições físicas impostas durante a entrada atmosférica (OLSSON-FRANCIS e COCKELL, 2010). Para este propósito, esporos de *B. subtilis* e dois isolados halofílicos, *Synechococcus* e *Haloarcula-G*, foram embebidos em argila, pó de meteorito, solo marciano simulado, ou cristais de sal e foram expostos às condições do ambiente espacial, na presença ou ausência de radiação UV. Os esporos desprotegidos foram totalmente inativados pela radiação solar em questão de segundos. Entretanto, os esporos agregados em materiais particulados apresentaram altas taxas de sobrevivência. O experimento com halofílicos

desprotegidos foi perdido, mas as amostras protegidas sobreviveram. (MANCINELLI et al., 1998; HORNECK et al., 2001a). Esporos de *B. subtilis* também foram utilizados no experimento “Marstox”. O objetivo deste experimento foi investigar a sobrevivência sob condições simuladas da superfície marciana. Os resultados demonstraram que esporos misturados diretamente com argila, rocha ou meteoritos sobreviveram às condições combinadas do ambiente espacial, incluindo radiação UV (RETTBERG et al., 2004).

No experimento “Lichen”, *Rhizocarpon geographicum* e *Xanthoria elegans* foram expostos ao ambiente espacial. Os líquens apresentaram a mesma atividade fotossintética dos controles e não houve mudança ultraestrutural detectável na maioria das células de algas e fungos do talo (SANCHO et al., 2007). O papel fisiológico da proteína D1, que é importante na recuperação após irradiação em organismos fotossintéticos, foi determinada no experimento de “Photo”. *Chlamydomonas reinhardtii* (wt-IL, um mutante sem introns no gene *psbA* que codifica para a proteína D1, além de outros mutantes D1) foram expostos à radiação do espaço, em combinação com a luz solar, para testar os efeitos no funcionamento da proteína D1 e da atividade do fotossistema II. Foi observado que o efeito do estresse espacial na sobrevivência variou dependendo das condições de iluminação que as amostras foram expostas. Células fotossinteticamente ativas foram capazes de sobreviver à exposição à radiação solar (BERTALAN et al., 2007). O objetivo do experimento “Lithopanspermia” foi investigar a capacidade dos microrganismos de sobreviver a uma viagem espacial. Amostras dos líquens *R. geographicum*, *X. elegans* e *Aspicilia fruticulosa*, em seu substrato natural rochoso, bem como as suas estruturas de reprodução, além de comunidades microbianas presentes em halitas do deserto do Atacama, uma comunidade de cianobactérias endolíticas de Beer, Reino Unido e akinetes de *Anabaena cylindrica* foram expostos a condições de espaço. Todos os líquens foram resistentes à condição da baixa órbita terrestre (LEO). Um décimo da comunidade microbiana do Atacama sobreviveu. Uma cianobactéria da comunidade endolítica de Beer, foi isolada após a exposição ao espaço e os akinetes sobreviveram à exposição ao espaço, quando protegidos da radiação solar (DE LA TORRE et al., 2009; OLSSON-FRANCIS et al., 2009).

Para exposições mais longas, o “Expose” é o mais recente mecanismo desenvolvido pela ESA. Os experimentos são acomodados em centenas de células minúsculas que podem ser pressurizadas ou ventiladas, totalmente expostas ou protegidas contra a radiação através de diferentes filtros (SCHULTE et al., 2007). O dispositivo Expose inclui três bandejas experimentais, cada uma com quatro compartimentos de amostras, tanto com unidades ventiladas ou seladas. As unidades podem ser seladas e pressurizadas, sendo que a composição do gás pode ser previamente definida. Cada um dos compartimentos de amostras tem uma ou duas camadas, incluindo um controle escuro. As amostras biológicas são unidas dentro da bandeja por uma variedade de métodos, incluindo a fixação de discos de quartzo. As amostras são mantidas abertas ao ambiente espacial, ou são cobertas com filtros ópticos que permitem o controle do comprimento de onda e da quantidade de luz que as amostras são expostas. Há uma série de sensores responsáveis por medir a temperatura, pressão, radiação UV, e radiação cósmica. O Expose inclui uma estrutura de interface com o adaptador na plataforma externa do módulo Columbus da estação espacial (EUTEF-CEPA) para o Expose-E ou com a plataforma externa do segmento russo da estação espacial (ISS) para o Expose-R.

Os experimentos biológicos a bordo do Expose-R foi instalado em março de 2009 e estão previstos para serem expostos por um ano e meio. Depois disso, as placas serão retiradas e armazenadas em compartimentos selados dentro da ISS para posterior retorno a Terra a bordo do módulo de entrada Soyuz. Novos experimentos serão conduzidos no Expose-R no futuro. Em contrapartida, o Expose-E foi utilizado apenas em uma missão de dois anos, pois não apresenta compartimentos removíveis (BAGLIONE et al., 2007). Existem mais de 1000 amostras biológicas, químicas, e amostras de dosimetria de oito grupos científicos internacionais que estão atualmente alojadas no dispositivo Expose (OLSSON-FRANCIS e COCKELL, 2010).

A radiação solar (incluindo radiação UV e UVV) foi medida nas missões do Biopan através de 2 tipos de sensores. Um radiômetro monitorou o fluxo da radiação eletromagnética solar, desde a faixa do UV até o infravermelho. Sensores especiais de UV são adicionados para monitorar os comprimentos de onda que são específicos ao vôo orbital, já que na superfície da Terra não há incidência de fótons com comprimento de onda inferiores aos correspondentes a UV-B. Nas 5 missões já completadas, a dose total da radiação solar variou de 8,2 kJ·cm⁻² a 20,4 kJ·cm⁻² (BAGLIONE et al., 2007). A dose total depende diretamente do tempo em que a cápsula está aberta no espaço. Este período, variou de 7,8 a 14,8 dias. Como consequência, a dose diária variou de 0,99 kJ·cm⁻² a 1,38 kJ·cm⁻², correspondendo a uma exposição constante de 2,02 a 2,8 horas à radiação solar (BAGLIONE et al., 2007).

Em relação às radiações ionizantes, a dose absorvida pela radiação cósmica foi medida por diferentes experimentos de dosimetria. Dependendo do nível de blindagem, os experimentos do Biopan foram expostos a uma dose de até 5,6 Gy por dia, nível correspondente a quatro ordens de magnitude superior a dose recebida dentro da Estação Espacial Internacional (ISS), por exemplo. Entretanto, a dose verdadeiramente absorvida pelas amostras é geralmente bem menor devido à sua montagem. Uma pequena mudança na densidade de qualquer material protetor pode fazer uma grande diferença. Por exemplo, camadas protetoras pouco densas (0.05 g·cm⁻²) resulta num a queda de uma ordem de magnitude, sendo duas ordens de magnitude para camadas com 0.25 g·cm⁻², e três ordens de magnitude para camadas mais densas (1 g·cm⁻²) (BAGLIONE et al., 2007).

A blindagem contra radiações ionizantes deletérias é necessária para garantir a viabilidade de vírus, bactérias e esporos fúngicos desidratados, aliviando os efeitos da radiação aplicada em eventuais processos de transferência interplanetária. Cálculos feitos por MILEIKOWSKY et al. (2000) previram que microorganismos, tais como *D. radiodurans* e *Bacillus* sp., devem ser protegidos contra a radiação espacial dentro de rochas, da ordem de 0.33 m, para manter uma população viável mínima durante intervalos de tempo adequados para suportar uma viagem interplanetária de Marte para Terra (~ 1 milhão de anos). Esses autores estimam também que mais de 1 bilhão de fragmentos com temperaturas abaixo de 100 °C foram expulsos de Marte e pousaram na Terra nos últimos 4 bilhões de anos. A Terra primitiva recebeu cerca de 10 vezes mais matéria extraterrestre durante o período de bombardeio pesado, de 4,5 a 4 bilhões de anos atrás. De fato, os 40 meteoritos marcianos descobertos até agora na Terra representam uma pequena fração dos meteoritos vindos de Marte durante a história da Terra (FRITZ et al., 2005).

A descoberta de meteoritos marcianos na Terra (DREIBUS e WANKE, 1985) sugere que fragmentos de rocha podem escapar de corpos planetários e interplanetários e que a transferência da matéria é possível de ocorrer no sistema solar (OKEEFE e AHRENS, 1986). Pelo menos cinco dos cerca de 40 meteoritos marcianos, pode não ter experimentado temperaturas de esterilização durante a ejeção de Marte e reentrada na atmosfera da Terra (SHUSTER e WEISS, 2005). Apesar de todos esses experimentos, a possibilidade de transporte de seres entre os planetas por meio de tais fragmentos, suportando as duras condições do espaço, é ainda tema de intenso debate na comunidade científica. Entretanto, as características biológicas de espécies microbianas extremófilas certamente podem ser muito úteis para suportar ambientes extraordinários como os encontrados no espaço interplanetário.

PARTÍCULAS CARREGADAS

No espaço interplanetário, além das radiações eletromagnéticas, as partículas carregadas altamente deletérias oferecem grandes riscos aos materiais biológicos. A população de íons de baixa energia dos raios cósmicos no meio interplanetário é essencialmente devido ao vento solar e partículas aceleradas por energia magnética lançado em explosões solares (STRAZZULLA et al., 1995). Íons do vento solar são produzidos por uma expansão de plasma e atingem velocidades supersônicas a uma distância de poucos raios solares, cerca de $400 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1}$ (ie, íons com energias de 1 keV/amu são lançados). A 150 milhões de km (1 unidade astronômica - U.A.) a densidade do vento é da ordem de $5 \text{ prótons} \cdot \text{cm}^{-3}$, correspondente a um fluxo de aproximadamente 2×10^8 . Com a queda do fluxo inversamente proporcional ao quadrado da distância, um fluxo de $10^{17} \text{ prótons} \cdot \text{cm}^{-2}$ pode alcançar a superfície de um asteroide hipotético em apenas 100 anos (STRAZZULLA et al., 1995).

Os efeitos de partículas de baixa energia sobre microrganismos não foram completamente investigados sob condições simuladas do espaço. Em condições de laboratório, tem sido demonstrado que radiações particuladas resulta em menos morte de células do que o observado para outras formas de radiação, mesmo que à custa do aumento das taxas de mutação (YU, 1993). Aparentemente, o risco biológico de tais radiações está relacionado à sua deposição de energia, altamente localizada. A inativação se restringe às células localizadas na trajetória das partículas (HORNECK et al., 1994b), e a intensidade do dano depende da Transferência Linear de Energia (LET) (KOZUBEK et al., 1995). Por outro lado, eventos mutagênicos podem ser causados se ocorrerem danos nas proximidades do material genético. Elétrons de baixa energia parecem interagir com sítios específicos no DNA por mecanismos de ressonância (WINSTEAD e MCKOY, 2008), e o sistema de reparo por junção de terminações não homólogas (NHEJ) foi demonstrado por (MOELLER et al., 2008b) ser o principal mecanismo no reparo de quebras no DNA induzidas pelo bombardeamento de partículas em *Bacillus subtilis*.

Os efeitos de partículas com energias mais elevadas tem sido estudados em uma variedade de experimentos tanto no ambiente espacial, como em aceleradores de partículas (HORNECK et al., 2010). Esporos de *B. subtilis* são bastante utilizados desde a década de 1970 como dosímetros biológicos em escala micrométrica para determinar a eficiência biológica radial ao longo da trajetória individual de partículas carregadas altamente energéticas (HZE). Com este propósito, foi desenvolvido o Biostack, que consiste em um sanduíche de monocamadas de esporos bacterianos montado sobre folhas de nitrato de celulose como detectores visuais da trajetória

das partículas (HORNECK, 1993; BUCKER e HORNECK, 1975). Nos experimentos espaciais, após o retorno do espaço (Apollo Soyuz Test Project e uma missão no Spacelab), a viabilidade de cada esporo nos arredores da trajetória de uma partícula HZE foi analisada separadamente por microscopia, micromanipulação dos esporos em agar nutriente seguido de incubação. A fluência diária de 0,3-0,7 partículas HZE·cm⁻², com uma transferência linear de energia (LET) ≥130 keV·µm⁻¹, foi medida pela contagem das marcas nos detectores (HORNECK et al., 2010).

Os resultados destes experimentos sugerem dois efeitos complementares para a inativação de esporos por partículas HZE: um efeito de curto alcance a uma distância radial de 0,2 µm da trajetória da partícula HZE que pode ser atribuído aos efeitos de elétrons secundários (raios gama), e um efeito de longo alcance, que se estende a uma distância de 3,8 µm, para o qual outros mecanismos, tais como ondas de choque ou eventos termofísicos têm sido sugeridos (HORNECK, 1993, 2007; NICHOLSON et al., 2000). Note-se que no efeito de longo alcance, os esporos, com cerca de 1 µm de diâmetro cada um, não são diretamente atingidos pelas partículas HZE. Tal fenômeno, que é um efeito biológico induzido em células que não são diretamente atravessadas por uma partícula carregada, mas estão em estreita proximidade com as células atingidas, conhecido como efeito *bystander*, já foi associado a uma variedade de consequências biológicas, tais como a inativação, mutagênese e aberrações cromossômicas em células de mamíferos utilizando micro-feixes estreitos de radiação particulada (MORGAN, 2003). Recentemente, efeitos *bystander* também foram observados *in vivo* em ratos parcialmente expostos a raios-X (MANCUSO et al., 2008). Desta forma, os efeitos *bystander* podem acarretar severas consequências para a saúde dos astronautas, porque podem aumentar o risco de indução de câncer (MOTHERSILL e SEYMOUR, 2004; PERSAUD et al., 2005).

Em relação ao aumento da mutagênese, estudos feitos com esporos de *B. subtilis* expostos a feixes de íons pesados altamente energéticos têm mostrado um aumento da frequência de mutação, com base na resistência a diversos agentes químicos, por exemplo, a azida de sódio e o ácido nalidíxico, aumentando com a dose aplicada e com o aumento da LET (BALTSCHUKAT et al., 1986; BALTSCHUKAT e HORNECK, 1991; HORNECK et al., 1994b; MUNAKATA et al., 1997). Relatos de mutações em *gyrA*, gene que codifica a subunidade A da DNA girase, resultando em resistência ao ácido nalidíxico, corresponde à indução de uma única troca de base em um alelo particular de *gyrA* (*GyrA12*; 5'-CA para 5'-TT), após irradiação com UV, UVV, radiação gama e raios-X moles (MUNAKATA et al., 1997). MOELLER et al. (2010) estudaram a mutagenicidade do gene *rpoB* após a exposição de *B. subtilis* a raios-X e íons pesados de alta energia. Mutações no gene *rpoB* têm efeitos dramáticos na fisiologia geral microbiana, mas correspondem a eventos não-letais. No entanto, vale ressaltar que mutações letais são muito comuns após a exposição a raios-X e irradiação com partículas HZE. Este tipo de mutação leva à inativação do esporos irradiados. Uma das mutações mais investigadas em *B. subtilis* é a perda da capacidade de esporulação individual, a chamada mutação para esporulação defeituosa (Spo⁻), conforme detalhada por FAJARDO-CAVAZOS et al., 2005. Embora a detecção de mutantes Spo⁻ por inspeção visual da morfologia e pigmentação da colônia seja bastante simples, as informações sobre a natureza e o tipo de mutações em células Spo⁻ não estão disponíveis. Mesmo sabendo-se que a perda da esporulação é uma mudança drástica no ciclo de vida das células de *B.*

subtilis, continua a necessidade de se investigar se, e em que medida, os mutantes defectivos em esporulação são induzidos por irradiação com raios-X e partículas HZE. Entretanto, deve ser notado que em *B. subtilis*, os genes envolvidos na esporulação representam quase 5% do genoma (MAUGHAN et al., 2004), o que torna a análise bastante difícil.

Além do aspecto da indução de mutações letais, deve notar-se que mutações benéficas também podem ser induzidas (RAINEY, 1999; PERFEITO et al., 2007). Mutações benéficas são conhecidas por aumentar o valor adaptativo de microrganismos, tais como uma maior adaptação ao ambiente extremo (por exemplo, temperatura, salinidade, pressão), resistência específica a produtos químicos (por exemplo, antibióticos), e novas vias metabólicas (HALL e ZUZEL, 1980; BENNETT et al., 1992; PAPADOPOULOS et al., 1999; IMHOF e SCHLOTTERER, 2001). Deste modo, as mutações benéficas têm um profundo impacto sobre as implicações para o transporte de microrganismos terrestres por impactos naturais (litopanspermia) ou pela exploração planetária através de missões tripuladas ou robóticas (proteção planetária).

IMPLICAÇÕES PARA A EVOLUÇÃO DA VIDA EM SISTEMAS PLANETÁRIOS

Os micro-organismos extremófilos constituem o grupo de seres vivos mais resistentes a diferentes parâmetros físico-químicos e apresentam sistemas eficientes de reparo de DNA (ROTHSCHILD e MANCINELLI, 2001). Ainda que uma fração muito pequena de micro-organismos extremófilos resista aos processos associados a hipótese da panspermia, se alguns eventuais exemplares colidirem com um ambiente favorável e sobreviverem ao processo, os sistemas de reparo celular são ativados, permitindo a proliferação e a retomada das funções celulares. Dependendo do novo ambiente, micro-organismos invasores podem encontrar locais totalmente desprovidos de qualquer ser vivo, iniciando os primeiros processos biológicos num sistema planetário. Alternativamente, eles podem encontrar locais com diferentes formas de vida, eventualmente tendo que competir pelos nutrientes. Esta última possibilidade permite a introdução de um pool gênico totalmente novo na comunidade biótica de um sistema planetário, via transferência horizontal de genes. A transferência horizontal de genes é um processo amplamente conhecido, no qual segmentos de DNA contendo novas informações genéticas são transferidos de um organismo para outro (BOTO, 2010; KOONIN e WOLF, 2008), podendo envolver trocas gênicas entre os três diferentes domínios da vida (archaea, bacteria e eukarya).

Considerando o número elevado de micro-organismos presentes mesmo nos desertos mais inóspitos do planeta (mais de um milhão de células por grama de solo) (PAULINO-LIMA, 2010), ainda que as taxas de sobrevivência às etapas da hipótese da panspermia sejam baixas, o simples fato de ser possível a recuperação de micro-organismos viáveis após cada uma das etapas consideradas, já demonstra a plausibilidade da hipótese da panspermia, sobretudo quando este fato é ampliado para escalas cosmológicas de espaço e de tempo.

Mesmo que os micro-organismos em si não sobrevivam, seu material genético pode ficar suficientemente preservado para desencadear processos naturais de transformação genética (AVERY et al., 1944; GRIFFITH, 1928) em novos planetas. Neste contexto, o material genético (invasor), sobrevivente às intempéries do espaço interplanetário seria incorporado ao material genético de

organismos nativos, introduzindo novas características ou simplesmente alterando o controle da expressão de genes pré-existentes.

Certamente qualquer um dos mecanismos descritos acima teria papel importante nos processos evolutivos de qualquer biosfera. Em relação à evolução da vida na Terra, considerando a incrível massa de material extra-planetário que a Terra recebe na forma de micrometeoritos até os dias de hoje (dois mil a 100 mil toneladas por ano) (MAURETTE, 2006), mecanismos semelhantes podem ter ocorrido ao longo dos últimos bilhões de anos, interferindo na dinâmica da evolução das espécies.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pela primeira vez na história da humanidade é possível aplicar o método científico para investigar a possibilidade de existência de vida em outros lugares do Universo, o que está diretamente ligado à questão da origem da vida na Terra, bem como ao futuro da humanidade e possível colonização do espaço. Ainda que seja instigante a investigação concernente aos aspectos da origem da vida na Terra, é indispensável acrescentar que a exposição de seres vivos a condições extremas pode trazer contribuições para aplicação em diferentes setores como por exemplo, o desenvolvimento de melhores técnicas de cultivo de diferentes organismos levando à produção de bio-insumos em condições extremas, e o desenvolvimento de sistemas fechados de manutenção biológica para missões espaciais de longa duração.

As perspectivas apresentadas por este trabalho poderão auxiliar no desenvolvimento de projetos de pesquisa originais, de caráter inovador e multidisciplinar, com o intuito de investigar as principais questões relacionadas a possibilidade de existência de vida extraterrestre.

REFERÊNCIAS

ARRHENIUS, S. Die Verbreitung des Lebens im Weltenraum. **Umschau**, 7, 481–485, 1903.

AVERY, O. T.; MCLEOD, C. M.; MCCARTY, M. Studies on the chemical nature of the substance inducing transformation of pneumococcal types. **Journal of Experimental Medicine**, 79, 137–157, 1944.

BAGLIONE, P.; SABBATINI, M.; HORNECK, G. **Astrobiology experiments in Low Earth Orbit: Facilities, Instrumentation, and Results**. In: HORNECK, G. e RETTBERG, P. (eds.), Complete Course in Astrobiology. Wiley, VCH, Weinheim, pp. 273-319, 2007.

BALTSCHUKAT, K.; HORNECK, G. Responses to accelerated heavy-ions of spores of *Bacillus subtilis* of different repair capacity. **Radiation and Environmental Biophysics**, 30(2), 87-103, 1991.

BALTSCHUKAT, K.; HORNECK, G.; BUCKER, H.; FACIUS, R.; SCHAFFER, M. Mutation-induction in spores of *Bacillus subtilis* by accelerated very heavy-ions. **Radiation and Environmental Biophysics**, 25(3), 183-187, 1986.

BENNETT, A. F.; LENSKI, R. E.; MITTLER, J. E. Evolutionary adaptation to temperature 1. Fitness of *Escherichia coli* to changes in its thermal environment. **Evolution**, 46(1), 16-30, 1992.

BERTALAN, I.; ESPOSITO, D.; TORZILLO, G.; FARALONI, C.; JOHANNINGMEIER, U.; GIARDI, M. T. Photosystem II stress tolerance in the unicellular green alga *Chlamydomonas reinhardtii* under space conditions. **Microgravity Science and Technology**, 19(5-6), 122-127, 2007.

BOTO, L. Horizontal gene transfer in evolution: facts and challenges. **Proceedings of the Royal Society B, Biological Sciences**, 277, 819-827, 2010.

BUCKER, H.; G. HORNECK. **Studies on the effects of cosmic HZEparticles in different biological systems in the Biostack experiments I and II, flown on board of Apollo 16 and 17**, p. 1138–1151. In O. F. Nygaard, H. I. Adler, and W. K. Sinclair (ed.), Radiation research. Academic Press, New York, NY, 1975.

BURCHELL, M. J.; MANN, J. R.; BUNCH, A. W. Survival of bacteria and spores under extreme shock pressures. **Monthly Notices of The Royal Astronomical Society**, 352(4), 1273-1278, 2004.

COCKELL, C. S.; BRACK, A.; WYNN-WILLIAMS, D. D.; BAGLIONI, P.; BRANDSTATTER, F.; DEMETS, R.; EDWARDS, H. G. M.; GRONSTAL, A. L.; KURAT, G.; LEE, P.; OSINSKI, G. R.; PEARCE, D. A.; PILLINGER, J. M.; ROTEN, C. A.; SANCISI-FREY, S. Interplanetary transfer of photosynthesis: an experimental demonstration of a selective dispersal filter in planetary island biogeography. **Astrobiology**, 7(1), 1-9, 2007.

DE LA TORRE, R.; SANCHO, L. G.; HORNECK, G.; RETTBERG, P.; ASCASO, C.; DE LOS RIOS, A.; WIERZCHOS, J.; DE VERA, J. P.; OTT, S.; COCKELL, C.; OLSSON, K.; FRIAS, J. M. DEMETS, R. Testing the Lithopanspermia theory in the Foton-M3 mission: Simulation of Interplanetary Transfer and re-entry process of epi- and endolithic microbial communities with the Lithopanspermia experiment. **Origins of Life and Evolution of the Biosphere**, 39(3-4), 356-357, 2009.

DOSE, K. BIEGERDOSE, A. DILLMANN, R. GILL, M. KERZ, O. KLEIN, A. MEINERT, H. NAWROTH, T. RISI, S. STRIDDE, C. Era-Experiment Space Biochemistry. **Eureca Scientific Results**, 16(8), 119-129, 1995.

DOSE, K.; BIEGERDOSE, A.; DILLMANN, R.; GILL, M.; KERZ, O.; KLEIN, A.; STRIDDE, C. UV Photobiochemistry under space conditions. **Life Sciences: Space and Mars recent results**, 18(12), 51-60, 1996.

DREIBUS, G.; WANKE, H. Mars, A Volatile-Rich Planet. **Meteoritics**, 20(2), 367-381, 1985.

FAJARDO-CAVAZOS, P.; LINK, L.; MELOSH, H. J.; NICHOLSON, W. L. *Bacillus subtilis* spores on artificial meteorites survive hypervelocity atmospheric entry: Implications for lithopanspermia. **Astrobiology**, 5(6), 726-736, 2005.

FAJARDO-CAVAZOS, P.; LANGENHORST, F.; MELOSH, H. J.; NICHOLSON, W. L. Bacterial spores in granite survive hypervelocity launch by spallation: Implications for Lithopanspermia. **Astrobiology**, 9(7), 647-657, 2009.

FOUCHER, F.; WESTALL, F.; BRANDSTATTER, F.; DEMETS, R.; PARNELL, J.; COCKELL, C. S.; EDWARDS, H. G. M.; BENY, J. M.; BRACK, A. Testing the survival of microfossils in artificial martian sedimentary meteorites during entry into Earth's atmosphere: The STONE 6 experiment. **Icarus**, 207(2), 616-630, 2010.

FRITZ, J.; ARTEMIEVA, N.; GRESHAKE, A. Ejection of Martian meteorites. **Meteoritics & Planetary Science**, 40(9-10), 1393-1411, 2005.

GRIFFITH, F. The significance of pneumococcal types. **Journal of Hygiene**, 27, 113-159, 1928.

HALL, B. G.; ZUZEL, T. Evolution of a new enzymatic function by recombination within a gene. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America-Biological Sciences**, 77(6), 3529-3533, 1980.

HORNECK, G. European activities in exobiology in earth orbit: results and perspectives. **Life Sciences: Exobiology**, v. 23, n. 2, p. 381-386, 1999.

HORNECK, G.; MILEIKOWSKY, C.; MELOSH, H.J.; WILSON, J.W.; CUCCINOTA, F.A.; GLADMAN, B., **Viable transfer of microorganisms in the solar system and beyond**. In: HORNECK, G., BAUMSTARK-KHAN, C. (Eds.), *Astrobiology: The quest for the conditions of life*. Springer, New York, Pp. 57-76, 2003.

HORNECK, G.; KLAUS, D. M.; MANCINELLI, R. L. Space Microbiology. **Microbiology and Molecular Biology Review**, 74(1), 121-156, 2010.

HORNECK, G.; BUCKER, H.; REITZ, G. Long-term survival of bacterial spores in space. **Life Sciences and Space Research**, 14(10) 41-45, 1994a.

HORNECK, G.; KRASAVIN, E. A.; KOZUBEK, S. Mutagenic effects of heavy-ions in bacteria. **Life Sciences and Space Research**, 14(10), 315-329, 1994b.

HORNECK, G.; RETTBERG, P.; REITZ, G.; WEHNER, J.; ESCHWEILER, U.; STRAUCH, K.; PANITZ, C.; STARKE, V. BAUMSTARK-KHAN, C. Protection of bacterial spores in space, a contribution to the discussion on Panspermia. **Origins of Life and Evolution of the Biosphere**, 31(6), 527-547, 2001a.

HORNECK, G.; STOFFLER, D.; ESCHWEILER, U.; HORNEMANN, U. Bacterial spores survive simulated meteorite impact. **Icarus**, 149(1), 285-290, 2001b.

HORNECK, G.; STOFFLER, D.; OTT, S.; HORNEMANN, U.; COCKELL, C. S.; MOELLER, R.; MEYER, C.; DE VERA, J. P.; FRITZ, J.; SCHADE, S.; ARTEMIEVA, N. A. Microbial rock inhabitants survive hypervelocity impacts on Mars-like host planets: First phase of Lithopanspermia experimentally tested. **Astrobiology**, 8(1), 17-44, 2008.

HORNECK, G. **Space radiation biology**, p. 243–273. In E. Brinckmann (ed.), *Biology in space and life on Earth*. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2007.

HORNECK, G. **The Biostack concept and its application in space and at accelerators: studies in *Bacillus subtilis* spores**, p. 99–115. In C. E. Swenberg, G. Horneck, and E. G. Stassinopoulos (ed.), *Biological effects and physics of solar and galactic cosmic radiation*, part A. Plenum Press, New York, NY, 1993.

IMHOF, M.; SCHLOTTERER, C. Fitness effects of advantageous mutations in evolving *Escherichia coli* populations. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 98(3), 1113-1117, 2001.

KOONIN EV, WOLF YI. Genomics of bacteria and archaea: the emerging dynamic view of the prokaryotic world. **Nucleic Acids Research**, 36, 6688–6719, 2008.

KOZUBEK, S.; HORNECK, G.; KRASAVIN, E. A.; RYZNAR, L. Interpretation of mutation-induction by accelerated heavy-ions in bacteria. **Radiation Research**, 141(2), 199-207, 1995.

LIN, L. H.; WANG, P. L.; RUMBLE, D.; LIPPMANN-PIPKER, J.; BOICE, E.; PRATT, L. M.; LOLLAR, B. S.; BRODIE, E. L.; HAZEN, T. C.; ANDERSEN, G. L.; DESANTIS, T. Z.; MOSER, D. P.; KERSHAW, D.; ONSTOTT, T. C. Long-term sustainability of a high-energy, low-diversity crustal biome. **Science**, 314(5798), 479-482, 2006.

MANCINELLI, R. L.; WHITE, M. R.; ROTHSCHILD, L. J. Biopan-survival I: Exposure of the osmophiles *Synechococcus* sp. (Nageli) and *Haloarcula* sp. to the space environment. **Life Sciences: Exobiology**, 22(3), 327-334, 1998.

MANCUSO, M.; PASQUALI, E.; LEONARDI, S.; TANORI, M.; REBESSI, S.; DI MAJO, V.; PAZZAGLIA, S.; TONI, M. P.; PIMPINELLA, M.; COVELLI, V.; SARAN, A. Oncogenic bystander radiation effects in Patched heterozygous mouse cerebellum. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 105(34), 12445-12450, 2008.

MAUGHAN, H.; GALEANO, B.; NICHOLSON, W. L. Novel *rpoB* mutations conferring rifampin resistance on *Bacillus subtilis*: Global effects on growth, competence, sporulation, and germination. **Journal of Bacteriology**, 186(8), 2481-2486, 2004.

M. MAURETTE. The Major Contribution of Micrometeorites to the Delivery of Hydrous–Carbonaceous Material to the Earth. In: M. Maurette, Micrometeorites and the Mysteries of Our Origins, **Advances in Astrobiology and Biogeophysics**, 72–77, 2006.

MELOSH, H. J. Exchange of meteorites (and life?) between stellar systems. **Astrobiology**, 3(1), 207-215, 2003.

MILEIKOWSKY, C.; CUCINOTTA, F. A.; WILSON, J. W.; GLADMAN, B.; HORNECK, G.; LINDEGREN, L.; MELOSH, J.; RICKMAN, H.; VALTONEN, M.; ZHENG, J. Q. L. Natural transfer of viable microbes in space - 1. From Mars to Earth and Earth to Mars. **Icarus**, 145(2), 391-427, 2000.

MOELLER, R.; REITZ, G.; BERGER, T.; OKAYASU, R.; NICHOLSON, W. L.; HORNECK G. Astrobiological aspects of the mutagenesis of cosmic radiation on bacterial spores. **Astrobiology**, 10(5), 509-521, 2010.

MOELLER, R.; HORNECK, G.; RABOW, E.; REITZ, G.; MEYER, C.; HORNEMANN, U.; STOFFLER, D. Role of DNA Protection and Repair in Resistance of *Bacillus subtilis* Spores to Ultrahigh Shock Pressures Simulating Hypervelocity Impacts. **Applied and Environmental Microbiology**, 74(21), 6682-6689, 2008a.

MOELLER, R.; SETLOW, P.; HORNECK, G.; BERGER, T.; REITZ, G.; RETTBERG, P.; DOHERTY, A. J.; OKAYASU, R.; NICHOLSON, W. L. Roles of the major, small, acid-soluble spore proteins and spore-specific and universal DNA repair mechanisms in resistance of *Bacillus subtilis* spores to ionizing radiation from x rays and high-energy charged-particle bombardment. **Journal of Bacteriology**, 190(3), 1134-1140, 2008b.

MORGAN, W. F. Non-targeted and delayed effects of exposure to ionizing radiation: I. Radiation-induced genomic instability and bystander effects in vitro. **Radiation Research**, 159(5), 567-580, 2003.

MOTHERSILL, C.; SEYMOUR, C. B. Radiation-induced bystander effects - implications for cancer. **Nature Reviews Cancer**, 4(2), 158-164, 2004.

MUNAKATA, N.; HIEDA, K.; KOBAYASHI, K.; ITO, A.; ITO, T. Induction of unique tandem-base change mutations in bacterial spores exposed to extreme dryness. **Mutation Research-Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis**, 390(1-2), 189-195, 1997.

NICHOLSON, W. L. Ancient Micronauts: Interplanetary transport of microbes by cosmic impacts. **Trends in Microbiology**, 17(6), 243-250, 2009.

NICHOLSON, W. L.; MUNAKATA, N.; HORNECK, G.; MELOSH, H. J.; SETLOW, P. Resistance of *Bacillus* endospores to extreme terrestrial and extraterrestrial environments. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, 64, 548-572, 2000.

OKEEFE, J. D.; AHRENS, T. J. Oblique Impact - A process for obtaining meteorite samples from other planets. **Science**, 234(4774), 346-349, 1986.

OLSSON-FRANCIS, K.; COCKELL, C. S. Experimental methods for studying microbial survival in extraterrestrial environments. **Journal of Microbiological Methods**, 80(1), 1-13, 2010.

PAPADOPOULOS, D.; SCHNEIDER, D.; MEIER-EISS, J.; ARBER, W.; LENSKI, R. E.; BLOT, M. Genomic evolution during a 10,000-generation experiment with bacteria. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 96(7), 3807-3812, 1999.

PAULINO-LIMA, I. G. **Investigação das condições de sobrevivência de microrganismos extremófilos em ambientes extraterrestres simulados**. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

PERFEITO, L.; FERNANDES, L.; MOTA, C.; GORDO, I. Adaptive mutations in bacteria: High rate and small effects. **Science**, 317(5839), 813-815, 2007.

PERSAUD, R.; ZHOU, H. N.; BAKER, S. E.; HEI, T. K.; HALL, E. J. Assessment of low linear energy transfer radiation-induced bystander mutagenesis in a three-dimensional culture model. **Cancer Research**, 65(21), 9876-9882, 2005.

RAINEY, P. B. Evolutionary genetics: The economics of mutation. **Current Biology**, 9(10), R371-R373, 1999.

RETTBERG, P.; RABOW, E.; PANITZ, C.; HORNECK, G. Biological space experiments for the simulation of Martian conditions: UV radiation and Martian soil analogues. **Space Life Sciences: Search for Signatures of Life, and Space Flight Environmental Effects on the Nervous System**, 33(8), 1294-1301, 2004.

ROTHSCHILD, L. J.; MANCINELLI, R. L. Life in extreme environments. **Nature**, 409(6823), 1092-1101, 2001.

SAFFARY, R.; NANDAKUMAR, R.; SPENCER, D.; ROBB, F. T.; DAVILA, J. M.; SWARTZ, M.; OFMAN, L.; Thomas, R. J.; DiRuggiero, J. Microbial survival of space vacuum and extreme ultraviolet irradiation: strain isolation and analysis during a rocket flight. **FEMS Microbiology Letters**, 215(1), 163-168, 2002.

SANCHO, L. G.; DE LA TORRE, R.; HORNECK, G.; ASCASO, C.; DE LOS RIOS, A.; PINTADO, A.; WIERZCHOS, J.; SCHUSTER, M. Lichens survive in space: Results from the 2005 LICHENS experiment. **Astrobiology**, 7(3), 443-454, 2007.

SCHULTE, W.; HOFER, S.; HOFMANN, P.; THIELE, H.; VON HEISE-ROTENBURG, R.; TOPORSKI, J.; RETTBERG, P. Automated payload and instruments for astrobiology research developed and studied by German medium-sized space

industry in cooperation with European academia. **Acta Astronautica**, 60(12), 966-973, 2007.

SHUSTER, D. L.; WEISS, B. P. Martian surface paleotemperatures from thermochronology of meteorites. **Science**, 309(5734), 594-597, 2005.

STOFFLER, D.; HORNECK, G.; OTT, S.; HORNEMANN, U.; COCKELL, C. S.; MOELLER, R.; MEYER, C.; DE VERA, J. P.; FRITZ, J.; ARTEMIEVA, N. A. Experimental evidence for the potential impact ejection of viable microorganisms from Mars and Mars-like planets. **Icarus**, 186(2), 585-588, 2007.

STRAZZULLA, G.; BRUCATO, J. R.; CIMINO, G.; LETO, G.; SPINELLA, F. Interaction of solar-wind ions with planetary surfaces. **Laboratory Planetology**, 15(10), 13-17, 1995.

WEBER, P.; GREENBERG, J. M. Can spores survive in interstellar space? **Nature**, 316(6027), 403-407, 1985.

WICKRAMASINGHE, C. Panspermia according to Hoyle. **Astrophysics and Space Science**, 285(2), 535-538, 2003.

WINSTEAD, C.; MCKOY, V. Resonant interactions of slow electrons with DNA constituents. **Radiation Physics and Chemistry**, 77(10-12), p. 1258-1264, 2008.

YU, Z.L. **Studying of ion implantation effect on biology in china**. China Nuclear Scienc And Technology Report (Chinese), Cnic-00746, China Nuclear Information Centre, 1993.