

**Prof. Dr. Sergio Pilling**

**Aluno: Will Robson Monteiro Rocha**

**Víctor de Souza Bonfim**

## Aula 17 - Astrobiologia Experimental

### 1. Introdução

Por mais de 3 bilhões de anos a biosfera terrestre está protegido pela sua atmosfera das condições hostis do espaço interplanetário e mesmo interestelar. Nessas condições a existência da vida como a conhecemos foi possível nesse planeta.

Atualmente existe um grande esforço em procurar vida em outros planetas, além de entender os mecanismos pelos quais a vida originou-se na Terra. Nesse contexto alguns experimentos têm sido feitos fora atmosfera com seres vivos (ex.: bactérias) a fim de entender como essas criaturas respondem às condições espaciais, tais como alta incidência da radiação e alto vácuo. Nesse capítulo vamos apresentar as várias condições físicas do espaço e o campo de radiação que interage com a Terra, além de falar dos experimentos feitos até agora em astrobiologia e seus principais resultados. Comentaremos sobre os experimentos BIOPAN e EXPOSE.

### 2. O CAMPO DE RADIAÇÃO QUE INTERAGE COM A TERRA

O ambiente interplanetário e interestelar é extremamente hostil a sistemas biológicos devido a temperaturas extremamente baixas, radiação solar não filtrada, vácuo, gravidade desprezível entre outros aspectos. Então, testar a resistência de sistemas biológicos e bioquímicos em condições espaciais é extremamente necessário para compreender a possibilidade da existência de vida em outros lugares do Universo.

Muitos dos experimentos feitos em astrobiologia foram executados na Baixa Órbita Terrestre (LEO – *Low Earth Orbit*), que atinge altitudes de cerca de 450 km, que está dentro da região da exosfera. A Tabela 1 apresenta uma relação entre as condições físicas na Terra em LEO e no espaço interplanetário, onde é possível perceber as baixas pressão e gravidade e a alta incidência de radiação cósmica ionizante.

**Tabela 1:** Parâmetros do espaço interplanetário, Terra e LEO (Olsson-Francis & Cockell 2010)

Space parameter	Earth <sup>b</sup>	Low Earth Orbit	Interplanetary space
Pressure (Pa)	$10^3$	$10^{-4}$ – $10^{-6}$	$10^{-14}$
Solar spectra (nm)	> 280	continuum	continuum
Cosmic ionizing radiation (Gy/yr)	$< 10^{-4}$	400–10,000	$\leq 0.1$
Temperature (K)	Wide range <sup>c</sup>	Wide range <sup>d</sup>	> 4
Microgravity (g)	1	$10^{-3}$ – $10^{-6}$	$< 10^{-6}$

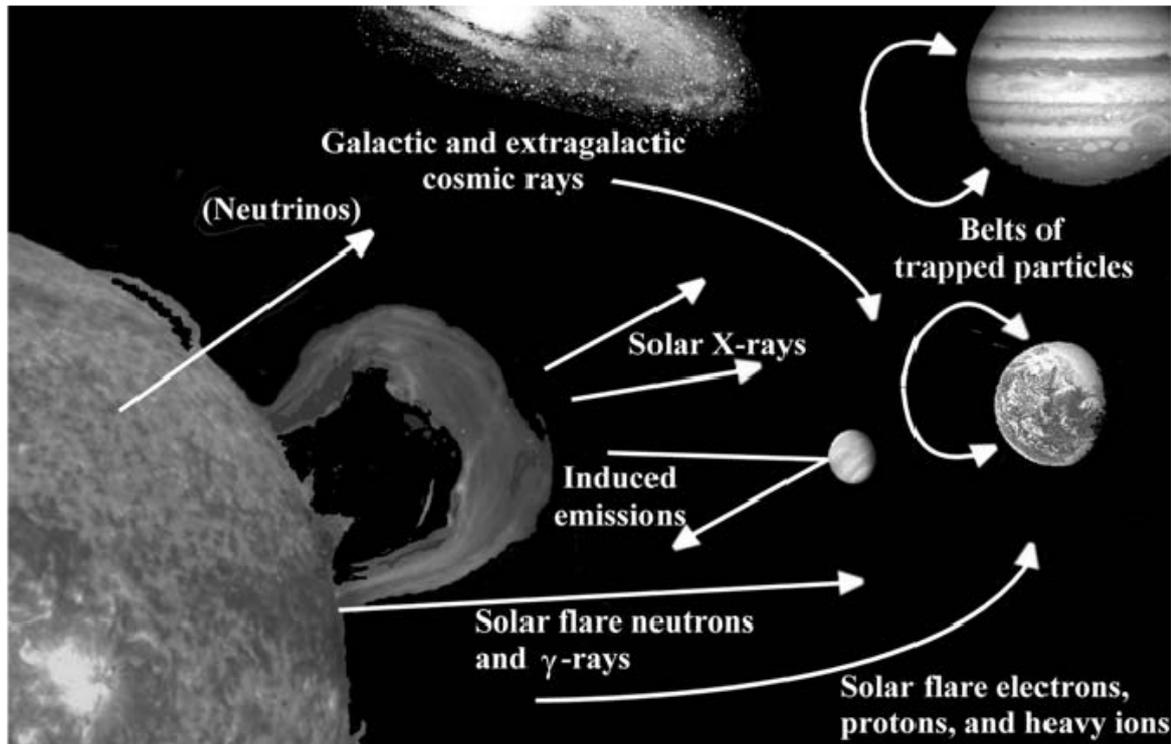
<sup>a</sup> Table adapted from Horneck and Rettberg (2007).

<sup>b</sup> Values at sea level.

<sup>c</sup> Depending on location.

<sup>d</sup> Depending on orientation and distance from the sun.

O campo de radiação cósmica em LEO é bastante diversificado, com radiação cósmica galáctica (GCR – *Galactic cosmic radiation*), radiação cósmica solar (SCR – *solar cosmic radiation*) além de partículas solares altamente energéticas (SPE – *solar particle events*) provenientes de distúrbios magnéticos no Sol. A Figura 1 mostra um esquema da radiação que interage com a Terra.



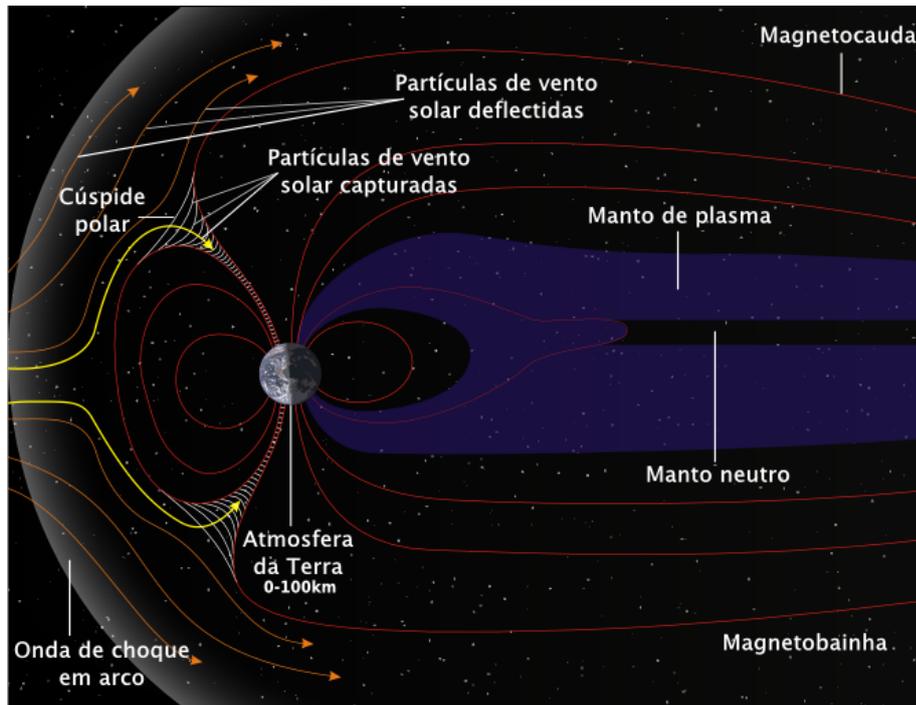
**Figura 1:** Vários tipos de radiação que interagem com a Terra. (Horneck & Rettberg 2007)

## 2.1 Radiação Cósmica Galáctica

Partículas de GCR consistem de 98% de bárions e 2% de elétrons. Da componente bariônica, apenas 0,98% é composta de partículas de alta carga e alta energia (HZE – *High Z Energy*), que são chamadas de raios cósmicos. Sua energia é tão alta que teria condições de penetrar até 1 mm de uma nave espacial. Embora sua contribuição seja extremamente baixa, são considerados os mais perigosos a sistemas vivos, especialmente quando se trata de missões longas e em altas altitudes.

## 2.2 Radiação Cósmica Solar

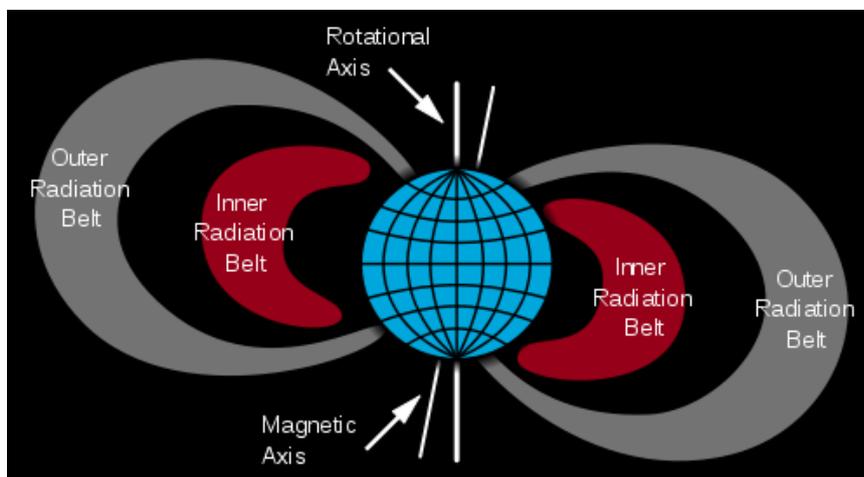
O Sol emite dois tipos de radiação: 1) partículas pouco energéticas que fluem constantemente em direção à Terra e 2) altamente energéticas, que geralmente aparecem dentro do ciclo de 11 anos do máximo solar. Essa última pode alcançar a ordem de 10 GeV, que é perigoso para dispositivos eletrônicos e astronautas. No entanto, objetos em LEO são protegidos pelo campo magnético da Terra. As partículas muito energéticas do Sol se tornam perigosas para órbitas de alta inclinação como as órbitas polares. Nesse caso, órbitas equatoriais são mais protegidas da radiação. A Figura 2 mostra uma ilustração da interação do vento solar e o campo magnético Terrestre. Nessa figura é possível perceber que as partículas que são defletidas pelo campo magnético alongam a estrutura das linhas de campo, mas dependem da pressão imposta pelo vento. Outras partículas são capturadas pelas linhas de campo e são a causa das auroras boreais (Cúspide polar). As órbitas equatoriais acabam tendo mais proteção das linhas de campo, do que as órbitas polares, que estão mais próximas das partículas carregadas.



**Figura 2:** Esquema da estrutura da magnetosfera da Terra, com o vento solar fluindo da esquerda para a direita. ([http://en.wikipedia.org/wiki/File:Structure\\_of\\_the\\_magnetosphere\\_mod.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Structure_of_the_magnetosphere_mod.svg))

### 2.3 Cinturão de Radiação

Além da radiação cósmica e solar, existe uma terceira fonte decorrente da formação do cinturão de van Allen. Ele resulta da interação das GCR e SCR com o campo magnético da Terra e com a atmosfera. Ocorre que alguns prótons e íons são aprisionados pelo campo magnético da Terra. Essas partículas formam dois cinturões de radiação, sendo um interno e outro externo (Figura 3). O cinturão interno consiste de prótons altamente energéticos, que se originam pelo decaimento de nêutrons produzidos quando raios cósmicos vindos do espaço exterior colidem com átomos e moléculas da atmosfera terrestre. Parte dos nêutrons é ejetada para fora da atmosfera e se desintegra em prótons e elétrons ao atravessar esta região do cinturão. Essas partículas se movem em trajetórias espirais ao longo de linhas de força do campo magnético terrestre. O cinturão externo contém partículas eletricamente carregadas de origem tanto atmosférica quanto solar. São principalmente íons de hélio trazidos pelo vento solar. Elétrons, prótons e íons podem atingir cerca de 7 MeV, 200 MeV e 50 MeV, respectivamente.



**Figura 3:** Estrutura esquemática do cinturão de radiação de van Allen. ([http://en.wikipedia.org/wiki/File:Van\\_Allen\\_radiation\\_belt.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Van_Allen_radiation_belt.svg))

Missões espaciais em LEO recebem cerca de 20 mSv de radiação por mês. A situação é mais crítica na região de Anomalia do Atlântico Sul, onde uma nave espacial recebe cerca de 90% de toda a radiação produzida pelo anel interno de van Allen.

### 3. CONDIÇÕES FÍSICAS ESPACIAIS (VÁCUO, TEMPERATURA E GRAVIDADE)

Na Tabela 1 foi mostrado que as condições de vácuo em LEO e no meio interplanetário são muito baixas, da ordem de  $10^{-6}$  Pa. Se a pressão atinge valores abaixo da pressão de vapor, os átomos ou moléculas de um certo material vaporizam. Isso implica em desidratação de sistemas biológicos no espaço.

A temperatura é outro ponto crítico para a vida fora da Terra. Em LEO, a fonte de energia inclui a radiação solar ( $1360 \text{ W/m}^2$ ), albedo da Terra ( $480 \text{ W/m}^2$ ) e radiação terrestre ( $230 \text{ W/m}^2$ ). Como o intervalo da órbita é pequeno (90 minutos), uma nave espacial experimenta violentas variações de temperaturas quando está exposta ao Sol e quando está na sombra da Terra.

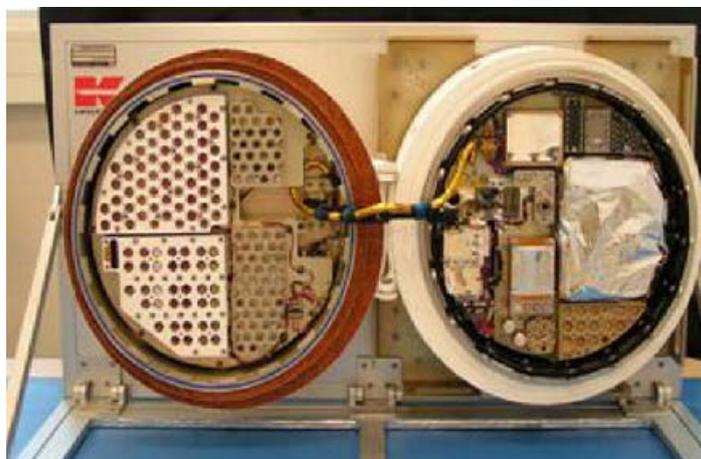
No contexto de gravidade, muitos fenômenos são possíveis graças ao efeito da gravidade. Como exemplo, temos o aprisionamento do gás oxigênio, necessário para a respiração, sedimentação, pressão hidrostática e convecção.

### 4. EXPERIMENTOS ESPACIAIS EM ASTROBIOLOGIA

A corrida espacial motivada por questões políticas, iniciada em 4 de outubro de 1957 com o satélite *Sputnik*, possibilitou o avanço da tecnologia espacial. Atualmente, já é possível fazer experimentos com material biológico em condições naturais do espaço interplanetário. Nessa seção vamos apresentar os principais experimentos até agora realizados e a importância dos seus resultados.

#### 4.1 Experimento de curto período: BIOPAN

Biopan são experimentos de exposição de material biológico às condições do espaço, executados pela ESA. Eles são feitos na baixa órbita terrestre (LEO) por um período de até duas semanas. As estruturas dos experimentos voam nos veículos espaciais da classe Foton e são lançados com o foguete Soyuz. Uma vez em LEO, a tampa da estrutura onde estão os sistemas biológicos é aberta em  $180^\circ$  (Figura 4) para expor os sistemas ao ambiente espacial hostil.



**Figura 4:** Tampa do módulo BIOPAN. (Olsson-Francis & Cockell 2010)

As amostras estão localizadas em duas placas (lado esquerdo da Figura 4) da tampa do módulo BIOPAN. As amostras da placa de baixo estão protegidas contra a radiação UV. Na placa de cima, as amostras são cobertas por: (i)  $MgF_2$  que é transparente a radiação UV de  $\lambda > 110$  nm; (ii) filme transparente a UV de  $\lambda > 200$  nm para simular a radiação UV na superfície de Marte, (iii) filme para simular a radiação UV na Terra (controle) e (iv) filme que corta toda a radiação UV.

Após o período de experimento, o módulo BIOPAN é fechado e protegido durante a reentrada na atmosfera terrestre. Após aterrissar o material é levado para o laboratório para análises.

No total, foram 5 as missões BIOPAN: 1994, 1997, 1999, (2002 falhou no lançamento), 2005 e 2007. Os experimentos microbiológicos foram: *Survival*, *Yeast*, *Marstox*, *Photo*, *Lichens*, *Permafrost*, and *Lithopanspermia*. O objetivo do experimento *Survival* foi de fornecer uma visão geral dos fatores limitantes do espaço. Foram usados esporos de *B. subtilis* e dois halófilos *Synechococcus* e *Haloarcula-G* embebidos/não embebidos em argila, pó de meteorito, cristais de sal e solo marciano simulado. As amostras foram expostas ao ambiente espacial com e sem UV. As amostras de esporos desprotegidos morreram, mas as protegidas pela argila sobreviveram. As amostras desprotegidas dos halófilos foram perdidas, mas as protegidas sobreviveram. Esporos de *B. Subtilis* usados no experimento *Marstox* (condições da superfície marciana) sobreviveram quando misturadas à argila, pó de meteorito e rochas.

No experimento *Lichens*, *Rhizocarpon geographicum* e *Xanthoria elegans* foram expostas ao espaço. O resultado mostrou que houve a mesma atividade fotossintética com os líquens de controle. Outro líquen, *Saccharomyces cerevisiae*, foi exposto à radiação no experimento *Yeast*, com alguns miligramas de proteção. Houve a morte de toda a amostra.

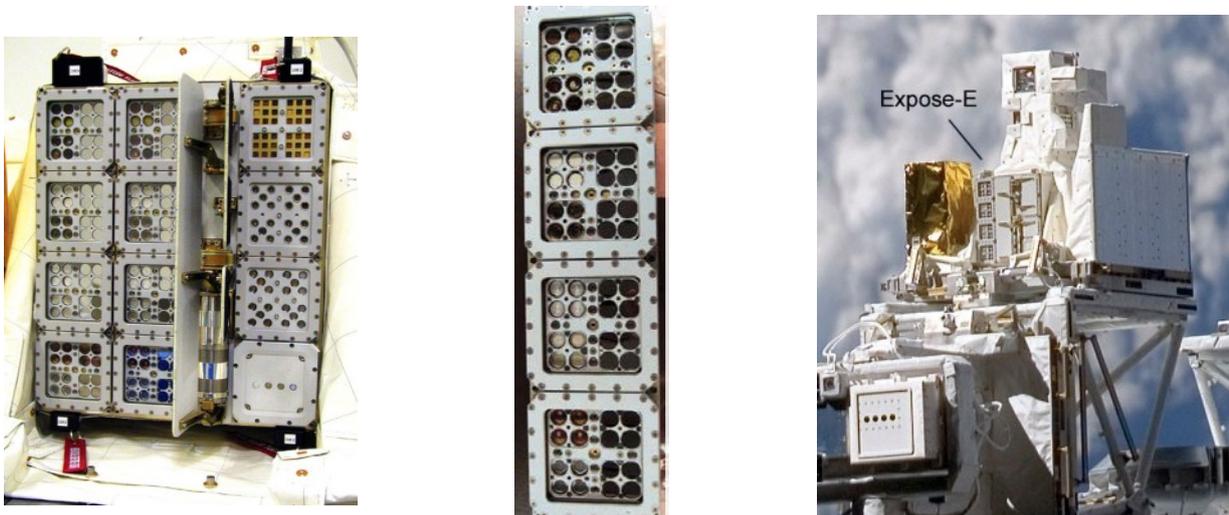
O experimento de litopanspermia queria investigar a sobrevivência de microorganismos em viagens espaciais. Espécies de líquens, como *R. geographicum*, *X. elegans* e *Aspicilia fruticulosa*, sobre suas rochas naturais, sobreviveram às condições de LEO.

Outro resultado importante da missão BIOPAN de 2007 foi a sobrevivência do tardigrado, após ser exposto às condições espaciais (Jönsson et al. 2008). Este resultado inclui-o como o primeiro animal na exclusiva e pequena lista de organismos que podem sobreviver ao ambiente espacial.

#### 4.2 Experimento de longo período: EXPOSE

EXPOSE foi o último dispositivo desenvolvido pela ESA para fazer experimentos em sistemas biológicos de longa duração no espaço. Foram desenvolvidos dois equipamentos: EXPOSE-E e EXPOSE-R, sendo ambos instalados na parte externa da ISS. Um no módulo europeu Columbus (E) e outro no módulo Russo Zvezda (R). Cada um desses equipamentos possui uma diversificada quantidade de experimentos, expondo moléculas sólidas, misturas gasosas ou sistemas biológicos às condições do espaço.

O módulo EXPOSE-E onde ficam armazenados os micro-organismos está mostrado na Figura 5.



**Figura 5: Esquerda** - Bandejas do EXPOSE-E cheias de micro-organismos. O módulo possui três partes com vários tipos de sistemas biológicos. Fonte: <http://astrobob.areavoices.com/tag/expose-e/>  
**Centro** – Bandeja 2 com os experimentos ADAPT, PROTECT e LIFE. (Rabbow et al. 2012)  
**Direita** – Módulo do EXPOSE-E na ISS. (<http://astrobob.areavoices.com/tag/expose-e/>)

Os experimentos do EXPOSE-E são:

- **Processo** – estudo dos efeitos da radiação UV solar sobre aminoácidos e outros compostos orgânicos na órbita terrestre;
- **Adaptação** – estudo da radiação sobre micro-organismos;
- **Proteção** – estudo de esporos nas condições do espaço e sua habilidade de recuperação após o período de exposição;
- **Vida** – estudo dos efeitos da radiação sobre líquens e cogumelos;
- **Sementes** – expor sementes às condições do espaço e estudar sua capacidade de resistência;
- **Dose** – estudar a radiação e sensores de radiação.

Os experimentos do EXPOSE-R são (Dados ainda não disponíveis):

- **Amino** – estudo dos efeitos da radiação UV solar sobre aminoácidos e outros compostos orgânicos na órbita terrestre;
- **Endo** – estudo dos efeitos da radiação sobre micro-organismos que vivem abaixo da superfícies de rochas;
- **Osmo** – estudar a exposição de organismos que vivem em meios de alta concentração de açúcar;
- **Esporos** – estudar esporos localizados dentro de meteoritos artificiais;
- **Subtil** – estudar efeitos de mutação nas condições do espaço do esporo de bactérias *Bacillus subtilis*;
- **Pur** – estudar o efeito do ambiente espacial sobre T7 phage e seu DNA;
- **Orgânico** – estudar a evolução de matéria orgânica no espaço;
- **IMBP** – exposição dos organismos terrestres sobre o *matent state*.

O EXPOSE-E foi lançado 7 de fevereiro de 2008 e retornou à Terra em 12 de setembro de 2009, após ter passado um ano e meio no espaço. Os resultados nas análises foram publicados recentemente numa edição especial do *Astrobiology Journal*. As bandejas das bordas (Figura 5 Esquerda) fazem experiências de vácuo, radiação solar e radiação cósmica e a bandeja do centro simula as condições marcianas.

#### 4.2.1 Resultados do EXPOSE-E

##### Processo

No experimento de Processo, algumas questões importantes foram esclarecidas. **1)** A entrega exógena de material importante para a vida ainda é um ponto forte que contribui para a teoria da panspermia, pois nos experimentos, os aminoácidos que estavam protegidos pelo pó de meteorito foram protegidos contra a radiação intensa do Sol. Os compostos mais alterados foram o dipeptídeo, ácido aspártico e ácido aminobutírico. Os que apresentaram mais resistência foram alanina, valina, glicina e ácido aminoisobutírico. Dessa forma pode-se pensar que os compostos importados para a Terra, meteoritos, micrometeoritos e cometas, poderiam de alguma forma, passar por uma seleção, de forma que os que chegassem à Terra fossem os mais resistentes. **2)** A pesquisa por moléculas orgânicas na superfície

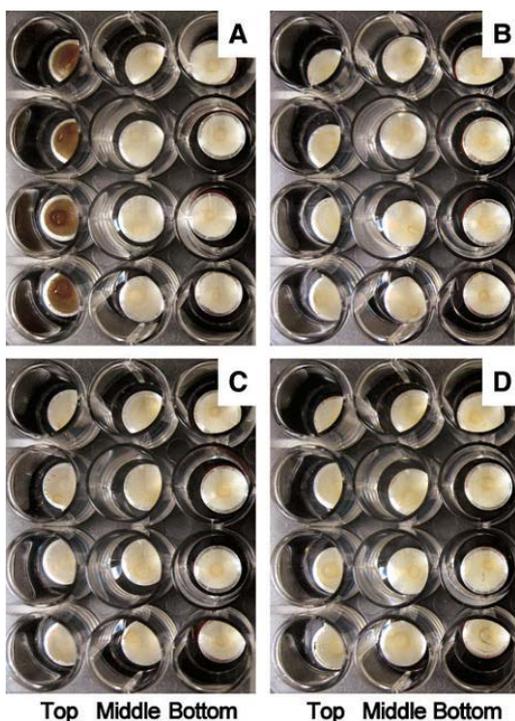
de Marte precisa ser bastante cautelosa devido às abundâncias que deve-se esperar. Aminoácidos como glicina, serina, ácido ftálico natural e na fase mineral e ácido melítico, foram expostos à radiação nas condições da superfície de Marte. Todas as amostras foram completamente desintegradas após o período de um ano e meio. 3) Foram feitas experiências com amostras na fase gasosa, simulando a evolução das atmosferas planetárias na presença da radiação solar. Para o experimento, foram preparadas amostras da atmosfera de Titã. Os resultados foram consistentes do que já é conhecido em laboratório. Então, essas medições vão abrir novos caminhos para novos experimentos em outras missões.

### Adaptação

O segundo foi o experimento de adaptação, usando esporos de *Bacillus Subtilis*. Eles foram expostos à radiação solar diretamente e também foi simulado o ambiente de Marte. A sobrevivência dos esporos foram determinadas pela formação de colônias após a retirada do material. Ficou muito claro que a radiação solar UV ( $\lambda > 110$  nm) como também o espectro marciano ( $\lambda > 200$  nm) é o fator mais deletério. Quando aplicada uma blindagem nos dois conjuntos, houve 8% de sobrevivência para o sistema em LEO e 100% para o ambiente marciano.

### Proteção

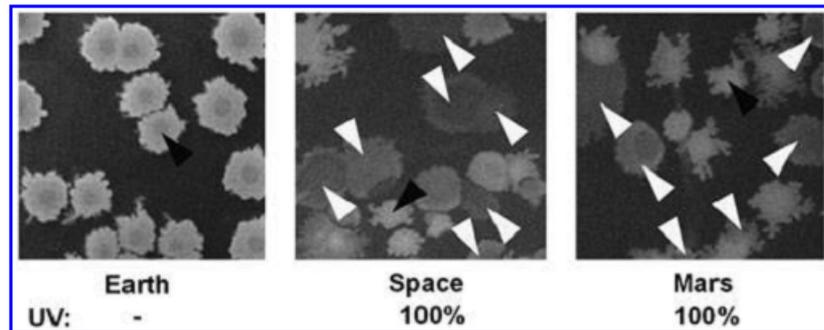
Um dos experimentos de proteção investigou a capacidade de esporos de bactérias sobreviverem a uma viagem até Marte “escondidas” em compartimentos protegido da radiação solar, em alguma missão de reconhecimento das agências espaciais. O resultado mais uma vez mostrou que a radiação solar é o principal fator deletério na sobrevivência desses organismos. Foram feitos experimentos de uma viagem até Marte e quando eles estivessem em Marte. Foram usados esporos de *B. subtilis* e *B. pumilus*. Aqueles que foram expostos diretamente a radiação solar durante uma viagem à Marte, diminuíram 3 ordens de grandeza, mas os que estavam protegidos apresentaram 50% de sobrevivência como foi o caso de *B. subtilis* e 15% no caso de *B. pumilus*. Os esporos em Marte o resultado foi de 70-75% de sobrevivência, protegidos ou não. A Figura 6 mostra a mudança de cor do conjunto de esporos nas várias situações. Cada amostra possuía três camadas (cima – top, meio – middle e fundo - bottom).



**Figura 6:** Foto das camadas de esporos de *B. subtilis* durante a missão EXPOSE-E. **A)** Durante a viagem à Marte sem proteção. **B)** Durante a viagem à Marte com proteção. **C)** Em Marte sem proteção. **D)** Em Marte com proteção. (Horneck et al. 2012)

É possível ver na Figura 6-A, que os esporos que foram expostos diretamente à radiação solar foram os que menos sobreviveram. Os demais protegidos pelo equipamento ou pela atmosfera marciana apresentaram alto índice de sobrevivência.

Em outra parte do experimento de Proteção foram analisados efeitos de mutação no esporo de *Bacillus Subtilis*. O primeiro resultado foi que após a irradiação solar, no espaço ou em Marte, os esporos sofrem mutação espontânea para a rifampicina, um antibiótico bactericida contra a tuberculose. Outro resultado importante, que está mostrado na Figura 7, é a deficiência de esporulação da *B. Subtilis* 168. Quando esses esporos estão em na Terra suas capacidades são conformes as esperadas, o que não ocorre nas condições do espaço e nem na superfície de Marte, com a incidência de 100% da radiação solar. Nesse caso, a deficiência de esporulação pode ser considerado um evento potencialmente letal.



**Figura 7:** Morfologia da colônia de *B. Subtilis* 168. Amostras de referência na Terra (Esquerda) sem incidência de UV, no espaço (Centro) recebendo toda a radiação UV e em Marte (Direita) sem proteção contra UV na superfície marciana. As setas brancas indicam deficiência de esporulação e as pretas capacidade de esporulação de um tipo selvagem de *B. subtilis*. (Moeller et al. 2012)

### Vida

O experimento LiFE (Lichens and Fungi Experiment) usou rochas da Antártida colonizada por comunidades criptoendolíticas. Foram feitos experimentos nas condições espaciais e Marte simulado. Após 1,5 anos no espaço as amostras foram recolhidas e hidratadas novamente. Após as exposições foram encontradas três colônias de fungos com uma pálida coloração rosa. Essa amostra foi exposta às condições de vácuo do espaço, mas sem incidência de radiação. Nas condições marcianas foi encontrada uma colônia de alga verde unicelular. Todas as outras amostras não formaram colônias após a incubação. Os dados extraídos do experimento LiFE fornece informações importantes sobre a possibilidade de vida eucariótica ser transferida de um planeta para outro em rochas e também sobre a sobrevivência dessa forma de vida no ambiente marciano.

### Sementes

Nesse parte do experimento foram feitas análises com sementes de plantas. O resultado foi que após 1.5 anos de exposição à radiação UV solar, radiação cósmica galáctica flutuações de temperatura e vácuo, as sementes germinaram. Das 2100 sementes de *Arabidopsis thaliana* e *Nicotiana tabacum* (tobacco), 23% produziram plantas após retornarem à Terra. A maior sobrevivência foi do tabaco (44%). Aquelas sementes que foram protegidas contra a radiação solar, tiveram a germinação atrasada, mas houve 100% de sobrevivência, o que indica que as sementes poderiam sobreviver durante uma viagem hipotética de Marte para a Terra.

## 5. OUTROS EXPERIMENTOS COM SISTEMAS BIOLÓGICOS

Muitos outros experimentos em Astrobiologia foram feitos com os mais diversificados fins e métodos. A tabela 2 do trabalho de Olsson-Francis & Cockel resume os tipos de experiências feitas em LEO até 2010, o ano em que o artigo foi publicado. Os resultados para o EXPOSE-E não foram apresentados na época porque não havia dados disponíveis, mas essa parte pôde ser desenvolvida nesta aula.

Para experimentos feitos na Terra, recomenda-se consultar o mesmo artigo de Olsson-Francis & Cockel supracitado e sua tabela 4, na qual os autores expõem uma lista de experimentos realizados desde 1958 com o fim de investigar respostas biológicas a condições extraterrestres simuladas. Uma fotografia trazida pelos dois autores como um exemplo de aparato experimental atual para simulação de ambientes espaciais em laboratório é reproduzida aqui como Figura 8.



**Figura 8:** Câmara experimental de Marte simulado na *Open University* (Reino Unido). A câmara mede 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura. (Olsson-Francis & Cockel 2010)

Foram feitos ainda experimentos simulando a ejeção de material para o espaço na teoria da panspermia (Horneck et al. 2008), o processo de reentrada na atmosfera (Horneck e Rettberg 2007) e a resistência da bactéria *Deinococcus Radiodurans* contra o campo de radiação do meio interplanetário (Paulino-Lima et al. 2010). Em todos os experimentos, não há dúvidas de que bactérias, esporos de bactérias e até mesmo animais podem sobreviver às condições hostis do espaço.

## 6. Conclusões

Vimos nesse trabalho alguns dos vários experimentos feitos até agora no contexto de astrobiologia. Trabalhos feitos em solo, simulando ambientes espaciais e até mesmo nas condições reais do espaço mostram claramente a grande possibilidade de que material biológico sobreviva em ambientes hostis para os humanos. Todos os dados apresentados corroboram para a ideia de que um dos mecanismos pelos quais a vida começou na Terra foi o de entrega exógena de material biológico ou blocos construtores da vida. Desse modo, a panspermia é uma das teorias de origem da vida que tem ganhado força com as novas descobertas feitas com os experimentos em Astrobiologia.

## 7. Referências

- Olsson-Francis & Cockel. Experimental methods for studying microbial survival in extraterrestrial environments. **Journal of Microbiological Methods**. 2010.
- Horneck et al. Microbial Rock Inhabitants Survive Hypervelocity Impacts on Mars-Like Host Planets: First Phase of Lithopanspermia Experimentally Tested. **Astrobiology**. 2008.
- Horneck & Rettberg. Complete Course in Astrobiology. **Livro**. 2007.
- De la Torre et al. BIOPAN experiment LICHENS on the Foton M2 mission Pre-flight verification tests of the *Rhizocarpon geographicum*-granite ecosystem. **Science Direct**. 2007.
- Scalzi et al. LIFE Experiment: Isolation of Cryptoendolithic Organisms from Antarctic Colonized Sandstone Exposed to Space and Simulated Mars Conditions on the International Space Station. **Orig Life Evol Biosph**. 2012.
- Paulino-Lima et al. Laboratory simulation of interplanetary ultraviolet radiation (broad spectrum) and its effects on *Deinococcus radiodurans*. **Planetary and Space Science**. 2010.
- Horneck et al. Resistance of Bacterial Endospores to Outer Space for Planetary Protection Purposes—Experiment PROTECT of the EXPOSE-E Mission. **Astrobiology**. 2012.
- Moeller et al. Mutagenesis in Bacterial Spores Exposed to Space and Simulated Martian Conditions: Data from the EXPOSE-E Spaceflight Experiment PROTECT. **Astrobiology**. 2012.
- Nicholson et al. Transcriptomic Responses of Germinating *Bacillus subtilis* Spores Exposed to 1.5 Years of Space and Simulated Martian Conditions on the EXPOSE-E Experiment PROTECT. **Astrobiology**. 2012.
- Wassmann et al. Survival of Spores of the UV-Resistant *Bacillus subtilis* Strain MW01 After Exposure to Low-Earth Orbit and Simulated Martian Conditions: Data from the Space Experiment ADAPT on EXPOSE-E. **Astrobiology**. 2012.
- Bertrand et al. The PROCESS Experiment: Exposure of Amino Acids in the EXPOSE-E Experiment on the International Space Station and in Laboratory Simulations. **Astrobiology**. 2012.
- Noblet et al. The PROCESS Experiment: Amino and Carboxylic Acids Under Mars-Like Surface UV Radiation Conditions in Low-Earth Orbit. **Astrobiology**. 2012.
- Cottin et al. The PROCESS Experiment: An Astrochemistry Laboratory for Solid and Gaseous Organic Samples in Low-Earth Orbit. **Astrobiology**. 2012.
- Rabbow et al. EXPOSE-E: An ESA Astrobiology Mission 1.5 Years in Space. **Astrobiology**. 2012.
- Tepfer et al. Survival of Plant Seeds, Their UV Screens, and nptII DNA for 18 Months Outside the International Space Station. **Astrobiology**. 2012.
- Jönsson et al. Tardigrades survive exposure to space in low Earth orbit. **Current Biology**. 2009.