

# 特集「古今未曾有の日本の月/火星地下世界探査 (UZUME) 計画」 月縦孔地形による放射線防護効果

内藤 雅之<sup>1</sup>, 長谷部 信行<sup>2</sup>, 天野 嘉春<sup>3</sup>, 小平 聡<sup>1</sup>

2020年6月26日受領, 査読を経て2020年7月25日受理

(要旨) 本研究では月面と縦孔周辺における放射線環境について考察した。月面は大気や磁場がなく、銀河宇宙線や太陽粒子線といった高エネルギー粒子に直接さらされる過酷な放射線環境である。月面における放射線被ばく量は実効線量当量で約420 mSv/y (太陽活動極小期)であり、こうした放射線環境に長期間人類が滞在するためには放射線防護と被ばく量の管理が不可欠である。見積りの結果、縦孔内の被ばく量は概ね一次粒子の立体角と共に減少した。マリウス丘で観測された縦孔を仮定した場合、孔の底の被ばく量は最大で約25 mSv/yとなり、Alの防護壁に換算すると約1 mに相当する防護効果が得られることが明らかになった。縦孔環境は放射線防護の観点から有望であり、将来の長期間の有人探査において重要であるといえる。本研究は、これから行われようとしているUZUME計画に重要な科学的知見を与えるものである。

## 1. 宇宙の放射線環境

月面をはじめとする宇宙空間は銀河宇宙線(GCR: Galactic Cosmic Ray)や太陽粒子線に直接さらされる放射線環境である。これらの宇宙放射線は地球上では厚い大気と磁場によって遮蔽されているので、地表における宇宙放射線由来の年間被ばく量は約0.39 mSv/yである。国際宇宙ステーションが周回する地球低軌道は地球磁場によってこれらの粒子の一部は遮蔽されているが、月や深宇宙ではこれらによる遮蔽効果は得られない。Mars Science Laboratory (MSL)の航行期間中の観測によれば、深宇宙における定常被ばくの線量率は約660 mSv/yである[1]。重篤な放射線被ばくは深刻な健康被害を及ぼす可能性があるため、将来の有人宇宙滞在を

考えたとき、宇宙放射線による被ばくは探査期間を制限する要素の一つである。従って、長期間の宇宙滞在には、乗組員の放射線防護と被ばく量の管理が不可欠である。

銀河宇宙線は太陽系外から定常的に飛来する粒子群で、そのほとんどが高エネルギーの荷電粒子によって構成される。構成粒子の約87%が陽子、約12%がヘリウム核、残りの約1%がリチウム以上の重粒子成分である[2]。銀河宇宙線粒子は太陽風が引き延ばした惑星間磁場と相互作用して変調されるため、太陽活動に依存してその強度が変化する。太陽活動は約11年を周期として極大と極小を繰り返しており、銀河宇宙線の強度は太陽活動極大期に極小となり、極小期に極大となる。太陽活動極小期と極大期における銀河宇宙線のフラックスはそれぞれ5 particles/cm<sup>2</sup>/sと2 particles/cm<sup>2</sup>/s程度である[3]。銀河宇宙線粒子のエネルギースペクトルは複数のモデルが構築されており、数百MeV/nにピークをもち、10 GeV/n 以上の高エネルギーでは冪型

1.量子科学技術研究開発機構,

2.早稲田大学先進理工学部物理学科,

3.早稲田大学基幹理工学部機械科学・航空宇宙学科

naito.masayuki@qst.go.jp

スペクトルである[3, 4].

太陽粒子線は爆発的な太陽活動によって太陽表面から宇宙空間へ放出される粒子群である。ほとんどの太陽粒子は10 MeV/n以下であり、固体や液体中の飛程\*が $\mu\text{m}$ 程度と短い。そのため防護が容易であり、放射線被ばくとして問題になることはあまりない。しかしながら、大規模な太陽フレアやコロナ質量放出などの太陽イベントに伴い、GeV/nを超える高エネルギー粒子(SEP: Solar Energetic Particle)が大量に放出される。一部の大規模イベントではSEPのフラックスが極めて大きく、二次粒子(中性子)の線量率が短時間で上昇するイベントとして地上で観測される。これらをGLE(Ground Level Enhancement)イベントと呼んでいる。GLEイベントは1951年に中性子モニターが導入されて以来、約70年間で70以上が観測されている[5]。こうしたイベントは地表で観測されるものだが、地球周回の月表面でも同様に大規模な粒子イベントとして観測されるだろう。これまでの地球周回衛星による観測では1イベントで最大 $10^{10}$  particles/cm<sup>2</sup>近いフラックスのGLEイベントが報告されており[6]、大規模イベントでは被ばく量も大きくなる懸念される。

これらの放射線から身を守るための手段として、放射線遮蔽材による受動的な防護や電場・磁場を用いた能動的な防護が検討されてきた[7, 8]。特に月面に関しては、月面物質や月の溶岩洞を放射線防護に利用することが有望である[9, 10]。かぐや(SELENE)の観測によって発見された縦孔地形は、その成因から地下の溶岩洞へと続いていると考えられている[11]。溶岩洞の内部は低線量率な放射線環境に加え、安定した温度環境と微小隕石から身を守ることが可能であり、過酷な宇宙環境で人類が滞在するための候補地として有望視されている[9]。

これまでに月の溶岩洞を利用した放射線防護が検討されている一方、その入り口としての縦孔とその周辺領域の放射線環境は十分な検討がなされていない。そこで本研究では、月面と縦孔周辺領域の放射線線量率を数値シミュレーションによって見積もり、それらを比較することで縦孔地形による放射線防護効果を評価した。

## 2. 放射線線量率の見積もり

月面の放射線はその成因によって以下の3つに大別される。

- ① 月外部由来の放射線
- ② 外部由来の放射線が月物質と相互作用することによって生じる二次放射線
- ③ 月面の天然放射性核種の崩壊によって生じる放射線

①は銀河宇宙線と太陽粒子線が代表的であり、②にはこれらの高エネルギー粒子が月物質の原子核と核破砕反応を起こすことで生成する軽い原子核の他、中性子、電子、ガンマ線、 $\pi$ 粒子、 $\mu$ 粒子などが含まれる。二次粒子の中で最も影響の大きいのは中性子である。これらは一連の数値シミュレーションによってその被ばく量を見積もることが可能である。

核破砕反応による高速中性子の生成率は一般に標的となる物質の平均原子量が大きいほど大きくなる。実際、月面ではFeやTiに富む玄武岩質の海の方がAlやCaに富む斜長石質の高地よりも高速中性子の存在量が大きくなるのが観測によって示されている[e.g., 12]。本研究では線量率のワーストケースとしての見積もりを得るため、海の月面組成としてアポロ12号のリターンサンプルの元素組成[13]を採用した。一方で、Slaba et al.[14]は様々な月面の元素組成に対して線量率を計算し、元素組成の二次粒子線量率への寄与は最大で銀河宇宙線に対しては9%、GLEイベントに対しては6%と見積もっている。このことから、月面元素組成について二次粒子が線量率に与える影響は大きくないことが明らかになっている。

銀河宇宙線と代表的なGLEイベントを一次粒子として月面と縦孔地形周辺に照射し、一次粒子と二次粒子による月面線量率と縦孔内の線量空間分布を数値シミュレーションによって見積もった。粒子の輸送と生成の計算には粒子・重粒子輸送計算コードPHITS ver.3.17[15]を用いた。図1に計算に用いたジオメトリの概念図を示す。縦孔の大きさは $\phi 50\text{ m} \times 43\text{ m}$ (マリウス丘の縦孔)とし、孔の底から水平に高さ17 mの溶岩洞へつなぐと仮定した[16]。月面の線量計算は縦孔領域外の月面上 $\phi 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ を観測領域として実効線量当量を得た。

\* 物質中を粒子が走る平均の距離

図2に本研究で使用した一次粒子のエネルギースペクトルを示す。銀河宇宙線のスペクトルはDLRモデル[3]を使用した。太陽活動極大期(2001年)と極小期(2010年)のスペクトルについて、水素から鉄までの原子核を一次粒子として照射した。GLEイベントとして、定量的なスペクトルが得られている近年のイベントから比較的強度の大きい2000年7月、2003年10月、2005年1月のGLEを選択した[6]。エネルギー領域は銀河宇宙線・GLEイベントともに10 MeV/nから10 GeV/nまでとした。

③はK, Th, U系列の放射性核種由来のガンマ線が主である。これらの元素存在量はこれまで複数のガンマ線観測によって月面の存在量分布が求められており[e.g., 17, 18], その存在量から線量率を推定可能である。これらの不適合元素は共通してコペルニクスの南東部周辺(フラマウロ地域)で最大濃度が観測されている。今回は線量率が最大になる場合を仮定するため、K, Th, Uについてそれぞれ観測値の最大となる4,300 ppm, 13 ppm, 7.3 ppmを採用し、線量率を求めた。

それぞれの放射線の存在量から線量への換算には国際放射線防護委員会の2013年勧告[19]によって得られた、人体モデルへ等方照射したときの実効線量当量への変換係数を用いた。

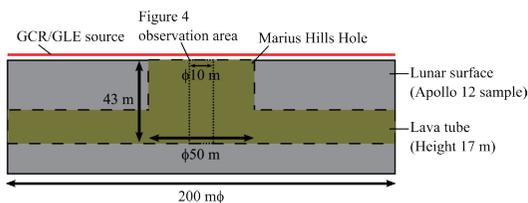


図1: 数値シミュレーションのジオメトリ。

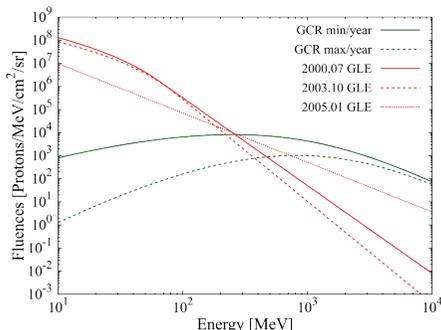


図2: 銀河宇宙線(太陽活動極小期: GCR min, 極大期: GCR max)とGLEの陽子スペクトル[3, 6]。

### 3. 月面の放射線線量率

銀河宇宙線とGLE粒子照射時の一次粒子・二次粒子による月面の縦孔領域外での線量率をそれぞれ表1に示す。定常被ばくである銀河宇宙線による線量率は太陽活動極小期で416 mSv/y、極大期でも161 mSv/yとなった。極小期の一次粒子による被ばく量は356 mSv/yであり、Zeitlin et al.[1]によって見積もられた深宇宙での被ばく量の約半分である。月によって銀河宇宙線の半分は遮蔽されているため、実測値と比較して矛盾しない結果が計算で得られている。JAXAの規定する宇宙飛行士の生涯被ばく量の制限は表2の通りである[20]。これらの比較からも、月面での長期間の滞在を考えた場合、戦略的な放射線防護と被ばく量管理の必要性は明らかである。

GLEイベントによる被ばく量は銀河宇宙線による線量率と比較して大きく、1 Svを超えるイベントもみられる。一方で、GLEイベントによる被ばくはほとんどが一次粒子によるものであり、二次粒子の寄与は小さい。それに対して、銀河宇宙線は二次粒子の線量率が全体の20%前後を占める。この違いは銀河宇宙線とGLE粒子のエネルギー分布の違いに起因するものである。図2からもわかるように、GLE粒子はいずれも100 MeV以下の低エネルギー領域の粒子の占める割合が大きい。100 MeV以下の陽子の核破碎反応断面積は小さいため、GLEの線量への二次粒子の寄与が小さくなったと考えられる。太陽活動極小期と極大期の銀河宇宙線で比較しても、極大期の方が二次粒子線量率の占める割合が大きくなっている。図2から、極大期の方が極小期よりも高エネルギー粒子の占める割合が大きいことがわかるため、合理的である。

一次粒子のエネルギー分布の違いは遮蔽材を用いた際の防護効果にも表れる。図3はアルミニウムとポリエチレンを遮蔽材として用いた場合の太陽活動極小期の銀河宇宙線と3つのGLEの線量率の変化である。エネルギーの低い粒子の割合が大きい2000年7月と2003年10月のGLEイベントは10 g/cm²以下の遮蔽で被ばく量を10%以下まで低減可能だが、銀河宇宙線や2005年1月のGLEイベントのような高エネルギー成分が大きいイベントでは遮蔽効

果が小さいことが分かる。これらの遮蔽効果の差は入射粒子の飛程の長さの違いに起因する。

表1と図3から分かる通り、GLEイベントによる線量は非常に大きい。遮蔽材を用いたGLE粒子の防護は十分現実的である。従って、有人宇宙滞在に際しては太陽活動を定常的に観測し、大規模イベント時には一時的に防護壁内に退避することで重篤な被ばくを避けることができる。

天然放射性元素由来のガンマ線による線量率は計算によって0.32 mSv/yと求められた。表1の値との比較から分かる通り、天然放射性元素由来の線量率は銀河宇宙線やGLE粒子による線量率と比較して3桁から4桁小さい。従って、月面における被ばく量の位置による変動は元素組成の違いによる二次粒子の線量率にのみ依存すると考えてよい。Slaba et al.[14]から、月面線量の変動は全体としては数%のオーダーであると推定されるため、月全球の線量率は概ね一様であるといえる。ただし、本研究で対象としている縦孔地形など、月面に存在する地形が一次粒子の一部を遮蔽することによって局部的に低線量領域を形成することは考えられる。

### 4. 縦孔とその周辺の線量分布

ここまでの結果から分かるように、一次粒子がGLE粒子の場合には二次粒子はほとんど発生しない。縦孔内部の一次粒子による線量空間分布は、イベントが変わっても線量率の絶対値が変わるのみで、ほとんど同様の分布を示すと考えられる。従って、縦孔領域の線量分布については銀河宇宙線の太陽活動極小期のみを扱い、その結果を一次粒子と二次粒子に分けて記載する。それぞれについて別の粒子イベントの月面線量率で規格化することで、縦孔領域のそのイベントの線量分布を概ね推定は可能である。

図4に縦孔中央φ10 m の線量率の深さ依存性を示す。線量率は一次粒子・二次粒子ともに深さと共に減少し、全線量率は孔の底で約25 mSv/yと、月面縦孔領域外の10%以下になった。遮蔽材によって線量率を10%まで低減するには、アルミニウムなら約250 g/cm<sup>2</sup>、ポリエチレンなら約150 g/cm<sup>2</sup>が必要である(図3)。この厚さの遮蔽材を月面に直接持ち込むことは輸送コストが大きくなり、現実的ではない。こ

|    | GCR<br>(太陽活動極小期) |      | GCR<br>(太陽活動極大期) |     | 2000.07. GLE |      | 2003.10. GLE |      | 2005.01 GLE |      |
|----|------------------|------|------------------|-----|--------------|------|--------------|------|-------------|------|
|    | 実効線量             |      | 実効線量             |     | 実効線量         |      | 実効線量         |      | 実効線量        |      |
|    | 当量<br>(mSv/y)    | 誤差   | 当量<br>(mSv/y)    | 誤差  | 当量<br>(mSv)  | 誤差   | 当量<br>(mSv)  | 誤差   | 当量<br>(mSv) | 誤差   |
| 一次 | 356              | 16.6 | 125              | 4.3 | 2330         | 134  | 1610         | 92.9 | 194         | 13.6 |
| 二次 | 59.6             | 6.7  | 35.8             | 1.6 | 26.2         | 21.8 | < 0.1        | ---- | 3.9         | 3.4  |
| 計  | 416              | 17.7 | 161              | 4.8 | 2360         | 136  | 1610         | 93.0 | 197         | 13.7 |

表1: 月面での銀河宇宙線とGLEイベントによる実効線量当量。

| 宇宙飛行を初めて<br>行った年齢 | 実効線量当量 (mSv) |     |
|-------------------|--------------|-----|
|                   | 男性           | 女性  |
| 27-30             | 600          | 500 |
| 31-35             | 700          | 600 |
| 36-40             | 800          | 650 |
| 41-45             | 950          | 750 |
| 46-               | 1,000        | 800 |

表2: 宇宙飛行士の生涯被ばく制限[20].

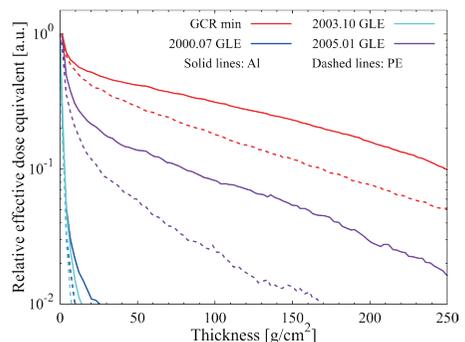


図3: 銀河宇宙線とGLEイベントにアルミニウム(Al, 実線)とポリエチレン(PE, 点線)を遮蔽材として用いた場合の線量率の遮蔽厚さ依存性。0 g/cm<sup>2</sup>でそれぞれ値を規格化している。

のことから、縦孔を利用することによる遮蔽は遮蔽材を使用するよりも効果的であり、低線量率を月面で実現するための手段として有望であるといえる。

縦孔内の線量率の変化は概ね立体角の変化によるものである。一次粒子の線量率は線源の立体角の変化(図4緑太線)とほとんど線形に変化している。一方で、二次粒子の寄与は孔の底で50%程度まで増加している。二次粒子の寄与の増加は二次粒子源となる壁や地面の占める立体角が孔の深くに入るほど増加するためであると考えられる。なお、このとき天然放射性元素由来のガンマ線の存在量も壁や地面の立体角と共に増加すると考えられる。今回仮定したK, Th, Uの存在量であれば、その被ばく量は最大で約1.2 mSv/yである。

月物質によって遮蔽され、一次粒子を天頂開口部の立体角分まで被ばく量を低減することができるという縦孔の特徴は、宇宙環境の放射線防護では特に有効である。図3に示したように、銀河宇宙線のような飛程の極端に長い粒子イベントに対しては防護材を用いた放射線防護は効果が薄い。従って、縦孔環境は一次粒子となるイベントの種類や大きさに寄らずほぼ一定の割合で被ばく量を低減可能であり、月面で人類が長期間滞在するのに有望な候補地であるといえる。

図5に縦孔の底から高さ1 mの領域における線量率の水平位置依存性を示す。銀河宇宙線による線量率は縦孔の縁周辺(±25 m)で約20 mSv/yであり、横孔に入ることですらに小さくなる。国際放射線防護委員会の定める地球上での公衆被ばくの基準値は1.0 mSv/y、職業被ばくの基準値は50 mSv/y及び100 mSv/5yである[21]。従って、縦孔を利用することで職業被ばくの基準値程度まで被ばく量を軽減することが可能である。直径50 mの縦孔中心から側方の横穴(溶岩洞)へ75 m移動することで銀河宇宙線による被ばく量は太陽活動極小期でも1.0 mSv/y以下となり、地球上の公衆被ばく基準値以下の放射線環境を実現可能である。

ここで、Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)の斜め観測によれば、横穴の奥行は最低10数mとされている[16]。また、数値計算による見積もりで溶岩洞の径は最大で数百mからkm[11, 22]、レーダ観測による見積もりで約50 kmの長さが見込まれて

いる[23]。したがって、溶岩洞を利用して銀河宇宙線による被ばく量を1.0 mSv/y以下に抑えることは十分現実的であると考えられる。ただしこの場合、天然放射性元素由来のガンマ線による被ばく量が同程度存在する可能性がある。そのため、本研究で示す1 mSv/y前後の低線量環境についての計算精度は十分でないことは留意すべきである。

なお、本研究では溶岩洞を縦孔の底からつながる平らな空間として仮定している。実際には地面に起伏あることや横穴が湾曲していることが考えられる。実際の放射線環境を推定するには縦孔内部の地形を調査し、その形状に即して計算のジオメトリを変更する必要がある。

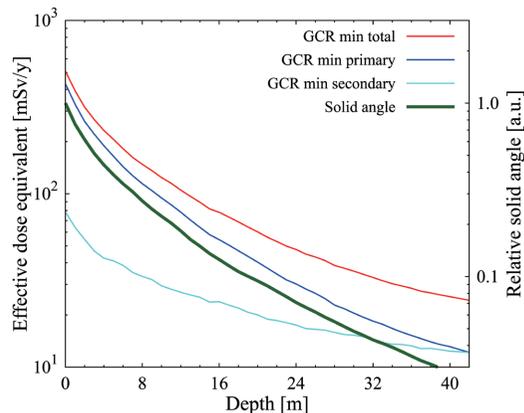


図4: 太陽活動極小期の銀河宇宙線による線量率の縦孔深さ依存性。比較のため一次粒子の立体角の変化を0 mで規格化して示している(緑太線)。

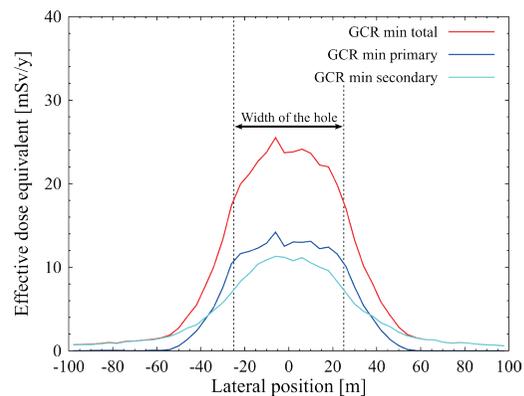


図5: 縦孔の底における銀河宇宙線線量率の水平方向位置依存性。

## 5. まとめ

本稿では、月面及び月縦孔地形周辺の放射線線量を見積もった。定常的に降り注ぐ銀河宇宙線による被ばく量は太陽活動極小期に最大の約420 mSv/yとなった。また、月面の放射線環境は場所による変化はほとんどないと予想される。太陽の大規模イベント(例えば地表で観測されるようなGLE)が発生した場合、1 Svを超える被ばく量が懸念されるが、大部分の太陽粒子イベントはエネルギーの低い粒子による被ばくが支配的であるため、数g/cm<sup>2</sup>の遮蔽材によってほとんどを防護可能である。

一方、縦孔の内部では被ばく量は概ね立体角の変化に従って減少した。太陽活動極小期の銀河宇宙線の被ばく量は、マリウス丘の縦孔の底では約25 mSv/yまで低減可能である。縦孔の底の中心から水平に75 m(側壁から50m)程度の空間が存在すれば、公衆被ばくの基準値である1.0 mSv/y以下まで被ばく量を抑えることができる。従って、縦孔地形は宇宙環境において地球と同程度の低線量空間を提供することができ、月における長期間の有人滞在を考えたとき、有望な地形であるといえる。本研究は古今未曾有の日本の月/火星地下世界探査(UZUME)計画に向けて重要な科学的知見を提供するものである。より詳細な放射線環境するためには、縦孔内部の放射線と地形環境の実測が不可欠である。

## 謝辞

本稿を投稿するにあたり、査読者である慶應義塾大学の寺沢和洋様に有意義なコメントと提案を多数いただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] Zeitlin, C. et al., 2013, *Science* 340, 1080.
- [2] Simpson, J. A., 1983, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 33, 323.
- [3] Matthiä, D. et al., 2013, *Adv. Sp. Res.* 51, 329.
- [4] O'Neill, P. M. and Foster, C. C., 2013, *Tech.*

- Rep., NASA/TP-2013-217376.
- [5] Lopate, C., 2006, in *Sol. Eruptions Energ. Part.*, 283.
- [6] Mewaldt, R. A. et al., 2012, *Sp. Sci. Rev.* 171, 97.
- [7] Durante, M., 2014, *Life Sci. Sp. Res.* 1, 2.
- [8] Naito, M. et al., 2020, *Life Sci. Sp. Res.* 26, 69.
- [9] Angelis, G. De et al., 2002, *J. Radiat. Res.* 43, S41.
- [10] Reitz, G. et al., 2012, *Planet. Space Sci.*, 74, 78.
- [11] Haruyama, J. et al., 2009, *Geophys. Res. Lett.* 36, L21206.
- [12] Hareyama, M. et al., 2016, *Nucl. Instr. Meth. A.* 828, 145.
- [13] Lucey, P., 2006, *Rev. Mineral. Geochemistry* 60, 83.
- [14] Slaba, T. C. et al., 2011, *Radiat. Res.* 176, 827.
- [15] Sato, T. et al., 2018, *J. Nucl. Sci. Technol.* 55, 684.
- [16] Robinson, M. S. et al., 2012, *Planet. Space Sci.* 69, 18.
- [17] Prettyman, T. H. et al., 2006, *J. Geophys. Res.* 111.
- [18] Yamashita, N. et al., 2010, *Geophys. Res. Lett.* 37, L10201.
- [19] ICRP, 2013, *ICRP Publ.* 123. *Annu. ICRP*, 42.
- [20] JAXA, 2013, <http://iss.jaxa.jp/med/research/radiation/>.
- [21] ICRP, 2007, *ICRP Publ.* 103. *Annu. ICRP*, 37.
- [22] Blair, D. M. et al., 2017, *Icarus* 282, 47.
- [23] Kaku, T. et al., 2017, *Geophys. Res. Lett.* 44, 10,155.