

宇宙线高能粒子对测试质量充电机制

韩瑞龙 蔡明辉 杨涛 许亮亮 夏清 韩建伟

Mechanism of cosmic ray high-energy particles charging test mass

Han Rui-Long Cai Ming-Hui Yang Tao Xu Liang-Liang Xia Qing Han Jian-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 229501 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210747

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210747>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高海拔宇宙线观测实验中scaler模式的模拟研究

Simulation study of scaler mode at large high altitude air shower observatory

物理学报. 2021, 70(19): 199301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210632>

太阳宇宙线地面增强事件(GLE72)峰值能谱研究

Research on the peak energy spectrum of the solar cosmic ray ground level enhancement event (GLE72)

物理学报. 2021, 70(10): 109601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201662>

原子核质量模型的检验

Test of nuclear mass models

物理学报. 2021, 70(10): 102101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201734>

激光加载下金属锡材料微喷颗粒与低密度泡沫混合实验研究

Observation of ejecta tin particles into polymer foam through high-energy X-ray radiography using high-intensity short-pulse laser

物理学报. 2019, 68(7): 076201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182280>

高能质子照相中基于角度准直器设计的理论研究

Theoretical study of angle-cut collimator based design in high-energy proton radiography

物理学报. 2020, 69(3): 032901 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191691>

基于原子干涉仪的微观粒子弱等效原理检验

Test of weak equivalence principle of microscopic particles based on atom interferometers

物理学报. 2018, 67(16): 160402 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180621>

宇宙线高能粒子对测试质量充电机制*

韩瑞龙¹⁾²⁾ 蔡明辉^{1)2)†} 杨涛¹⁾ 许亮亮¹⁾ 夏清¹⁾ 韩建伟¹⁾²⁾

1) (中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

2) (中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

(2021 年 4 月 20 日收到; 2021 年 8 月 26 日收到修改稿)

测试质量是空间引力波测量的核心传感器, 宇宙线高能粒子能够穿透航天器屏蔽对其造成电荷注入, 进而产生库仑力和洛伦兹力噪声对引力波科学探测造成严重影响. 本文采用蒙特卡洛仿真方法, 探究了不同宇宙线高能粒子对测试质量的充电过程和机制. 研究结果表明, 在同一能谱下随着截止能量的降低充电速率逐步增大, 充电速率变化约为 9%; 太阳活动极小年时测试质量的充电速率为 39.5 +e/s , 其中贡献最大的质子占比约为 83.16%, 太阳活动极大年时测试质量的充电速率约为 12.5 +e/s , 1989 年最恶劣的太阳高能粒子事件造成测试质量的充电速率约为 120700 +e/s ; 在太阳活动极小年时, 银河宇宙线各成分的充电速率取决于各成分的初级粒子在测试质量中的沉积, 其中初级粒子贡献占测试质量总充电速率的 73%; 太阳活动极小年时, 质子的充电贡献主要来自能量为 $0.1\text{—}1 \text{ GeV}$ 的区间, 占比约为 65%. 研究结果可用于评估测试质量在轨充电规律, 为电荷管理的设计和在轨工作提供依据.

关键词: 引力波, 测试质量, 宇宙线, GEANT4

PACS: 95.55.Ym, 13.85.Tp, 52.65.Pp

DOI: 10.7498/aps.70.20210747

1 引言

引力波是爱因斯坦广义相对论中非常重要的一个预言, 探测空间引力波不仅是对爱因斯坦广义相对论直接精确的检验, 也对物理学和天文学等基础学科未来的发展有着十分重大的作用和意义^[1,2]. 实现空间引力波探测的核心设备是测试质量, 测试质量位于航天器的望远镜筒内. 航天器在深空环境中航行时, 空间环境中的宇宙线高能粒子能够穿透航天器屏蔽入射到测试质量, 导致测试质量带电. 带电后的测试质量在电极库仑力或者磁场洛伦兹力的干扰下, 产生加速度噪声对引力波科学探测造成严重影响. 欧洲和美国的研究人员利用蒙特卡洛模拟仿真工具 GEANT (geometry and tracking) 对 LISA (laser interferometer space antenna) 测试

质量的充电速率进行了仿真模拟评估^[3–8], 由于其考虑的几何模型、银河宇宙射线 (galactic cosmic rays, GCR) 通量和截断能量的不同, 计算得到太阳活动极小年时 GCR 对测试质量的充电速率为 $11\text{--}52 \text{ +e/s}$. 利用另一款蒙特卡洛仿真软件 FLUKA (Fluktuierende Kaskade) 对 LISA 简化几何模型的充电模拟也有很大的进展^[9], 得到太阳活动极小年能量 $0.1\text{--}1000 \text{ GeV}$ 宇宙线质子的充电速率为 37 +e/s (截断能量为 1 keV). 国内的研究者主要是针对单航天器激光天文动力学空间计划 (astrodynamical space test of relativity using optical devices, ASTROD) 利用 GEANT4 开展测试质量的充电机制模拟, 仿真模拟了太阳活动极小年时高能宇宙射线入射简化等效几何和相对复杂完整几何模型中的充电速率^[10,11], 得到太阳活动极小年时充电速率为 24.2 +e/s 和 33.3 +e/s (截断能

* 国家重点研发计划 (批准号: 2020YFC2201300)、科工局重大软件研制专项 (批准号: E01Z360101) 和航天科工二院未来实验室自主创新联合基金 (批准号: YQQT202102645) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: caiminghui@nssc.ac.cn

量为 250 eV). Grimaldi 等^[12]和 Wass 等^[13]针对 LISA Pathfinder, 利用相同的简化模型仿真模拟的充电速率为 $38.2 \pm e/s$ 和 $43.7 \pm e/s$, 在轨充电速率为 TM1: $22.9 \pm e/s$; TM2: $24.5 \pm e/s$ ^[14]. 虽然国内外的研究者对测试质量的充电速率已经开展了较多的研究, 但是对于不同截断能量阈值对充电速率影响、不同宇宙线的充电能力和初、次级粒子充电速率占比、同一粒子不同能量段的充电贡献等方面的研究尚不完善.

本文依据 LISA 航天器建立几何模型, 仿真采用 CREME96 模型计算得到的 GCR 能谱, 利用粒子传输仿真工具 GEANT4 进行模拟. 为了揭示宇宙线不同种类、不同能量粒子对测试质量的充电机制与规律, 对不同截断长度下测试质量充电影响进行评估. 针对测试质量在太阳活动极小年、太阳活动极大年时能量大于 100 MeV/n 的质子、氦核 (^3He 和 ^4He) 和 C, N, O 等粒子进行充电模拟, 对 1989 年太阳高能粒子 (solar energetic particle, SEP)

事件也进行了充电模拟. 太阳极小年时对宇宙线各粒子的初、次级粒子充电率贡献以及质子在不同能量段的充电率贡献进行仿真模拟.

2 仿真方法

2.1 几何建模

针对引力波探测中测试质量的充电机制与规律进行仿真模拟, 对 LISA 的复杂航天器结构模型进行简化^[15]. LISA 航天器整体模型和惯性传感器模型如图 1 所示.

本文简化的等效航天器模型如图 2 所示, 模型包括: 测试质量 (test mass, TM), 为边长 46 mm 的立方体; 钼电极 (Mo), 为内边长 74 mm、外边长为 86 mm 的立方体壳层; 钛室 (Ti), 为内半径长 75 mm、外半径长 80 mm 的球壳层; 碳外壳 (C) (航天器其它结构如电池、望远镜筒和支架等), 为内半径长 80 mm、外半径长 100 mm 的球壳层;

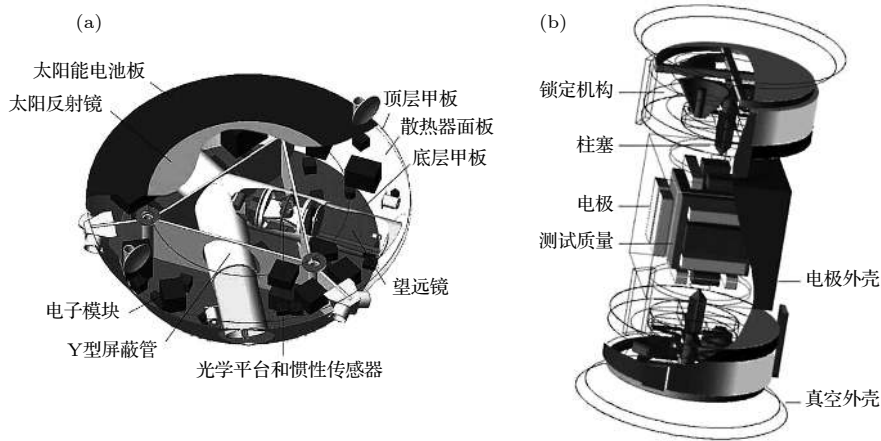


图 1 LISA 航天器模型 (a) 整体模型; (b) 惯性传感器模型

Fig. 1. LISA spacecraft model: (a) Overall model; (b) inertial sensor model.

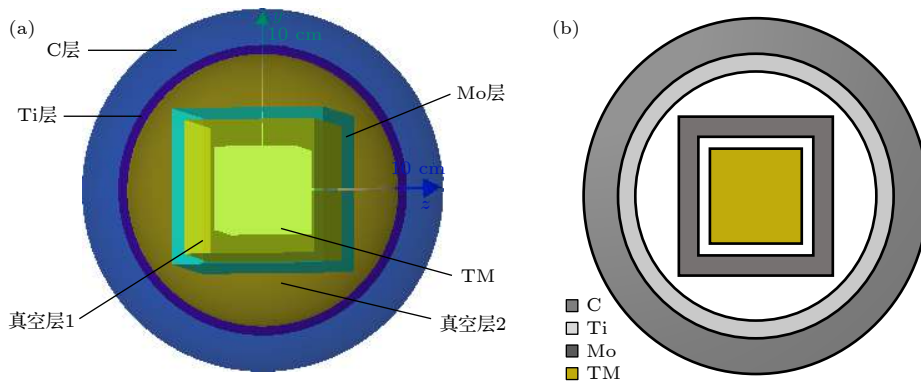


图 2 本文航天器模型图 (a) geant4 模型图; (b) 模型平面示意图

Fig. 2. The spacecraft model diagram in this paper: (a) Geant4 model diagram; (b) schematic diagram of the model plane.

表 1 航天器几何尺寸和材料构成

Table 1. Spacecraft geometric dimensions and material composition.

名称	组成成分	密度/(g·cm ⁻³)	尺寸	厚度/mm
测试质量	Au(70%); Pt(30%)	19.837	46 mm立方体	—
钼电极	Mo	10.28	74—86 mm立方体壳层	6
钛室	Ti	4.54	75—80 mm球壳层	5
碳外壳	C	2.10	80—100 mm球壳层	20

测试质量 (TM) 与钼电极 (Mo) 之间和钼电极 (Mo) 与钛室 (Ti) 之间的区域均为真空, 具体航天器几何尺寸和材料如表 1 所列. 在本文的模拟中, 真空的密度为 1.0×10^{-25} g/cm³, 设置宇宙线粒子是从一个半径为 120 mm 的球面上各项同性均匀地入射到整个航天器模型.

2.2 辐射环境

引力波探测航天器在类地球轨道绕太阳飞行^[16], 将受到 GCR 和 SEP 的轰击, 导致测试质量带电. GCR 能谱随太阳周期的变化强度会有所不同, 在太阳极小年 GCR 的通量最高. 在太阳极小年, GCR 能谱组成为: 大约 90% 的质子、8% 的氦核 (³He 和 ⁴He), 1% 的重核和 1% 的电子. 本文主要考虑太阳极小年通量相对较大的质子、氦核 (³He 和 ⁴He) 和 C, N, O 等粒子和太阳极大年质子、氦核 (³He 和 ⁴He) 以及对于典型的 1989 年 SEP 峰值能谱能谱进行充电机制仿真分析.

利用 CREME96 模型计算得到太阳活动极大、太阳活动极小年距太阳 1AU 处各粒子的能谱如图 3 所示, 1989 年 9 月 29 日的 SEP 峰值能谱通量如图 4 所示. 由于只有大于 100 MeV/n 的粒子才能穿透航天器测试质量外围的屏蔽, 故只考虑能量大于 100 MeV/n 的粒子. CREME96 模型计算得到的宇宙线能谱数据没有区分 ³He 和 ⁴He, 需要对宇宙线 He 能谱进行参数化. 针对 ³He/⁴He 比例 C 的测量试验已经获得比较准确细致的结果^[17–20], 表 2 和表 3 中展示了太阳活动极大年参数 $C(M)$ 、太阳活动极小年参数 $C(m)$ 的值^[21], 根据公式由 ³⁺⁴He 的通量可以分别得到 ³He 和 ⁴He 的通量^[22,23]:

$$F(^3\text{He}) = C/(1+C)F(^{3+4}\text{He}), \quad (1a)$$

表 2 太阳极小年 ³He/⁴He 的参数化比例 $C(m)$ Table 2. The parameterized ratio $C(m)$ of ³He/⁴He in solar minimum.

$E/(\text{GeV}\cdot\text{n}^{-1})$	$0.10 \leq E \leq 0.36$	$0.36 \leq E \leq 1.00$	$1.00 \leq E \leq 1.40$	$E > 1.40$
$C(m)$	$0.335 \times E^{0.569}$	0.187	$0.187 \times E^{0.491}$	0.22

$$F(^4\text{He}) = 1/(1+C)F(^{3+4}\text{He}), \quad (1b)$$

其中 C 为 ³He 与 ⁴He 的比例; F 的单位为 $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Sr}^{-1}\cdot(\text{GeV}/\text{n})^{-1}$.

根据表 2 和表 3 太阳活动极大、极小年的参数化 ³He/⁴He 比例 C , 代入 ³He 和 ⁴He 的通量计算公式 (1a) 式和 (1b) 式中, 结合由 CREME96 模型计算得到的 ³⁺⁴He 的通量, 计算得到太阳活动极大、太阳活动极小年 ³He 和 ⁴He 的通量, 如图 5 所示.

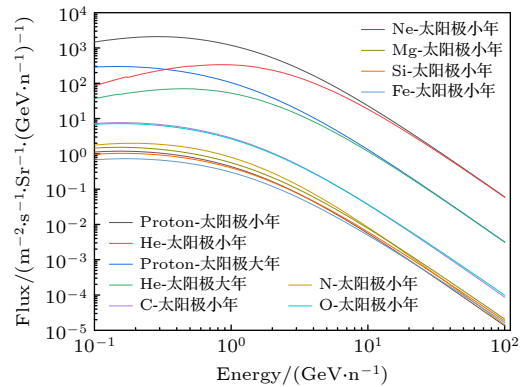


图 3 1 AU 处 GCR 各粒子微分能谱

Fig. 3. Differential energy spectra of each element of GCR at 1 AU.

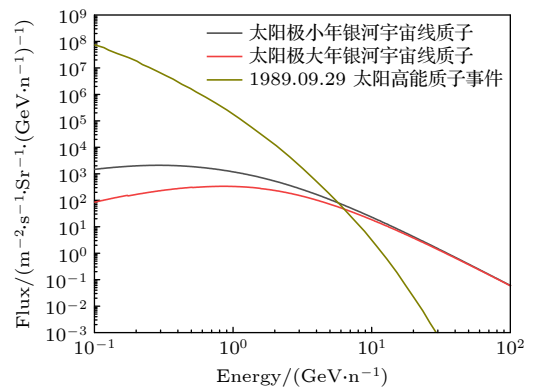
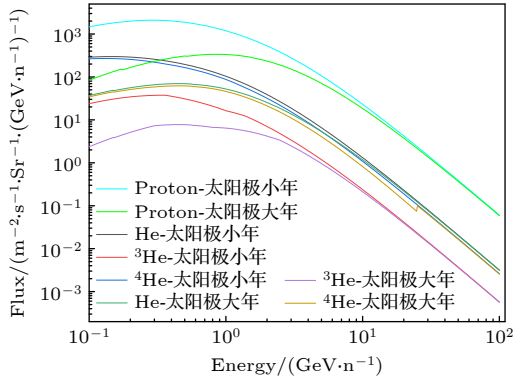


图 4 1AU 处 1989 年 SEP 微分能谱

Fig. 4. 1989 SEP differential energy spectra at 1AU.

表 3 太阳极大年 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的参数化比例 $C(M)$ Table 3. The parameterized ratio $C(M)$ of $^3\text{He}/^4\text{He}$ during solar maximum.

$E/(\text{GeV}\cdot\text{n}^{-1})$	$0.10 \leq E \leq 0.30$	$0.30 \leq E \leq 0.80$	$0.80 \leq E \leq 2.50$	$E > 2.50$
$C(M)$	$0.239 \times E^{0.538}$	0.125	$0.140 \times E^{0.496}$	0.22

图 5 宇宙线 Proton 和 He(^3He 和 ^4He) 微分能谱Fig. 5. Differential energy spectra of cosmic rays Proton and He (^3He and ^4He).

2.3 物理模型

GCR 和 SEP 的高能性和强子性意味着入射到航天器中会与航天器材料发生复杂的物理过程, 并产生大量次级带电粒子. 将这些次级带电粒子追踪到尽可能低的能量, 就能更加准确的模拟测试质量的充电过程. 本文利用 GEANT4 模拟包含从数百 eV 到 TeV 能量范围的物理模型, 并且对每个粒子和它产生的所有次级粒子进行全程跟踪. 不同种类和能量的粒子与相应物理过程紧密联系, 考虑的物理过程为: 低能电磁过程、强子过程、衰变过程和光核过程, 随着粒子能量的增高与其对应的物理过程也不断变化. 对于低能电磁过程, GEANT4 默认电磁过程次级粒子 (e^- , e^+ , γ) 产生最低阈值为 250 eV (对应的截断长度约为 50 nm), 低于这个能量的粒子将不再进行跟踪.

3 仿真结果

3.1 GEANT4 不同截断长度的充电模拟

在 GEANT4 中, 电磁过程产生次级粒子的最低阈值为 250 eV. 本文利用太阳活动极小年质子能谱对不同截断长度下的测试质量充电率进行模拟计算, 当 50 万质子入射航天器模型, 分别得到截断长度为 1 mm, 100 μm , 10 μm , 1 μm , 100 nm 和 50 nm 时的充电速率, 如图 6 所示.

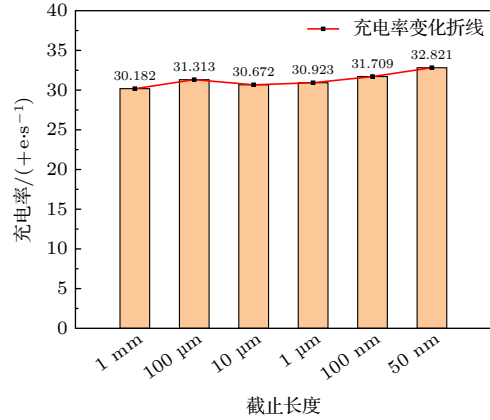


图 6 不同截断长度的充电速率

Fig. 6. Charging rate with different cut-off lengths.

如图 6 所示, 不同截断长度对太阳活动极小年质子的充电速率会产生影响, 总体来说, 截断长度越低 (次级粒子产生的能量阈值越低) 模拟得到的充电速率会越高. 在截断长度为 50 nm 时充电速率最大, 为 32.821 +e/s. 随着截断长度的减小, 截断长度从 1 mm 减小到 50 nm 充电率增长了 8.74%. 表明截断长度的变化不会显著的影响测试质量的充电速率.

3.2 太阳活动极大、极小年 GCR 和 SEP 的充电模拟

在太阳活动极小年下, 仿真模拟的宇宙线 Proton, ^3He , ^4He , C, N, O, Ne, Mg, Si 和 Fe 粒子的参数如表 4 所列, 获得这些粒子入射到航天器后造成测试质量的充电速率如图 7 所示. 因为 C, N 和 O 等重离子在银河宇宙线总的通量占比仅为 1%, 与 Proton, ^3He 和 ^4He 相比可以忽略, 导致各重离子入射航天器得到测试充电率非常小, 所以在太阳极大年将不考虑重离子的贡献, 仅考虑 Proton, ^3He 和 ^4He 对充电率的贡献. 在太阳活动极大年下, 仿真模拟的宇宙线 Proton, ^3He 和 ^4He 粒子的参数如表 5 所列, 获得这些粒子入射到航天器后造成测试质量的充电率分布如图 7 所示.

如图 7 所示, 在太阳活动极小年银河宇宙线各粒子入射的总充电速率为 39.469 +e/s; 入射 Proton 的充电速率为 32.821 +e/s; 入射 ^3He 的充电速率

为 $1.166 + e/s$; 入射 ^4He 的充电速率为 $5.024 + e/s$; 入射其它重离子的充电速率为 $0.458 + e/s$. 其中质子充电率占比 83.16%; ^3He 的充电率占比为 2.95%; ^4He 的充电率占比为 12.73%; 其它重离子的充电率占比为 1.16%. 在太阳活动极小年, Proton 的充电速率贡献占主导地位, 质子和 ^4He 的充电速

表 4 太阳极小年宇宙线主要粒子仿真参数
Table 4. The main particle simulation parameters of cosmic rays during solar minimum.

粒子种类	粒子数目/个	暴露时间/s	积分通量/($\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
Proton	700000	353.65	4.375
^3He	100000	3563.35	0.062
^4He	120000	806.26	0.329
C	100000	21052.63	0.0105
N	100000	77561.47	0.00285
O	100000	22128.79	0.00999
Ne	10000	13644.98	0.00162
Mg	10000	10476.25	0.00211
Si	10000	14542.70	0.00152
Fe	10000	19562.20	0.00113

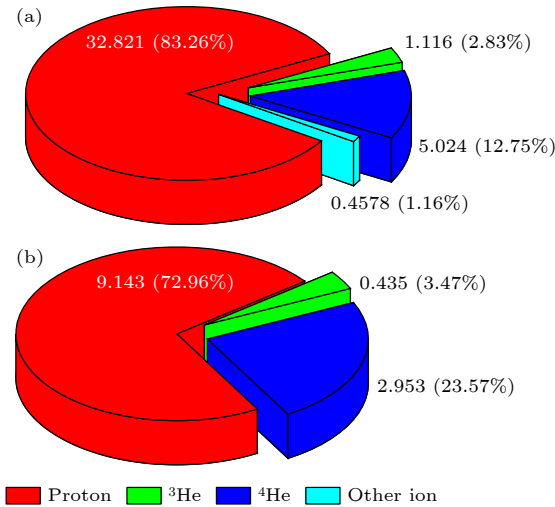


图 7 宇宙线各粒子的充电率 (a) 太阳活动极小年; (b) 太阳活动极大年

Fig. 7. The charging rate of each particle of cosmic rays: (a) Solar minimum year; (b) solar maximum year.

表 5 太阳极大年宇宙线主要粒子仿真参数
Table 5. The main particle simulation parameters of cosmic rays during solar maximum.

粒子种类	粒子数目/个	暴露时间/s	积分通量/($\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
Proton	700000	353.65	4.375
^3He	100000	3563.35	0.062
^4He	120000	806.26	0.329

率贡献占总充电速率的 95.89%, 其他重离子的贡献仅占充电率的 1.16%, 可以忽略.

在太阳活动极大年银河宇宙线各主要贡献粒子入射的总充电速率为 $12.531 + e/s$: 入射 Proton 的充电速率为 $9.143 + e/s$; 入射 ^3He 的充电速率为 $0.435 + e/s$; 入射 ^4He 的充电速率为 $2.953 + e/s$. 太阳活动极大年的总充电率为太阳极小年 (GCR 最恶劣情况) 的三分之一. 其中质子充电率占比 72.96%; ^3He 的充电率占比为 3.47%; ^4He 的充电率占比为 23.57%. 可以看到, 太阳活动极大年质子的充电率贡献占比最大, 质子和 ^4He 的充电速率贡献占总充电速率的 96.53%.

1989 年 9 月 29 日 SEP 峰值能谱模拟仿真参数如表 6 所列, 模拟了能量范围为 0.1—30 GeV 的太阳质子. 仿真得到在 1989 年 9 月 29 日的太阳爆发极端环境下的充电速率为 $120700 + e/s$, 是太阳活动极小年时充电率的 3000 多倍. 对于零星发生的 SEP 事件, 对航天器造成极大的充电风险, 极短的时间内就会达到引力波探测能忍受的最大加速度噪声.

表 6 1989 年 9 月 29 日太阳高能粒子事件仿真参数
Table 6. Simulation parameters of the SEP event on September 29, 1989.

粒子种类	粒子数目/个	暴露时间/s	积分通量/($\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
Proton	500000	0.150	7385.53

3.3 太阳活动极小年 GCR 初、次级粒子贡献和充电能力模拟

在太阳活动极小年, 计算了银河宇宙线各粒子入射航天器产生的初、次级粒子造成的测试质量充电速率, 如表 7 所列. 宇宙线各粒子的初级粒子充电速率比例都占总充电率的 60% 以上 (除通量过小的 Fe). 对于充电率贡献最大的质子和 ^4He , 初级粒子充电率占比分别为 67.07% 和 100%. 所有宇宙线的初级粒子充电率占比为 72.86%, 表明测试质量充电速率的主要贡献来源于初级粒子直接沉积在测试质量中.

如图 8 所示, 在太阳活动极小年, 模拟计算得到宇宙线各粒子的充电能力. 值得注意的是, 在初级宇宙线中占比为 8% 的 He(^3He 和 ^4He), 贡献了总充电率为 15.68%; 在初级宇宙线中占比为 1% 的重粒子, 贡献了总充电率的 1.16%. 针对 ASTROD I

也有类似的结果^[11]. 这是由于银河宇宙线入射航天器测试质量的充电能力不同(各粒子的电离能力和射程的不同), ^4He 充电能力约为质子的 2 倍, 重粒子的充电能力基本都大于质子的充电能力.

表 7 宇宙线初、次级粒子造成的充电率
Table 7. Charge rate caused by primary and secondary particles of cosmic rays.

粒子种类	初级粒子充电率/(+e·s ⁻¹)	次级粒子充电率/(+e·s ⁻¹)	初级粒子充电率占比
Proton	22.016	10.805	67.07%
^3He	1.196	-0.029	100%
^4He	5.125	-0.100	100%
C	0.182	0.023	88.78%
N	0.042	0.009	82.35%
O	0.123	0.020	86.01%
Ne	0.0132	0.0026	83.54%
Mg	0.0137	0.0064	68.16%
Si	0.0087	0.0058	60%
Fe	0	0.0084	0%

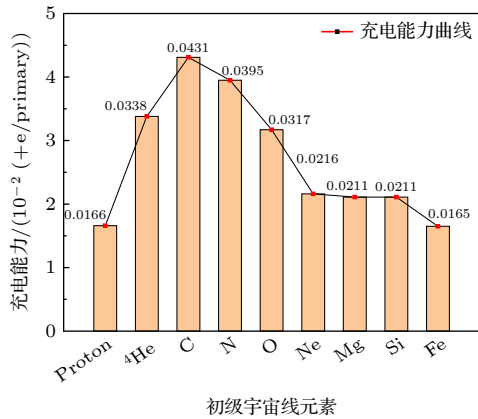


图 8 宇宙线各粒子的充电能力

Fig. 8. The charging ability of each particle of the cosmic ray.

3.4 太阳活动极小年 GCR 质子不同能量段的充电模拟

在太阳活动极小年, 仿真模拟从 0.1—100 GeV 范围内不同能量的银河宇宙线质子各向同性入射到航天器模型, 对于每个单能点仿真模拟 10000 个事例(其它条件与能谱仿真时保持相同), 得到了不同能量质子的充电能力(单个粒子入射造成的测试质量净充电个数). 如图 9 所示, 能量为 200 MeV 时充电能力有峰值 0.0498 +e/primary, 在 高能部分(大于 10 GeV)充电能力迅速增大为另一个峰值 0.2077 +e/primary.

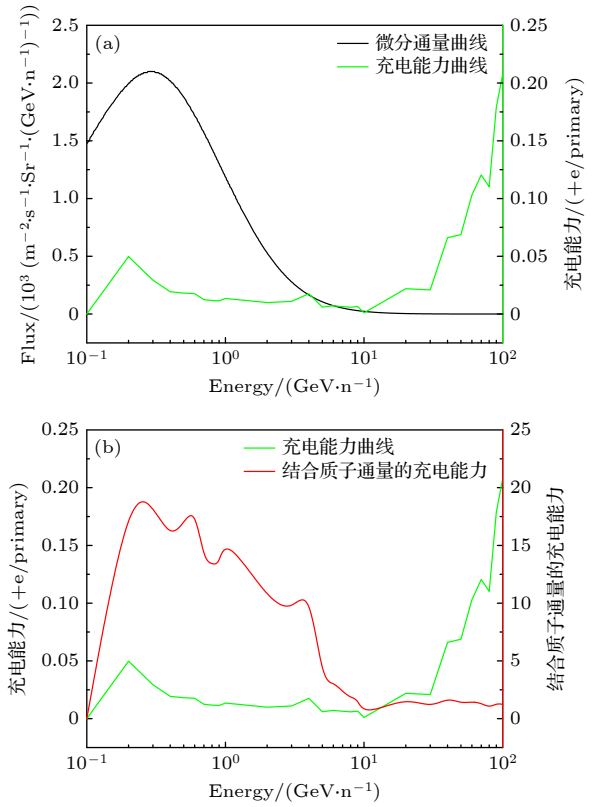


图 9 太阳活动极小充电能力 (a) 不同能量充电能力和质子通量; (b) 充电能力和结合质子通量的总充电比例

Fig. 9. Solar minimum charging capacity: (a) Different energy charging capacity and proton flux; (b) charging capacity and total charge ratio of combined proton flux.

结合太阳活动极小年时入射的质子能谱, 可以得到对于太阳极小年不同能量的初级宇宙线质子对测试质量充电的贡献. 设仿真模拟的粒子数为 N_0 , 测试质量的净充电个数为 N , 充电能力为 C_A , 充电率为 C_R , 各能量点质子的微分通量为 F , 各向同性粒子出射的半径为 R .

$$C_A = N/N_0, \quad (2a)$$

$$C_R = \frac{N}{N_0/\pi R^2 \cdot F}. \quad (2b)$$

由 (2a) 式和 (2b) 式可到:

$$C_R = C_A \times \pi R^2 \cdot E \cdot F, \quad (3)$$

其中 E 为质子的能量, 单位为 GeV.

由 (2a) 式和 (2b) 式得到 (3) 式, 可以反应不同能量下的充电率贡献. 结合质子能谱的初级宇宙线质子对测试质量充电的贡献如图 9 所示, 充电能力峰值的高能部分由于能谱通量远低于低能部分, 导致最终的充电率贡献很低. 计算可以得到, 在能量区间 0.1—10 GeV 内, 对测试质量充电的占比约

为 94%. 在能量区间 0.1—1 GeV, 对测试质量充电的占比约为 65%. 仿真结果可为在轨粒子探测器的设计提供依据.

4 讨 论

本文使用 Geant4 全面仿真了引力波探测航天器在距太阳 1 AU 处受到宇宙线高能粒子的轰击导致测试质量充电的规律. 本文的仿真计算考虑了更为全面的初级和次级粒子、更低的能量阈值, 与 LISA 探路者飞行试验结果相吻合, 可为后续引力波探测任务中在轨电荷实时监测、预报和管理提供重要依据. Grimani 等^[12]利用 Fluka 仿真模拟了参数化的太阳极大、极小年质子和氦核能谱注入 LISA 探路者相对复杂几何模型中的充电率, 得到太阳极大年充电率为 15.13 +e/s , 太阳极小年充电率为 38.2 +e/s . 该结果与本文的研究结果高度一致, 但是由于 Fluka 软件的最低截断能量为 1 keV 和 Grimani 等^[12]使用的能谱为参数化能谱, 进而会造成一定的误差. Araújo 等^[15]利用 Geant4 仿真模拟了 LISA 模型在太阳极大、极小年测试质量的充电率, 但此工作中没有考虑到 e^+ 在测试质量中的沉积, 最终得到太阳极大年充电率为 23.7 +e/s , 太阳极小年充电率为 49.9 +e/s , 而本文全面地考虑 3—20 号元素、proton, ^3He , ^4He , e^- , e^+ 、 α 、 π 和正负 π 介子, 更综合地分析了测试质量的充电情况. 空间验证试验结果也证明了本文仿真模拟的正确性, LISA 探路者作为 LISA 的验证计划于 2015 年发射, 已经得到其上搭载的 2 个测试质量的充电率, TM1 和 TM2 的充电率分别为 22.9 +e/s 和 24.5 +e/s ^[14], 此次的测量是在太阳极小前 3—4 年, 测试质量的充电率在本文仿真的预期范围内 $12.531\text{—}39.469 \text{ +e/s}$. 在此基础上, 本文进一步研究分析了典型 SEP 充电率、太阳活动极小年银河宇宙线的初级粒子充电率占比以及太阳活动极小年银河宇宙线质子在不同能量区间的充电率贡献. 研究表明典型 SEP 峰值能谱通量下的充电速率为 120700 +e/s , 认为零星发生的 SEP 事件对航天器造成极大的充电风险, 太阳活动极小年银河宇宙线的初级粒子充电率占比最大, 针对太阳活动极小年测试质量总充电贡献占比最大的银河宇宙线质子, 其低能部分充电率贡献较大.

本文仿真方法更切合实际地模拟分析了宇宙

线高能粒子对测试质量的充电率, 更进一步研究了太阳极小年各银河宇宙线粒子的充电率贡献以及对银河宇宙线质子在不同能量区间的贡献. 此项工作可以讨论由于测试质量充电而引起的加速度噪声和它的频谱分析, 以及对未来引力波探测计划中粒子探测器的粒子探测种类和能量区间提供一些启示, 最终设置合理的放电方案对引力波探测的航天器进行电荷控制, 以降低由于测试质量充电所引起的噪声. 本文的研究结果可为未来中国引力波探测计划测试质量的加速度噪声预测、粒子探测器的设计和放电方案提供理论依据.

5 结 论

本文研究了高能宇宙线粒子对测试质量的充电机制, 建立了等效航天器模型来仿真空间引力波探测中的航天器的结构与材料. 通过 GEANT4 对航天器在太阳活动极大、太阳活动极小年银河宇宙线各粒子和 SEP 的轰击下测试质量充电过程的仿真模拟, 可以得出以下结论:

1) 在同一能谱不同截断能量下, 随着截断长度的降低充电速率逐步增大, 截断长度从 1 mm 减小到 50 nm 充电率增长了 8.74%. 在本文几何模型、物理过程和能谱设置条件下, 截断长度的变化不会显著的影响测试质量的充电速率;

2) 太阳活动极小年时的总充电速率为 39.469 +e/s , 除 Proton, ^3He 和 ^4He 之外, 其他重粒子对充电率的贡献仅为 1.16%; 太阳活动极大年的总充电速率为 12.531 +e/s , 为太阳活动极小年的三分之一; 1989 年 9 月 29 日 SEP 峰值能谱通量下的充电速率为 120700 +e/s , 零星发生的 SEP 事件对航天器造成极大的充电风险;

3) 太阳活动极小年时, 银河宇宙线的初级粒子充电率占比为 72.86%, 其中充电率贡献最大的是质子和 ^4He , 初级粒子充电率占比分别为 67.07% 和 100%, 表明测试质量充电速率的主要贡献来源于初级粒子直接沉积在测试质量中;

4) 太阳活动极小年时 Proton 在总充电贡献中占比最大, 为 83.16%, He 的总充电率贡献为 15.68%, 是初级宇宙线中 He 通量占比的 2 倍, 其他重离子对测试质量的充电率贡献不大;

5) 太阳活动极小年时, 宇宙线质子低能部分充电率贡献最大, 在能量区间 0.1—1 GeV 的

充电率贡献约占总充电率贡献的 65%, 在能量区间 0.1—10 GeV 内, 对测试质量充电率的占比约为 94%.

感谢国家科技基础条件平台-国家空间科学数据中心 (<https://www.nssdc.ac.cn>) 对本文空间环境数据的支持.

参考文献

- [1] Sathyaprakash B S, Schutz B F 2009 *Living Rev. Relativ.* **12** 1
- [2] Lei Z H, Lan M J, Wang X Y, Li J J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7408 (in Chinese) [雷中华, 兰明建, 汪先友, 李建杰 2008 物理学报 **57** 7408]
- [3] Jafry Y, Sumner T J, Buchman S 1996 *Classical Quantum Gravity* **13** A97
- [4] Jafry Y, Sumner T J 1997 *Classical Quantum Gravity* **14** 1567
- [5] Sumner T J, Jafry Y 2000 *Adv. Space Res.* **25** 1219
- [6] Araújo H M, Howard A, Shaul D, Sumner T J 2003 *Classical Quantum Gravity* **20** S311
- [7] Shaul D N A, Sumner T J, Araújo H M, Rochester G K, Wass P J, Lee C G Y 2004 *Classical Quantum Gravity* **21** S647
- [8] Sumner T, Araújo H, Davidge D, Howard A, Lee C, Rochester G, Shaul D, Wass P 2004 *Classical Quantum Gravity* **21** S597
- [9] Vocca H, Grimaldi C, Amico P, Bosi L, Marchesoni F, Punturo M, Travasso F, Barone M, Stanga R, Vetrano F, Viceré A 2004 *Classical Quantum Gravity* **21** S665
- [10] Bao G, Ni W T, Liu L, Araújo H, Shaul D, Sumner T 2004 *Publ. Purple Mt. Observatory* **23** 105 (in Chinese) [包纲, 倪维斗, 柳磊, Araújo H, Shaul D, Sumner T 2004 紫金山天文台台刊 **23** 105]
- [11] Bao G, Ni W T, Shaul D N A, Araújo H M, Liu L, Sumner T J 2008 *Int. J. Mod. Phys. D* **17** 965
- [12] Grimaldi C, Fabi M, Lobo A, Mateos I, Telloni D 2015 *Classical. Quantum Gravity* **32** 035001
- [13] Wass P J, Araújo H M, Shaul D N A, Sumner T J 2005 *Classical. Quantum Gravity* **22** S311
- [14] Armano M, Audley H, Auger G, Baird J T, Binetruy P, Born M, Bortoluzzi D, Brandt N, Bursi A, Caleno M, Cavalleri A, Cesarini A, Cruise M, Danzmann K, Silva M, Diepholz I, Dolesi R, Dunbar N, Ferraioli L, Ferroni V, Fitzsimons E D, Flatscher R, Freschi M, Gallegos J, Marirrodiga C, Gerndt R, Gesa L, Gibert F, Giardini D, Giusteri R, Grimaldi C, Grzymisch J, Harrison I, Heinzl G, Hewitson M, Hollington D, Hueller M, Huesler J, Inchauspé H, Jennrich O, Jetzer P, Johlander B, Karnesis N, Kaune B, Killow C J, Korsakova N, Lloro I, Liu L, López-Zaragoza J P, Maarschalkerweerd R, Madden S, Mance D, Martín V, Martin-Polo L, Martino J, Martin-Porqueras F, Mateos I, McNamara P W, Mendes J, Mendes L, Moroni A, Nofrarias M, Paczkowski S, Perreut-Lloyd M, Petiteau A, Pivato P, Plagnol E, Prat P, Ragnit U, Ramos-Castro J, Reiche J, Perez J A, Robertson D I, Rozemeijer H, Rivas F, Russano G, Sarra P, Schleicher A, Slutsky J, Sopuerta C, Sumner T J, Texier D, Thorpe J I, Trenkel C, Vetrugno D, Vitale S, Wanner G, Ward H, Wass P J, Wealthy D, Weber W J, Wittchen A, Zanon C, Ziegler T, Zweifel P 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 171101
- [15] Araújo H M, Wass P, Shaul D, Rochester G, Sumner T J 2005 *Astropart. Phys.* **22** 451
- [16] Luo Z R, Bai S, Bian X, Chen G R, Dong P, Dong Y H, Gao W, Gong X F, He J W, Li H Y, Li X Q, Li Y Q, Liu S H, Shao M X, Song T X, Sun B S, Tang W L, Xu P, Xu S N, Yang R, Jin G 2013 *Adv. Mech.* **43** 415 (in Chinese) [罗子人, 白娜, 边星, 陈葛瑞, 董鹏, 董玉辉, 高伟, 龚雪飞, 贺建武, 李洪银, 李向前, 李玉琼, 刘河山, 邵明学, 宋同消, 孙保三, 唐文林, 徐鹏, 徐生年, 杨然, 靳刚 2013 力学进展 **43** 415]
- [17] Myers Z D, Seo E S, Abe K, Anraku K, Imori M, Maeno T, Makida Y, Matsumoto H, Mitchell J, Moiseev A, Nishimura J, Nozaki M, Ormes J F, Orito S, Sanuki T, Sasaki M, Shikaze Y, Streitmatter R E, Suzuki J, Tanaka K, Yamagami T, Yamamoto A, Yoshida T, Yoshimura K 2003 *In International Cosmic Ray Conference Tsukuba, Japan, July 31–August 7, 2003* p1805
- [18] Wang J Z, Seo E S, Anraku K, Fujikawa M, Imori M, Maeno T, Matsui N, Matsunaga H, Motoki M, Orito S, Saeki T, Sanuki T, Ueda I, Yoshimura K, Makida Y, Suzuki J, Tanaka K, Yamamoto A, Yoshida T, Mitsui T, Matsumoto H, Nozaki M, Sasaki M, Mitchell J, Moiseev A, Ormes J, Streitmatter R, Nishimura J, Yajima Y, Yamagami T 2002 *Astrophys. J.* **564** 244
- [19] Casolino M, Santis C D, Simone N D, Formato V, Nikonov N, Picozza P 2011 *Astrophys. Space Sci. Trans.* **7** 465
- [20] Abe K, Fuke H, Haino S, Hams T, Hasegawa M, Horikoshi A, Itazaki A, Kim K C, Kumazawa T, Kusumoto A, Lee M H, Makida Y, Matsuda S, Matsukawa Y, Matsumoto K, Mitchell J W, Moiseev A A, Nishimura J, Nozaki M, Orito R, Ormes J F, Picot-Clément N, Sakai K, Sasaki M, Seo E S, Shikaze Y, Shinoda R, Streitmatter R E, Suzuki J, Takasugi Y, Takeuchi K, Tanaka K, Thakur N, Yamagami T, Yamamoto A, Yoshida T, Yoshimura K 2014 *Adv. Space Res.* **53** 1426
- [21] Grimaldi C, Vocca H, Bagni G, Marconi L, Stanga R, Vetrano F, Viceré A, Amico P, Gammaitoni L, Marchesoni F 2005 *Classical. Quantum Gravity* **22** S327
- [22] Papini P, Grimaldi C, Stephens S A 1996 *Il Nuovo Cim. C* **19** 367
- [23] Grimaldi C, Vocca H, Barone M, Stanga R, Vetrano F, Viceré A, Amico P, Bosi L, Marchesoni F, Punturo M, Travasso F 2004 *Classical. Quantum Gravity* **21** S629

Mechanism of cosmic ray high-energy particles charging test mass^{*}

Han Rui-Long¹⁾²⁾ Cai Ming-Hui^{1)2)†} Yang Tao¹⁾ Xu Liang-Liang¹⁾
Xia Qing¹⁾ Han Jian-Wei¹⁾²⁾

1) (*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 20 April 2021; revised manuscript received 26 August 2021)

Abstract

The testing mass is the core sensor for measuring the spatial gravitational waves. The high-energy cosmic ray particles penetrating the outer structure of the spacecraft result in the electrical charges on the testing mass. The Coulomb force produced by the charges on the surrounding conducting surface and the Lorentz force generated by the motion through the interplanetary magnetic field will exert a serious influence on the geodesic motion of the testing mass. In this paper are investigated the process and mechanism of charging the testing mass by high-energy particles from different cosmic rays through using the Monte Carlo simulation method. It is concluded that the charging rate gradually increases with the decrease of cut-off energy under the same energy spectrum. The positive charging rate (elementary charges per second) in the years of minimum solar activity is predicted to be 39.5 +e/s, and the protons account for approximately 83.16% of the total quantity of galactic cosmic rays. The positive charging rate of the testing mass during the years of maximum solar activity is about 12.5 +e/s, and the charging rate of the testing mass of the worst solar energetic particle event in 1989 is about 120700 +e/s. The charging rate of the components of the galactic cosmic ray depends on the deposition of primary particles of each component in the testing mass during the years of minimum solar activity, with primary particles accounting for 73% of the total charging rate. The charging contribution of protons in years of minimum solar activity is mainly in an energy range of 0.1–1 GeV, accounting for about 65%. The research results can be used to assess the charging patterns of test quality on-orbit charges and provide a basis for designing the charge management and on-orbit work.

Keywords: gravitational waves, test mass, cosmic rays, GEANT4

PACS: 95.55.Ym, 13.85.Tp, 52.65.Pp

DOI: 10.7498/aps.70.20210747

^{*} Project supported by National Key Research and Development Program (Grant No. 2020YFC2201300), the Major Software Development Special Project of the Science and Technology Bureau, China (Grant No. E01Z360101), and the Joint Fund for Independent Innovation of the Future Laboratory of the Second Academy of Aerospace Science and Industry, China(Grant No. YQQT202102645).

[†] Corresponding author. E-mail: caiminghui@nssc.ac.cn