论文已于*2023*年*3*月*22*日被《地球物理研究杂志：空间物理》在线接受发表。*https://doi.org/10.1029/2022JA030981*

尘埃撞击产生的天线信号变化

Mitchell M. Shen[1,2,3], Zoltan Sternovsky[2,3], David M. Malaspina[2,4]

1. 天体物理科学系，普林斯顿大学，普林斯顿，新泽西州 *08544 2.* 大气与空间物理实验室，科罗拉多大学，博尔德，科罗拉多州 *80303*3. 斯米德航空航天工程科学系，科罗拉多大学，博尔德，科罗拉多州 *80303*4. 天体物理与行星科学系，科罗拉多大学，博尔德，科罗拉多州 *80309*

要点：

（1）偶极配置的天线对尘埃撞击很敏感，测得的信号取决于撞击位置。（2）低速尘埃撞击会产生复杂多变的天线信号，表明撞击产生的等离子体具有复合特性。（3）使用加速的铁和铝颗粒进行的实验室测量产生了类似的天线信号。

关键词： 宇宙尘埃，尘埃探测，天线测量通讯作者：
mitchellshen@princeton.edu

稿件已提交至《地球物理研究杂志》。

稿件于2023年3月22日获《地球物理研究杂志：空间物理》在线接收。https://doi.org/10.1029/2022JA030981

摘要

航天器搭载的电场仪器可作为专用尘埃探测器的补充，通过记录撞击产生的等离子体引发的瞬态电压扰动来探测尘埃。信号波形包含了撞击产生的等离子体云与航天器天线系统各部件相互作用的信息。尘埃撞击产生的天线信号变化尚未得到系统表征。我们开展了一系列实验室测量，以表征航天器参数（偏置电压和天线配置）及撞击体参数（撞击速度和成分）对信号变化的影响。测量结果表明，偶极天线配置能够探测尘埃撞击，且检测到的信号会随撞击位置而变化。尘埃以较低速度撞击时，天线通常会记录到幅度较小、特征性较弱的撞击信号形状。在这种情况下，由于信噪比较低和/或波形形状变化较大，撞击事件识别可能更具挑战性，这表明未充分发展的撞击等离子体具有复合性质。为探究撞击材料可能造成的变化，我们使用两种质量密度不同的尘埃样品进行测量：铁和铝。对这两种材料进行测量后，未发现波形或通过数据分析获得的等离子体参数存在显著差异。

稿件于2023年3月22日被《地球物理研究杂志：空间物理》在线接收。https://doi.org/10.1029/2022JA030981

1. 引言

使用天线的电场或等离子体波仪器能够记录宇宙尘埃粒子撞击航天器的现象，这已在多项任务中得到观测[*Babic* 等人，2022年；*Gurnett* 等人，1983年、1987年、1997年；*Kurth* 等人，2006年；*Meyer-Vernet* 等人，2009年、2017年；*Malaspina* 等人，2014年、2020年；*Ye* 等人，2014年、2016a、2016b、2018年、2019年、2020年；*Kellog* 等人，2016年；*Page* 等人，2020年；*Pusack* 等人，2021年；*Szalay* 等人，2020年；*Vaverka* 等人，2018年、2019年；*Zaslavsky*等人，2012年、2015年，2021]。近期有人提出了一种基于第一性原理的物理模型，用于解释和分析天线记录的尘埃撞击波形[*Shen* 等人，2021a；2021b]。在该模型中，撞击等离子体中电子和离子形成的膨胀云团所引发的感应充电（以及航天器部件之间相应的电势差），是撞击信号呈现特征形状的主要原因。该模型考虑了航天器与天线元件之间的电容耦合，并纳入了电压信号经电气元件及等离子体环境放电的过程。

撞击等离子体是尘埃粒子撞击固体靶表面时产生的电子和离子瞬态云团（例如，*Auer* [2001]）。尽管人们对撞击等离子体产生过程中涉及的物理过程了解甚少，但实验室测量表明，产生的总电荷近似遵循幂律 $Q_{IMP} \approx Q_i = |Q_e| = \gamma m v^{\beta}$，其中 m为尘埃质量，v 为撞击速度。系数 γ 和 β 是靶材的特征参数，已针对多种材料测定（[例如，*Auer,* 2001；*Collette et al.,* 2014；*Shen*，2021c]）。撞击等离子体由自由电子、阳离子以及一定比例的阴离子组成。撞击等离子体的其他基本参数包括离子组成，以及带电粒子的能量分布（或有效温度）。离子组成取决于尘埃材料和靶材，并随撞击速度显著变化。研究人员在实验室中使用多种尘埃材料和实验装置研究撞击等离子体的离子组成：从撞击等离子体中提取离子，随后采用飞行时间技术进行分析（[例如，*Fiege et al.,* 2014；*Hillier et al.,* 2014；2018；*Srama et al.*，2009]）。一般而言，在高速（> 20 千米/秒）撞击下，离子组成以单电荷原子种类为主；而在较低撞击速度下，较高质量的分子离子和团簇离子则占有显著比例。根据针对少数尘埃与靶材组合开展的实验室实验，电子和离子的有效温度范围分别为 1–4 电子伏特和 4–15 电子伏特（[*Collette et al.,* 2016；*Nouzák et al.*，2020；*Kočiščák et al.*，2020]）。

有效温度与计算航天器收集或逃逸的载流子比例有关。

Shen 等人 [2021b] 提出的静电模型与使用缩比航天器模型在实验室采集的实验数据吻合良好。然而，这些实验室测量仅考察了有限的天线配置、撞击速度范围和尘埃材料参数空间。本研究将进一步拓展这三个具体参数，如下文所述。

（1）天线配置：

根据静电模型，撞击等离子体在航天器和天线上产生电压信号有两种主要物理机制：电荷再收集和感应充电。对于前者，撞击等离子体中的一部分电荷会被航天器表面收集。对于后者，逃逸的撞击等离子体会产生感应充电信号。电子逃逸发生的时间尺度通常难以用天线电子设备分辨。然而，离子逃逸较慢，且研究发现，相应的感应电荷主要决定了撞击信号的特征形状和持续时间。持续时间与离子膨胀速度成反比（即膨胀越慢，持续时间越长）。观测证据还表明，离子以发散束的形式逃逸。当这束离子掠过天线时，该天线会检测到增强的正电荷。

Shen 等人 [2021b] 证明了这种效应适用于单极天线配置，即测量天线与航天器之间的电势差。本研究展示了天线配置为偶极时的测量结果，即测量两个天线元件之间的电势差。以往研究表明，与以单极模式工作的天线相比，偶极配置的天线对尘埃撞击的敏感度低得多 [例如，*Tsintikidis*等人，1994；*Meyer-Vernet* 等人，2009 年、2014 年；*Ye* 等人，2016 年、2020 年，*Zaslavsky* 等人，2021]。*Ye* 等人 [2016] 报告了卡西尼号航天器在土星系统中环平面穿越期间的观测结果；穿越进行到一半时，天线工作模式从单极模式切换为偶极模式。数据清楚表明，单极模式下的尘埃撞击信号显著更强。作者认为，偶极模式主要探测天线杆上的撞击

而非航天器上的撞击。*Meyer-Vernet* 等人 [2014] 和*Zaslavsky*等人 [2021]报告了偶极模式下尘埃撞击的观测结果，并将其解释为撞击等离子体的电场在天线上感应出的信号。*Nouzák* 等人 [2018]使用卡西尼号航天器的缩比模型进行了实验室模拟测量。这项实验表明，以偶极模式工作的天线对航天器本体或单极天线上的撞击不敏感。然而，这些测量仅限于少数几个距离偶极天线相对较远的撞击位置。另一方面，*Page*[2020] 最近的一项研究报告称，帕克太阳探测器任务中的天线对偶极模式和单极模式下的尘埃撞击具有相近的敏感度。本研究修正了*Nouzák* 等人 [2018] 的实验结果，并表明，当撞击位置使撞击等离子体扩展至某一天线周围，且该扩展在天线对之间不对称时，偶极天线也会对尘埃撞击产生响应。

（2）撞击速度：

观测证据表明，即使尘埃质量和撞击速度相近，不同尘埃撞击事件所产生的撞击等离子体（包括产生的总电荷）特性也可能存在显著差异。在20 km/s的速度下，这种差异不太明显，此时撞击等离子体的表现相对“稳定”，即应用*Shen* 等人 [2021a, 2021b] 的静电模型拟合测得的天线信号时，会得到一致的拟合参数。本研究报告了在较低撞击速度（约5 km/s）下，天线信号存在较大变异。这些测量结果表明，撞击等离子体参数的高度变异可能会使有效尘埃撞击事件的识别及其统计分析更加复杂。

天线信号波形中尘埃撞击识别这一固有难题总是使数据分析变得复杂。从理论上讲，具有特征性信号形状（包括前脉冲、主峰和放电曲线 [*Nouzák* 等， 2018]）的信号可以用来判断是否发生了撞击。识别的首要前提是，撞击信号必须呈现所述特征，并且高于信噪比阈值。因此，轻微撞击（例如动量较小的尘埃颗粒）或不常见的波形（振幅饱和或呈波动状）可能会被舍弃。其次，由于“发育不充分的”

撞击等离子体云，或者仅仅因为某些任务所搭载的前端电子设备速度不够快，无法捕获快速的电子逸出，前脉冲特征可能并不总能被记录到。第三，环境等离子体的变化会导致放电时间常数各不相同：等离子体密度越高，信号就越短暂，反之亦然。尘埃撞击识别通常采用峰值检测器。恰当的信号滤波和经验分析有助于在电信号中区分瞬态尘埃撞击与等离子体波测量。从本质上说，从背景噪声中提取撞击波形并将其与等离子体波测量区分开来，正是问题的关键。

（3）尘埃材料：

先前的实验室测量通常采用铁—钨尘埃—靶材材料组合进行。这样做是为了消除一个可能使不同实验批次结果的直接比较变得复杂的潜在变量。采用铝—钨材料组合开展了一组独特的实验室测量，以表明*Shen* 等人[2021a；2021b]的结果和静电模型并不局限于单一的特定材料组合。

2. 实验装置

以下测量所用的实验装置与先前研究中使用的装置类似 [*Shen* 等人，2021b]。简而言之，实验室中用一个直径为 $R_{SC} = 7.5.\ \mathrm{cm}$ 的导电球体来模拟航天器（SC）（图 1）。四根天线安装在航天器模型的同一平面上，彼此相隔 90°。天线长 $L_{ANT} = 27\ \mathrm{cm}$，直径为 1.6 mm。球形本体和四根天线均由不锈钢制成，球形本体表面则涂覆石墨涂料，以确保表面电势均匀 [*Robertson* 等人，2004]。使用有机溶剂清洁未涂覆的表面。一条钨（W）箔带缠绕在航天器模型的圆周上，与天线安装在同一平面。使用钨作为尘埃撞击靶材，以便测量结果可与 *Nouzák* 等人 [2018, 2020] 和*Shen* 等人 [2021a，2021b]报告的先前结果直接比较。航天器模型安装在大型真空室（直径 1.2 m，长度 1.5 m）中心的垂直旋转轴上；实验在高真空环境下进行，$\sim 10,^{6}$ Torr，且没有背景等离子体。

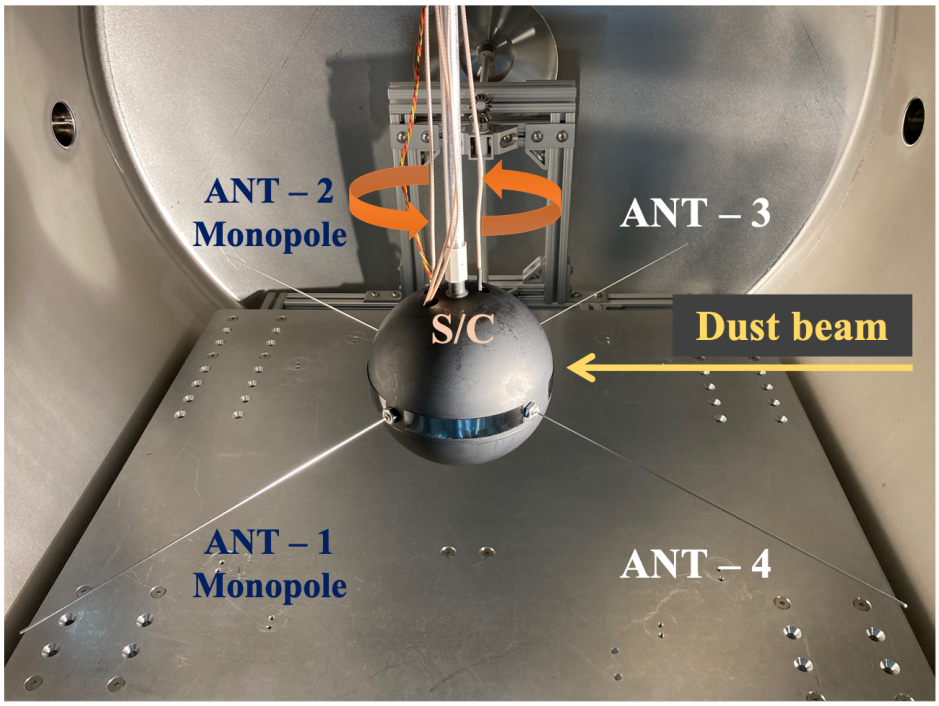


图1：真空室内安装了四根圆柱形天线的球形航天器模型。详情请参阅正文。

四根天线配置为一组偶极天线对（$V_{meas} = V_{ANT,\ 3} - V_{ANT,\ 2}$）和两个独立的单极天线（$V_{meas} = V_{ANT,\ 1} - V_{SC}$ 或$V_{ANT,\ 2} - V_{SC}$）。前一种配置测量的是两根天线之间的电压差，后一种配置测量的则是相对于航天器本体的信号。电子设备由装在航天器球形本体内的三个通道仪表放大器组成。放大器的电压增益为 50，带宽为 270 Hz–5 MHz；具体说明见 Shen 等人 [2021a]。实验室模型的每个部分，即航天器本体和四根天线，均可通过大阻值电阻独立偏置，分别为 $R_{bias,\ SC} = 2.5\ M\Omega$ 和$R_{bias,\ ANT} = 5M\Omega$[Shen 等人，2021b]。本研究中，航天器和天线偏置在相同电势。偏置电阻为每个部分提供放电通路。结合航天器（$C_{eff,\ SC} \approx 42$ pF）和天线（$C_{eff,\ ANT} \approx 16$ pF）各自的有效电容，可计算出特征 RC 放电时间常数分别为 $R_{bias,\ SC}C_{eff,SC} = 105$ μ s 和 $R_{bias,\ ANT}C_{eff,\ ANT}$ =80 μ s。有效电容的计算方法见 Shen 等人 [2021b]。使用快速数字化示波器记录三个放大器测得的波形。

科罗拉多大学运行的尘埃加速器设施用于提供速度约为1–40 km/s的亚微米颗粒 [*Shu* 等人，2012]。实验采用了铁（Fe）和铝（Al）尘埃样品。铁-钨（尘埃-靶材）组合的测量结果可与*Collette* 等人[2015；2016], *Nouzák* 等人 [2018；2020], 以及*Shen* 等人[2021a；2021b]所开展的研究直接比较。本研究还加入了铝尘埃的测量，以探究撞击体材料变化带来的影响。

3. 实验数据

3.1 天线配置导致的信号变化

图2概述了在3号天线与4号天线之间不同撞击位置测得的典型天线信号。图中所示信号来自两个单极天线（#1和#2）以及一组偶极天线对，其中测得的信号为 $V_{meas} = V_{ANT,3} - V_{ANT,2}$（见图1）。各列对应于从3号天线起算、分别为10°、30°和45°的撞击位置；各行则对应不同的施加偏置电势：0 V、+5 V和– 5 V。相同的偏置电势施加于所有部件，即航天器本体和四根天线。所研究偏置电势范围的限制源于尘埃加速器的可用条件。+5 V偏置电势代表航天器在行星际空间中的典型情况。所有采集到的撞击事件均来自铁-钨尘埃-靶材组合，撞击速度为≥ 20 km/s。

0 V 和 +5 V 偏置电压对应的单极信号具有特征形状，*Shen* 等人 [2021b]通过静电模型对其进行了详细描述。简而言之，信号首先出现一个尖锐负尖峰，这是自由电子快速逃逸所致；这些电子离开后，航天器带有净正电荷。随后较缓慢的正向上升，是由于较慢的离子逃逸，使航天器带负电荷所致。该上升的时间常数约为 R_{SC}/v_i ，其中 $v_i \approx 10$ km/s 是典型的离子膨胀速度 [，例如 *Shen* 等人， 2021a]。之后的缓慢衰减，则是航天器通过电子设备的偏置电阻放电所致（第 2 节）。

在较高撞击速度下，常见的观测结果是，偏置电压为 0 V 时，逃逸电子的总电荷约为逃逸离子的一半。这会产生非零的总收集电荷，以及空间仪器经常观测到的天线信号特征形状。对此现象的物理解释是，在撞击等离子体膨胀的早期阶段，自由电子会形成各向同性分布，因此随着等离子体云膨胀，其中一半电子会自然地被航天器重新收集

到 [航天器上，例如 *Shen* 等人，2021a、2021b]。0 V 与 +5 V 偏置电压情况下的主要区别在于，+5 V 偏置时尖锐负尖峰的相对振幅较小。由于典型的有效离子温度大于 5 电子伏特 [*Collette* 等人，2016；*Nouzák* 等人，2020，*Kočiščák* 等人，2020], 因此，+5 V 偏置电势下波形中由离子主导的部分与偏置电压为 0 V 时的情况相似。对此的物理解释是，带正偏置电势的航天器能够让逃逸的电子比例较小。另一方面，在 –5 V 偏置电势下，更多电子能够逃逸，而部分离子会被航天器重新收集 [另见 *Nouzák* 等人，2018；2020]。

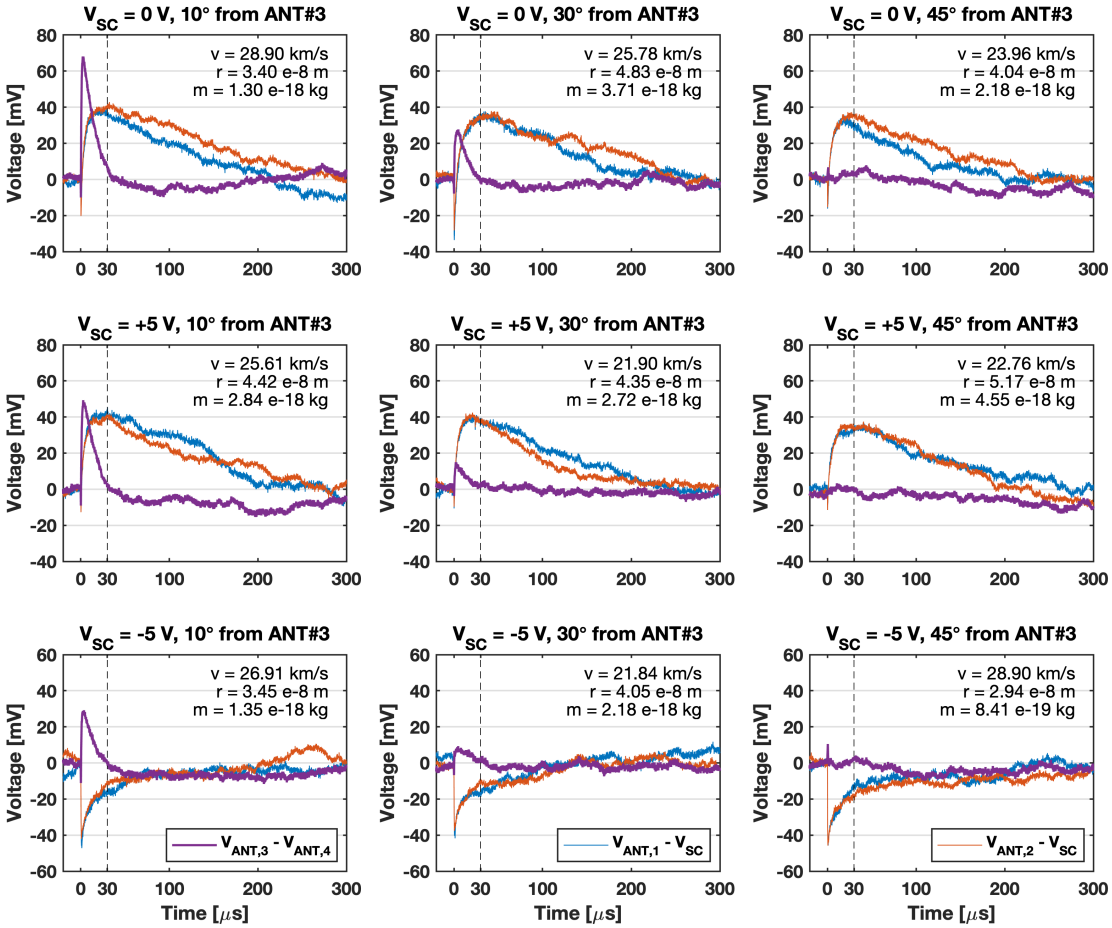


图 2：实验室测得的偶极（紫色）和单极（蓝色和橙色）天线信号，分别对应三个撞击位置（按从左至右的列依次为 10°、30° 和 45°）以及三个偏置电压（按从上至下的行依次为 0V、+5V 和 -5V）。各面板分别标出了铁尘埃颗粒的撞击速度（v）、尘埃半径（r）和质量（m）。竖直虚线标记撞击后 30 μs 的位置。

两根单极天线的信号非常相似。这是因为撞击位置远离两根天线，膨胀的撞击等离子体与这些天线元件几乎没有相互作用。换言之，这些单极天线上的信号主要由航天器充电所主导。10°撞击位置的偶极信号最为显著，此处正离子云在3号天线上方膨胀，产生了信号的正振幅。在这一最显著的情形下（10°撞击位置，0 V或+5 V偏置电势），偶极信号的振幅可与单极信号一样大，甚至更大。这是因为天线元件的有效电容低于航天器的有效电容，因此，即使天线上只有少量感应电荷，也能产生显著的电压信号。

从测得的偶极信号中还可以观察到另外三个有趣的现象。首先，图2所示的所有情况中，信号的特征持续时间均约为30微秒。时间常数由天线长度和离子膨胀速度L_{ANT}/v_i决定。其次，随着撞击位置与3号天线之间的相对距离增大，偶极信号逐渐减弱。在45°撞击位置，即恰好位于两根偶极天线之间时，信号始终接近于零。这表明，撞击等离子体中的离子膨胀云团近似对称，至少对于本研究考察的法向撞击方向而言是如此。值得注意的是，钨靶条的表面粗糙度与尘埃粒子的尺寸处于相近的量级（~ 50 纳米）。第三个现象是，在10°撞击位置仍能观察到尖锐负尖峰，但在45°撞击位置该尖峰基本消失。后一种情况下残留的尖峰可能是由电子云膨胀的不对称性，或天线几何形状及其安装方式的细微差异造成的。如上所述，对于单极天线，这一特征是由快速逃逸电子引起的。然而，对于偶极天线，由于两根天线之间的对称性，预计这一特征会消失。一种合理的解释是，在10°偶极天线的情况下，天线直接感测到逃逸电子产生的感应电荷，而不是航天器所感测到的相应电荷。

3.2 低速尘埃撞击的特征

图 3 展示了铁尘埃以较低撞击速度（约 5 km/s）撞击时测得的一组单极信号。上面三行展示了不同施加偏置电势下的情况，分别为 0 V、+5

V 和 –5 V；每种偏置条件下均附有两个单个事件。撞击位置位于单极天线 #1 和 #2 之间的 45° 处。由于模型航天器的几何对称性（见图 1），理想情况下，两个单极信号在定性上应当相似。

高速和低速撞击信号既有相似之处，也存在差异。就信号的一般特征而言，快速向负方向变化的信号表明自由电子逸出，随后是较慢的离子逸出，并通过放电恢复。首先，在低撞击速度下，逸出电子与离子的数量大致相等，0 V 偏置电压的情况便说明了这一点。可能的解释是，撞击等离子体中的电子速度分布不再各向同性，或者并非所有离子都在逸出。由于净收集电荷接近于零，撞击信号的持续时间因此取决于离子的动力学（$\sim R_{SC}/v_i$），而非航天器的特征放电过程。

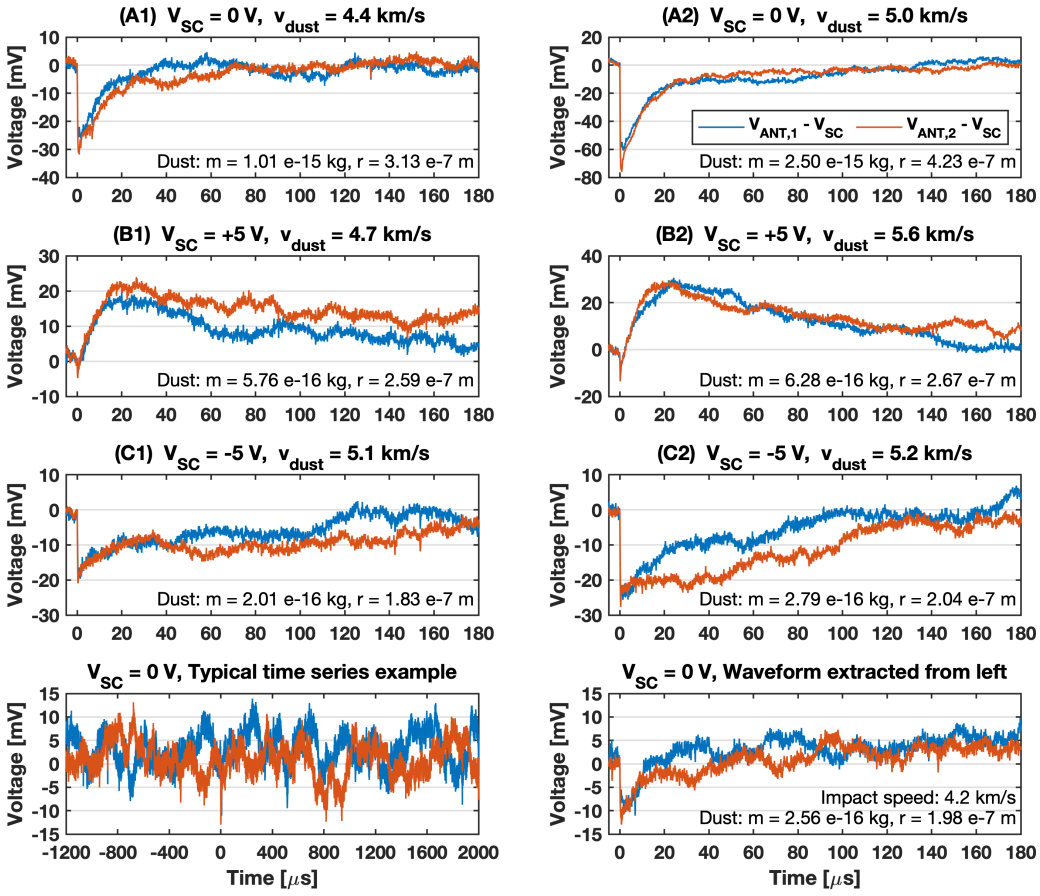


图 3：实验室测得的低速粒子（≅ 5 km/s）的典型单极波形；撞击位置位于天线 #1 和 #2 之间的 45° 处，测量采用了三种偏置电压。图中列出了单个事件中尘埃粒子的质量、尺寸和速度。

信号中缺少明显的主峰，使得撞击发生难以识别。另一方面，施加偏置电压会改变逸出电子/离子电荷的比例平衡，从而产生非零净收集电荷。请注意，施加 +5 V 偏置电压会使航天器重新收集更多电子，从而使波形上移；电子逃逸信号不那么明显，而由逸出离子产生的信号则更为突出。这使信号更接近高速尘埃撞击的情形。观测到的复杂多变形态源于撞击产生的等离子体具有复合性质，但阴离子的作用尚未得到系统讨论。尽管如此，阴离子的产生仍被认为是次要效应 [*Kočiščák* 等人，2020年及其中所引参考文献]。

底部面板展示了一个撞击事件的示例波形，该事件产生的撞击电荷较少，且信噪比较低。右下方面板显示了左下方面板中撞击波形的一个子集。在实验室实验中，尘埃撞击的起始时间是已知的，但在空间测量中则未知。这说明，如果没有特征性信号特征，尘埃撞击识别会面临困难。例如，前沿（前置尖峰）可被视为信号识别中的触发器；然而，这在很大程度上取决于电子学响应。

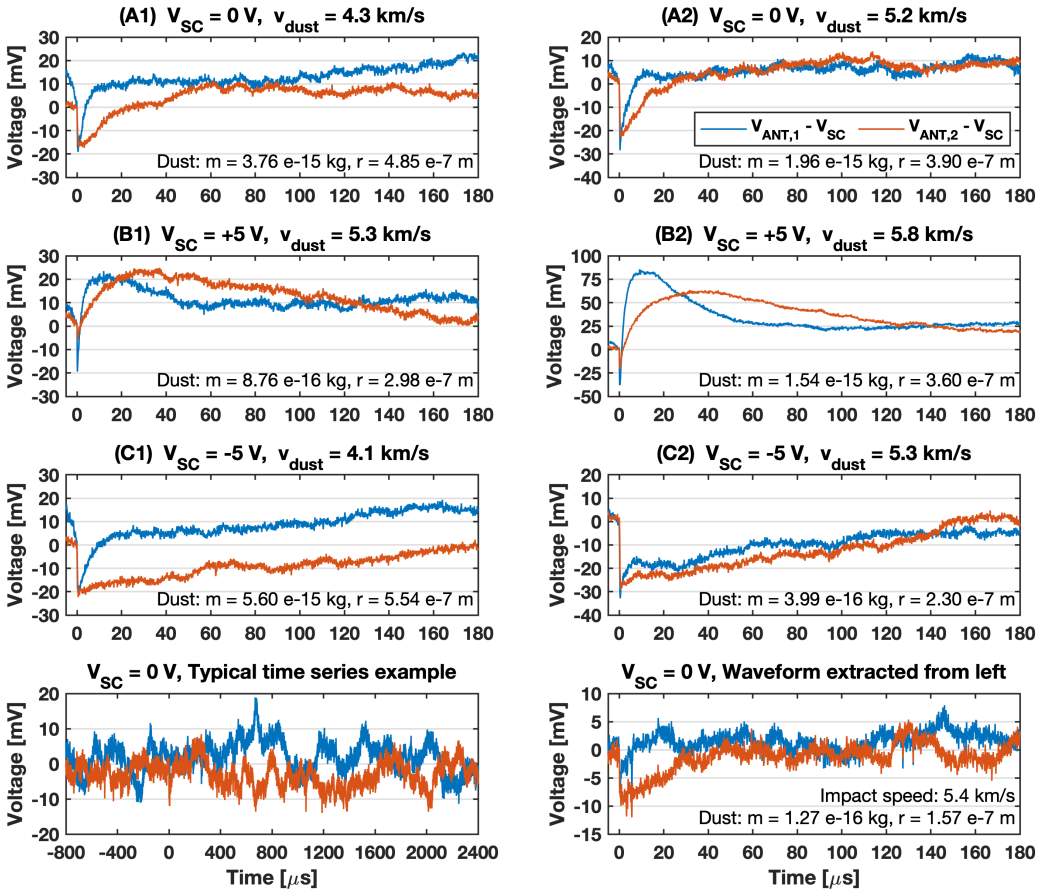


图4：在实验室中测得的典型单极波形，测量位置为相对于天线 #1 的 10° 方向，采用三种不同的偏置电压。图中标出了低速尘埃颗粒（≅ 5 千米/秒）的特性。

图 4 展示了当撞击位置距天线 #1 为 10° 时，在天线 #1 和 #2 上测得的典型单极信号。不同单个事件之间存在很大差异。首先，由于逃逸电子在附近的天线 #1 上产生了额外的感应充电（如*Shen* 等人 [2021b]所述），两个单极信号中负向前置峰的幅度有所不同。其次，在上方六个面板中，每个事件的主峰信号上升（由逃逸离子引起的感应充电）在单极 #1 上都早于单极 #2，时间差小于 30 μs。请注意，考虑到离子膨胀速度的典型值约为 10 km/s，这个 30 μs 代表膨胀等离子体云穿过天线的特征时间尺度。然而，低速撞击产生的离子不太可能移动超过 10 km/s。相反，这表明离子羽流的角分布可能

与速度较高的撞击（≥ 20 km/s）所产生的等离子体相比，其空间分布更为发散。撞击等离子体云的角向膨胀与天线几何形状相互作用，使主峰提前增强；再加上前文所述逃逸带电粒子数量相当的现象，特征时间常数因此缩短，信号也偏离了特征形状，从而使撞击识别以及对波形进行更详细的分析变得困难 [例如，*Shen* 等人 2021a; 2021b]。

一般而言，低速尘埃撞击产生的信号幅度较小，这是因为撞击产生的撞击电荷较少，且撞击时撞击等离子体未能充分发展，因此难以从背景噪声中提取这些信号。值得注意的是，仍可通过天线信号的功率谱将这些撞击发生识别为宽带噪声 [*Aubier* 等人, 1983; *Meyer-Vernet* 等人, 2009]。然而，这种信号形式所提供的撞击体信息有限。

3.3 信号随尘埃成分的变化

采用铝-钨尘埃-靶材组合进行了一组独特的测量，为了与*Nouzák* 等人[2018, 2020] 和 *Shen* 等人[2021a, 2021b]开展的铁尘埃撞击先前研究进行比较，撞击速度限制为≥ 20 km/s。图5所示的单极信号涵盖两个撞击位置（距天线#1分别为45°和10°）以及施加在航天器上的三种偏置电压（0V、+5V和-5V）。

单个事件的信号特征，包括前脉冲以及离子云膨胀产生的主峰（随后是航天器放电），与*Shen* 等人 [2021b] 及其所引文献中报告的铁尘埃撞击测量结果在定性上相似。关于偏置电压和撞击位置的信号变化——离子云膨胀导致天线感应充电（见单极 #1 中的主峰，尤其是 10° 列）——也极为相似。信号产生机制的全面表征已在*Shen* 等人 [2021a, 2021b]中讨论。

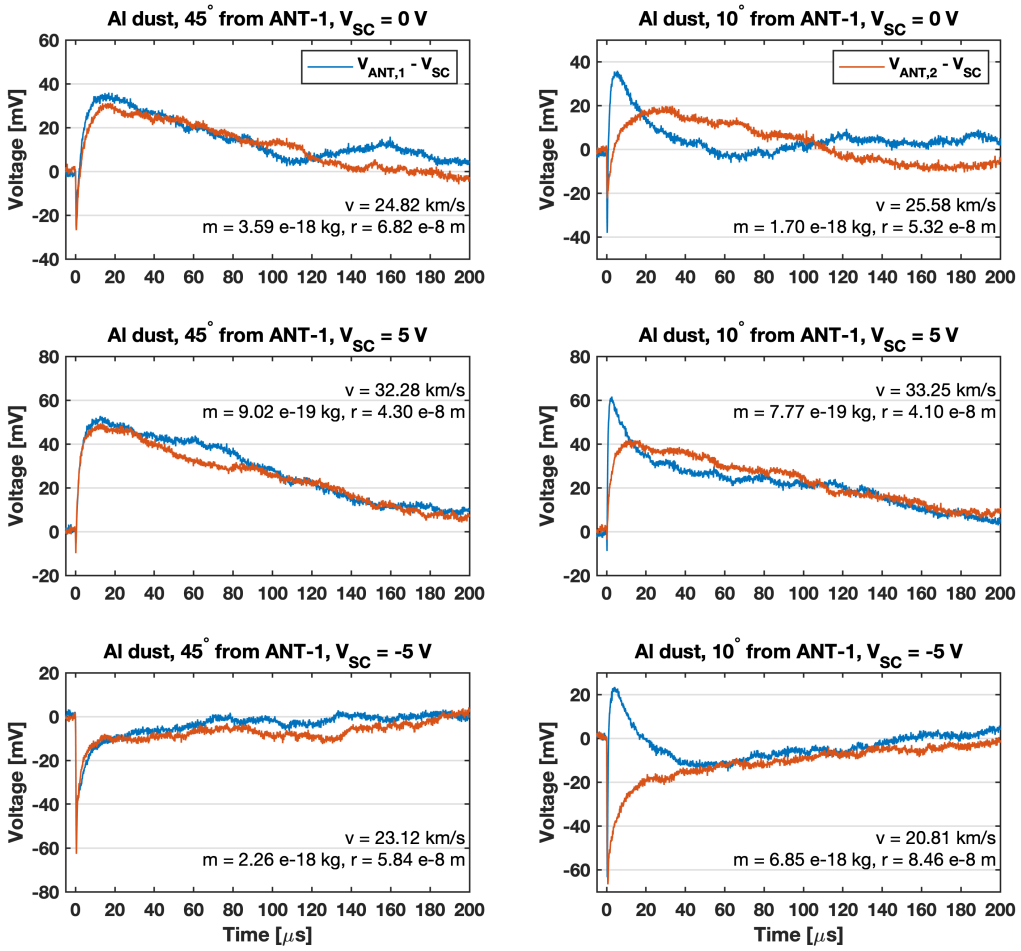


图5：在实验室中测得的典型单极波形：天线#1在三种不同偏置电压下，分别以45°（左列）和10°（右列）测得。尘埃—靶材组合为铝—钨（Al-W）。尘埃粒子的属性以标注形式给出。

图 6 给出了铝尘埃撞击天线 #1 和 #2 之间 45° 位置的一个模型拟合示例（波形取自图 5 左上面板）。航天器和四根天线的偏置电压均设为 0V。尽管撞击位置恰好位于两者之间的 45° 方向，两个单极信号仍不相同。这是以下因素叠加造成的：(1) 不同的天线电容分别为$C_{ANT,\ 1} = 9.5$ pF 和 $C_{ANT,\ 2} = 10.5$ pF；(2) 撞击等离子体云膨胀的几何形态。利用*Shen* 等人 [2021b], 提出的静电模型，通过电子电路图，采用业界标准的 SPICE（集成电路仿真程序）软件，在模型拟合中考虑了元件间的电容耦合。所得拟合参数包括撞击电荷（Q_{IMP}）、离子膨胀速度（v_i）、几何

系数（κ），以及负（下标 e）和正（下标 i）振幅相对于单极子振幅的辅助参数（$\zeta_{e,\ ANT-1}$，$\zeta_{i,\ ANT-1}$，$\zeta_{e,\ ANT-2}$，$\zeta_{i,\ ANT-2}$）（[*Shen* 等人，2021b]）。这些辅助参数用于补偿特定天线因撞击等离子体云膨胀角分布而产生的感应充电。

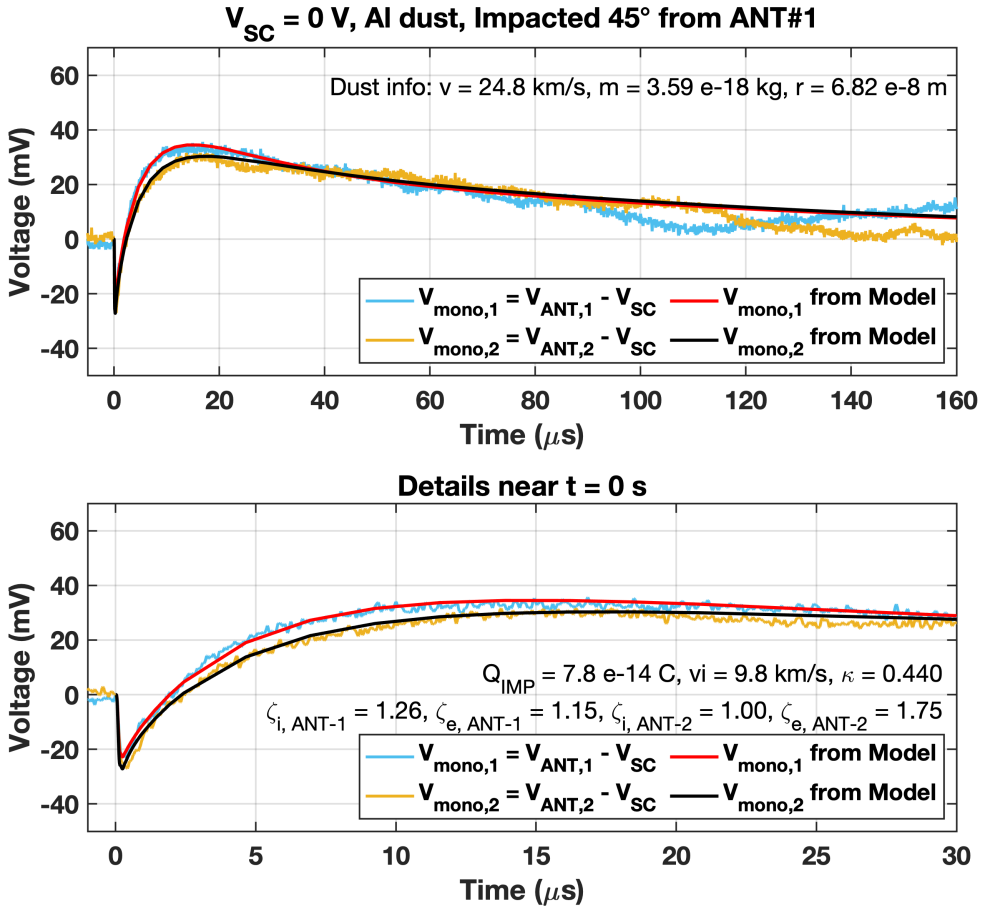


图 6：实验室测得的单极波形：铝尘埃从天线 #1 的 45° 位置撞击（与图 5 左上面板相同）。尘埃粒子的属性见上方面板，撞击等离子体膨胀的详细早期阶段和拟合参数标注在下方面板中。

得到的撞击等离子体拟合参数为 $Q_{IMP} = 7.8 \times 10^{-14}$ C 和 $v_i = 9.8$ km/s，对应的两个控制变量为 $\kappa = 0.44$ 和 $v_e = 10^3$ km/s。κ 系数表示撞击地点的视场，在该视场内，各向同性电子可以不受遮挡地逃逸。该系数被视为 SC表面属性，并设为与 *Shen* 等人 [2021b] 所提供的值相同（SC模型和撞击位置相同，参见该文中的图 6）。电子逃逸速度

v_e 被设为适当的热速度，即 2 电子伏特 [*Shen* 等人， 2021a]。这两个拟合值 Q_{IMP} 和v_i处于合理范围内，与先前研究的结果一致。

引入辅助参数以优化拟合。每个参数分别表示从特定天线视角观测到的逃逸电子和阳离子的膨胀行为。结果表明，对于单极 #1，$\zeta_{e、ANT、1} = 1.15$ 和 $\zeta_{i、ANT、1} = 1.26$；而对于单极 #2，$\zeta_{e、ANT、2} = 1.75$ 和 $\zeta_{i、ANT、2} = 1$ 。与*Shen* 等人 [2021b]中给出的结果相比，这些数值在$\zeta \geq 1$ 45°撞击位置的合理范围内。需要注意的是，现有模型将逃逸带电粒子简化为以恒定速度沿径向远离撞击地点运动的点源。然而，撞击产生的电子和阳离子分别会呈现各向同性分布和圆锥分布。因此，为了在静电模型中根据立体角修正对天线感应充电的低估，这些辅助参数被拟合为≥1。

撞击信号和模型拟合表明，尘埃成分方面没有显著变化。这一结果与*Auer* 和 *Sitte* [1968] 以及*Adams* 和 *Smith*[1971], 的研究一致；他们发现，撞击响应主要与靶材有关，而非撞击体的成分。

4. 总结与结论

本文旨在通过实验，根据撞击位置、航天器电势、天线配置、尘埃成分和撞击速度，表征尘埃撞击产生的等离子体所形成的天线信号的变化。实验室测量采用了球形模型航天器。测试条件包括：（a）超高速尘埃（≥ 20 km/s）撞击时，单极和偶极配置对撞击位置及航天器电势的响应；（b）低速尘埃撞击（~5 km/s）时的信号特征；以及（c）超高速撞击时，不同尘埃成分（铝）下的天线信号特性。对信号波形的特征进行定性表征，并演示了模型拟合。

近期的实验室 [*Nouzák* 等人., 2018] 以及数据分析研究 [*Ye* 等人，2016b；2020]认为，偶极配置中的天线可能对尘埃撞击等离子体不敏感。本研究修正了前人的结论，并通过实验表明，偶极配置中的天线确实能够探测到撞击，前提是撞击等离子体云经过天线对中的某一根天线附近。*Meyer-Vernet* 等人 [2014]提出，来自撞击等离子体的电荷发生静电感应，是天线产生电压信号的机制。*Shen* 等人 [2021b]给出了此类相互作用的详细模型。实验室中偶极与单极尘埃探测的交叉比较表明，前者有助于确定撞击位置并进行源分类，而后者则能提供详细的撞击等离子体参数，用于质量和尺寸测定。建议结合这两种测量方式，利用电场或等离子体波仪器开展全面的尘埃研究。

在较低速度的尘埃撞击（~5 km/s）下，由于撞击等离子体云尚未充分形成，观测到的撞击信号幅度较小且更为复杂。由此产生的波形可能难以与背景噪声区分。航天器处于 0 V 偏压时，逃逸电子与离子数量相等的信号表明，撞击产生的电子不再按速度各向同性分布，或者并非所有离子都具有足够的能量逃逸。据推测，航天器上形成的电压对信号特征的影响，可能比其在高速撞击事件（≥ 20 km/s）中的影响更显著。详细的波形分析或可提高尘埃探测效率，但目前仍缺乏对低速撞击所产生的撞击等离子体的全面表征。

除典型的铁尘埃颗粒外，还选用铝来验证撞击波形是否会随尘埃材料的组成（进而随尘埃撞击等离子体的组成）或尘埃密度而变化。对铁和铝尘埃颗粒所得数据的相似性及相应的数据分析表明，研究结果并非仅适用于此前若干实验研究中使用的铁—钨尘埃—靶材组合。这一发现与 *Auer* 和 *Sitte* [1968] 和 *Adams* 和 *Smith* [1971] 的既有研究一致。

致谢

作者 M.S. 和 Z.S. 对本研究的贡献获得了美国国家航空航天局卡西尼数据分析计划（CDAP）NNX17AF99G号资助的支持。作者 D.M. 的贡献获得了美国国家航空航天局合同NNN06AA01C的支持。本出版物还获得了美国国家航空航天局日球物理学客座研究人员开放计划（HGIO）80NSSC22K0753号资助的支持，该资助支持作者 Z.S. 和 D.M.。尘埃加速器的运行获得了美国国家航空航天局太阳系探索研究虚拟研究所（SSERVI）合作协议公告80NSSC19M0217号资助的支持。作者感谢 John Fontanese 在各实验批次期间操作尘埃加速器。作者感谢物理系的 Craig Joy 为球形航天器模型的加工提供支持。

数据可用性声明

实验室数据（Shen 等人，2022，补充信息数据集）可在 Zenodo 仓库公开获取（https://doi.org/10.5281/zenodo.7047232）。

作者贡献

概念构思 – Z. Sternovsky 正式分析 – M. Shen 经费获取 - Z. Sternovsky, D. Malaspina 调查 – M. Shen 方法学 – M. Shen, Z. Sternovsky 验证 – M. Shen, Z. Sternovsky, D. Malaspina 撰写 – 初稿 – M. Shen, Z. Sternovsky 撰写 – 审阅与编辑 – M. Shen, Z. Sternovsky, D. Malaspina

参考文献

Adams, N. G., & Smith, D. (1971年). 关于微粒撞击现象的研究及高灵敏度微流星体探测器的研制. 《行星与空间科学》, 19(2), 195-204. Aubier, M.G., Meyer-Vernet, N. and Pedersen, B.M. (1983), 土星环面中由尘粒和粒子撞击产生的散粒噪声. 《地球物理研究快报》, 10: 5- 8. https://doi.org/10.1029/GL010i001p00005 Auer, A., & Sitte, K. (1968年). 利用撞击电离探测微流星体的技术 . 《地球与行星科学快报》 , 4(2), 178-183. Auer, S., (2001). 仪器技术，载于《行星际尘埃》， E. Grün、B.A.S. Gustafson、S. Dermott 和 H. Fechtig 编，页码 385–444，Springer，纽约. Babic, K. R., Zaslavsky, A., Issautier, K., Meyer-Vernet, N., & Onic, D. (2022). 尘埃撞击电压信号的解析模型及其在 STEREO/WAVES 数据中的应用. 《天文学与天体物理学》, 659, A15. Collette, A., Grün, E., Malaspina, D., and Sternovsky, Z. (2014年), 常见航天器材料的微流星体撞击电荷产额, 《地球物理研究杂志：空间物理》, 119, 6019– 6026, doi:10.1002/2014JA020042. Collette, A., Meyer, G., Malaspina, D., and Sternovsky, Z., 2015年. 实验室对航天器尘埃撞击天线信号的研究. 《地球物理研究杂志：空间物理》 120 (7), 5298–5305. Collette, A., Malaspina, D., and Sternovsky, Z., (2016). 超高速尘埃撞击等离子体的特征温度. 《地球物理研究杂志：空间物理》121 (9), 8182– 8187. Fiege, K., Trieloff, M., Hillier, J. K., Guglielmino, M., Postberg, F., Srama, R., ... & Blum, J. (2014). 用高速硅酸盐微粒校准撞击电离探测器的相对灵敏度因子. 《伊卡洛斯》, 241, 336-345. Gurnett, D. A., Grün, E., Gallagher, D., Kurth, W. S., & Scarf, F. L. (1983). 旅行者号等离子体波仪器在土星附近探测到的微米级粒子. 《伊卡洛斯》, 53(2), 236–254. https://doi.org/10.1016/0019-1035(83)90145-8 Gurnett, D. A., Kurth, W. S., Scarf, F. L., Burns, J. A., Cuzzi, J. N., & Grün, E. (1987). 旅行者2号等离子体波仪器在天王星附近探测到的微米级粒子撞击. 《地球物理研究杂志：空间物理》, 92(A13), 14959-14968. Gurnett, D. A., Ansher, J. A., Kurth, W. S., & Granroth, L. J. (1997). 旅行者1号和2号等离子体波仪器在太阳系外部探测到的微米级尘埃粒子. 《地球物理研究快报》, 24(24), 3125–3128. https://doi.org/10.1029/97gl03228 Hillier, J. K., Sternovsky, Z., Armes, S. P., Fielding, L. A., Postberg, F., Bugiel, S., ... & Trieloff, M. (2014). 聚吡咯包覆的磁黄铁矿微粒的撞击电离质谱分析. 《行星与空间科学》, 97, 9-22. Hillier, J. K., Sternovsky, Z., Kempf, S., Trieloff, M., Guglielmino, M., Postberg, F., & Price, M. C. (2018年). 铂包覆橄榄石和以菱镁矿为主的宇宙尘埃类似物的撞击电离质谱分析. 《行星与空间科学》, 156, 96- 110. Kellogg, P.J., Goetz, K., Monson, S.J., 2016年. Wind航天器上的尘埃撞击信号. 《地球物理研究杂志》121 (2), 966–991. https://doi.org/10.1002/2015JA021124.

Kočiščák, S., Fredriksen, Å., DeLuca, M., Pavlů, J., & Sternovsky, Z.（2020年）。橄榄石尘埃撞击等离子体的有效温度。《IEEE等离子体科学汇刊》，48(12)，4298-4304。Kurth, W.S., Averkamp, T.F., Gurnett, D.A., Wang, Z., 2006年。卡西尼号无线电与等离子体波科学仪器对土星E环尘埃的观测。《行星与空间科学》54（9–10），988–998。Malaspina, D. M., Horányi, M., Zaslavsky, A., Goetz, K., Wilson, L. B., & Kersten, K.（2014年）。Wind/WAVES电场仪器观测到的行星际尘埃和星际尘埃。《地球物理研究快报》，41(2)，266–272。https://doi.org/10.1002/2013gl058786 Malaspina, D. M., Szalay, J. R., Pokorný, P., Page, B., Bale, S. D., Bonnell, J. W., ... & MacDowall, R. J.（2020年）。内日球层中行星际尘埃变化的原位观测。《天体物理学杂志》，892(2)，115。Meyer-Vernet, N., Lecacheux, A., Kaiser, M. L., and Gurnett, D. A.（2009年），射频下的纳米颗粒探测：木星尘埃流撞击卡西尼号/RPWS，《地球物理研究快报》，36，L03103，doi:10.1029/2008GL036752。Meyer-Vernet, N., Moncuquet, M., Issautier, K., & Lecacheux, A.（2014年）。单极天线对尘埃观测的重要性：为什么Wind/WAVES无法探测纳米尘埃。《地球物理研究快报》，41(8)，2716-2720。Meyer-Vernet, N., Moncuquet, M., Issautier, K., and Schippers, P.（2017年），利用无线电与等离子体波接收器在空间中探测尘埃的频率范围：理论及其在行星际纳米尘埃撞击卡西尼号中的应用，《地球物理研究杂志：空间物理》，122，8–22，doi:10.1002/2016JA023081。Nouzák, L., Hsu, S., Malaspina, D., Thayer, F. M., Ye, S.–Y., Pavlů, J., Němeček, Z., Šafránková, J. and Sternovsky, Z., 2018年。卡西尼号航天器尘埃撞击探测的实验室建模。《行星与空间科学》156，85–91。Nouzák, L., Sternovsky, Z., Horányi, M., Hsu, S., Pavlů, J., Shen, M. H., & Ye, S. Y.（2020年）。尘埃粒子撞击诱发的天线信号的磁场效应。《地球物理研究杂志：空间物理》，125(1)，e2019JA027245。Page, B., Bale, S. D., Bonnell, J. W., Goetz, K., Goodrich, K., Harvey, P. R., ... & Szalay, J. R.（2020年）。利用帕克太阳探测器FIELDS仪器研究尘埃方向性。《天体物理学杂志增刊系列》，246(2)，51。Pusack, A., Malaspina, D. M., Szalay, J. R., Bale, S. D., Goetz, K., MacDowall, R. J., & Pulupa, M.（2021年）。帕克太阳探测器探测到的尘埃方向性与异常行星际尘埃群。《行星科学杂志》，2(5)，186。Robertson, S., Sternovsky, Z., & Walch, B.（2004年）。环形彭宁阱中的非对称输运减小。《等离子体物理学》，*11*(5)，1753–1756。http://doi.org/10.1063/1.1688337 Shen, M. M., Sternovsky, Z., Horányi, M., Hsu, H.-W., & Malaspina, D. M.（2021a）。航天器上的尘埃撞击产生的天线信号的实验室研究。《地球物理研究杂志：空间物理》，126，e2020JA028965。https://doi.org/10.1029/2020JA028965 Shen, M. M., Sternovsky, Z., Garzelli, A., & Malaspina, D. M.（2021b）。尘埃撞击产生天线信号的静电模型。《地球物理研究杂志：空间物理》，126，e2021JA029645。https://doi.org/10.1029/2021JA029645 Shen, M.（2021c）。利用天线仪器探测宇宙尘埃——建模与实验室测量（订单号28651348）。可从ProQuest学位论文获取

Global。（2572580419）。取自https://www.proquest.com/dissertations-theses/cosmic-dust-detection-antenna-instruments/docview/2572580419/se-2 Shen, Mitchell M., Sternovsky, Zoltan, & Malaspina, David M.（2022年）。《尘埃撞击产生的天线信号变化》的补充数据 [数据集]。Zenodo。https://doi.org/10.5281/zenodo.7047232 Shu, A., Collette, A., Drake, K., Grun, E., Horányi, M., Kempf, S., Mocker, A., Munsat, T., Northway, P., Srama, R., Sternovsky, Z., and Thomas, E., 2012年。科罗拉多月尘与大气研究中心的3 MV 超高速尘埃加速器。《科学仪器评论》83（7），075108。Srama, R. 等有机微粒超高速撞击的质谱分析。《质谱快速通讯》 **23**，3895–3906（2009年）。Szalay, J. R., Pokorný, P., Bale, S. D., Christian, E. R., Goetz, K., Goodrich, K., ... & McComas, D. J.（2020年）。近太阳尘埃环境：帕克太阳探测器的初始观测。《天体物理学杂志增刊系列》，246(2)，27。Tsintikidis, D., Gurnett, D., Granroth, L. J., Allendorf, S. C., & Kurth, W. S.（1994年）。利用旅行者2号等离子体波仪器对土星附近探测到的微米级颗粒进行重新分析。《地球物理研究杂志：空间物理》，99(A2)，2261-2270。Vaverka, J., Nakamura, T., Kero, J., Mann, I., Spiegeleer, A. D., Hamrin, M., Norberg, C., Lindqvist, P., & Pellinen-Wannberg, A.（2018年）。磁层多尺度任务航天器搭载的多部电场天线探测到的尘埃撞击与孤立波特征的比较。《地球物理研究杂志：空间物理》，123(8)，6119–6129。https://doi.org/10.1029/2018ja025380 Vaverka, J., Pavlů, J., Nouzák, L., Šafránková, J., Němeček, Z., Mann, I., Ye, S., & Lindqvist, P.（2019年）。磁层多尺度任务航天器遭受类尘埃撞击事件的一年分析。《地球物理研究杂志：空间物理》。https://doi.org/10.1029/2019ja027035 Ye, S.-Y., Gurnett, D. A., Kurth, W. S., Averkamp, T. F., Kempf, S., Hsu, H. W., Srama, R. and Gruen, E., 2014年。根据卡西尼号航天器上尘埃撞击诱发的电压脉冲推断土星附近尘埃粒子的性质。《地球物理研究杂志：空间物理》119（8），6294–6312。Ye, S.-Y., Gurnett, D. A., Kurth, W. S., 2016a。基于卡西尼号无线电与等离子体波科学仪器探测到的尘埃撞击信号对土星尘埃环进行原位测量。《伊卡洛斯》279，51–61。Ye, S.–Y., Kurth, W. S., Hospodarsky, G. B., Averkamp, T. F. and Gurnett, D. A., 2016b。利用单极和偶极电场天线进行空间尘埃探测。《地球物理研究杂志：空间物理》，121（12），11964–11972。Ye, S.–Y., Kurth, W. S., Hospodarsky, G. B., Persoon, A. M., Sulaiman, A. H., Gurnett, D. A., Morooka, M., Wahlund, J.–E., Hsu, H.–W., Sternovsky, Z., Wang, X., Horanyi, M., Seiss, M., Srama, R., 2018年。卡西尼号最终阶段无线电与等离子体波科学仪器的尘埃观测。《地球物理研究快报》45（19），101–110。Ye, S.-Y., Vaverka, J., Nouzak, L., Sternovsky, Z., Zaslavsky, A., Pavlu, J., et al.（2019年）。理解卡西尼号无线电与等离子体波科学仪器由尘埃撞击触发的天线信号。《地球物理研究快报》，46，10941–10950。https://doi.org/10.1029/2019GL084150 Ye, S. Y., Averkamp, T. F., Kurth, W. S., Brennan, M., Bolton, S., Connerney, J. E. P., & Joergensen, J. L.（2020年）。朱诺号Waves探测木星附近的尘埃撞击。《地球物理研究杂志：行星》，125(6)，e2019JE006367。Zaslavsky, A., Meyer-Vernet, N., Mann, I., Czechowski, A., Issautier, K., Chat, G. L., Pantellini, F., Goetz, K., Maksimovic, M., Bale, S. D., & Kasper, J. C.（2012年）。行星际尘埃

通过无线电天线进行探测：由STEREO/WAVES测得的质量标定与通量。《地球物理研究杂志：空间物理》（1978–2012），117(A5)，n/a-n/a。https://doi.org/10.1029/2011ja017480 Zaslavsky, A.（2015），微流星体撞击引起的浮动电势扰动：理论及其在S/WAVES数据中的应用。《地球物理研究杂志：空间物理》，120：855–867。doi：10.1002/2014JA020635。Zaslavsky, A.、Mann, I.、Soucek, J.、Czechowski, A.、Píša, D.、Vaverka, J.、……和Vaivads, A.（2021）。利用太阳轨道飞行器无线电与等离子体波仪器进行的首次尘埃测量。《天文学与天体物理学》，656，A30。