

揭示第一代星系 的性质与 JWST 和 ALMA 的关系

M.E. De Rossi¹ & V. Bromm²

¹ Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Argentina

² Department of Astronomy, University of Texas at Austin, Estados Unidos

Received: ... / Accepted: ...

©The Authors 2024

Resumen / El Telescopio Espacial James Webb (JWST) está desafiando nuestra comprensión de la naturaleza de las primeras galaxias del Universo, tras haber descubierto una sorprendente abundancia de galaxias masivas en épocas tempranas. Aplicando un modelo de polvo primigenio, estimamos las luminosidades en el infrarrojo lejano (FIR) para galaxias de diferentes masas a corrimientos al rojo $z \gtrsim 7$. En particular, predecimos los flujos observados para diferentes bandas (3-10) del Atacama Large Millimeter/sub-mm Array (ALMA), considerando valores conservadores típicos para las propiedades de las primeras galaxias (por ejemplo, metalicidades gaseosas, relación polvo-metal, eficiencia de formación estelar). Como era de esperar, los flujos FIR aumentan con la masa estelar para todas las bandas de ALMA, pero con una pendiente mayor para las bandas 9 y 10. Es alentador que las primeras galaxias se vean afectadas por una fuerte corrección K negativa, de modo que las fuentes con propiedades similares son más brillantes en las bandas 3-8 a mayores corrimientos al rojo. Este comportamiento es más fuerte para las bandas 6-7. Aunque las tendencias para las bandas 9-10 no están claras, los flujos más altos para dichas bandas se alcanzan hacia el extremo $z \gtrsim 15$. Contraintuitivamente, nuestros resultados sugieren que las fuentes observadas por el JWST con similares masas y propiedades de polvo serían más fácilmente detectables con ALMA si se encuentran a z mayores.

Abstract / 詹姆斯·韦伯空间望远镜 (JWST) 正在挑战我们对宇宙中第一批星系性质的理解，它发现了早期宇宙时期大量非常庞大的星系。通过应用原始尘埃模型，我们估计了不同质量的星系在红移 $z \gtrsim 7$ 处的远红外 (FIR)-连续光度。特别是，我们预测了阿塔卡马大型毫米/亚毫米阵列 (ALMA) 可用的不同波段 (3-10) 的观测通量，考虑了对第一批星系属性的典型保守预期值（例如，气体相金属含量、尘埃与金属的比例、恒星形成效率）。正如预期的那样，在所有 ALMA 波段中，FIR 光度随着恒星质量增加而增加，但 9 和 10 波段斜率更陡。令人鼓舞的是，第一批星系受到强烈的负 K 校正影响，使得具有相似属性的光源在更高红移时在 3-8 波段显得更亮。这种行为在 6-7 波段尤为明显。尽管对于 9-10 波段的趋势不明确，但对于这些波段来说，最高光度出现在极端 $z \gtrsim 15$ 。反直观地，我们的结果显示，如果 JWST 的源位于更高的 z ，并且质量与尘埃属性相似的话，则它们将更容易被 ALMA 探测到。

Keywords / 早期宇宙 — 星系：高红移 — 星系：星际介质

1. 介绍

第一宇宙结构形成的科学研究正进入一个黄金时代。詹姆斯·韦伯空间望远镜 (JWST) 的出现导致了过去几年中许多重大和令人兴奋的发现。特别是，不同的作者报告了在红移 $z \gtrsim 10$ 处存在比预期更多的大型星系，其起源和性质仍在争论之中 (e.g., Finkelstein

et al., 2022; Labbé et al., 2023; Adams et al., 2023)。为了更深入地了解由 JWST 发现的这些原始大质量源的本质，与其他观测设施的合作将至关重要。在这个意义上，已经有人试图用阿塔卡马毫米/亚毫米波阵列 (ALMA) 探测这些 JWST 源在远红外线 (FIR) 和亚毫米 (sub-mm) 波段中的尘埃连续谱 (e.g., Fujimoto et al., 2023)。

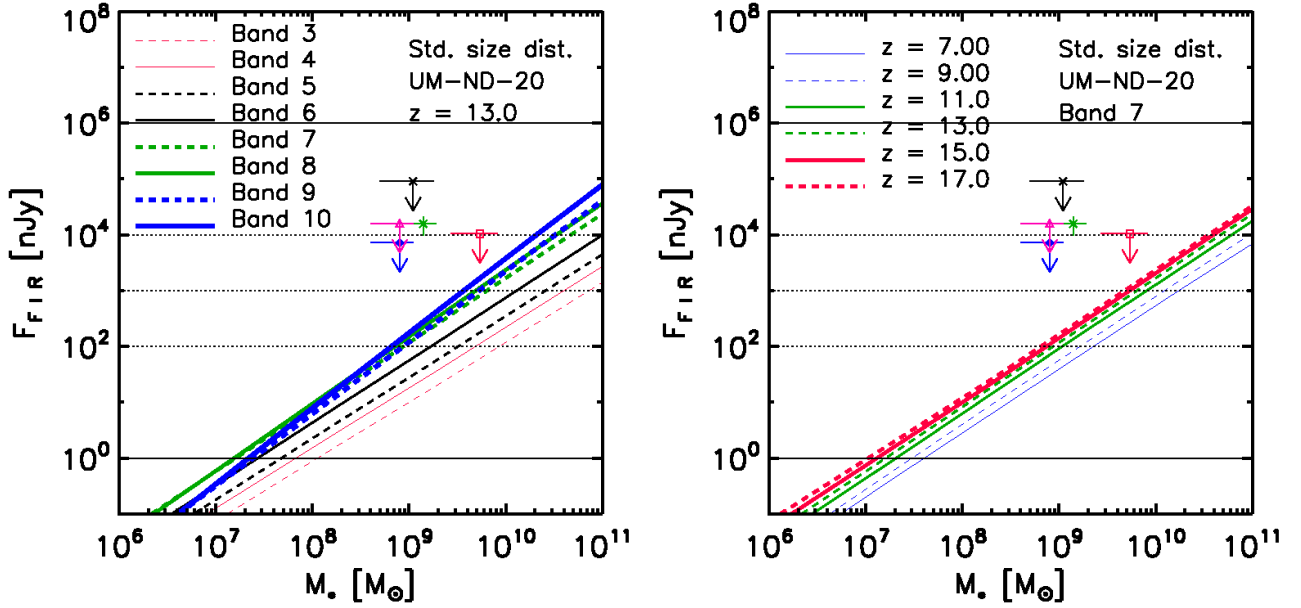


Fig. 1. 平均 FIR 通量作为模型星系中 M_* 的函数。左侧面板：比较不同 ALMA 频段获得的通量，针对位于 $z = 13$ 处的源。右侧面板：比较对应于位于不同 z 处的类似源的 ALMA 第 7 频段获得的通量。不同的符号表示上限（箭头）和文献中报告的一个暂定值（绿色符号）（详见正文）。

在 De Rossi & Bromm (2023) 中，我们实现了一个原始尘埃发射模型，以预测 ALMA 可能在远红外/亚毫米光谱部分检测到的第一批星系的可能信号。根据我们的先前结果，可以用从 ALMA 观测推断出的上极限远红外通量来限制原初星系源中的尘埃分数和气体相金属度 (Z_{gas})。令人鼓舞的是，当我们采用针对典型第一批星系 (e.g., Jaacks et al., 2018, 2019) 预期的模型参数（例如，恒星形成效率 $-\eta$, Z_{gas} ，尘埃与金属质量比 $-D/M$ ）时，我们预测的远红外光谱与从 ALMA 导出的上通量极限一致。特别是，这些观察排除了较高的 Z_{gas} ($\gtrsim 5 \times 10^{-2} Z_{\odot}$) 和 D/M ($\gtrsim 0.06$) 值，除非假设一个较高的 η 。

De Rossi & Bromm (2023) 的分析集中在 $z \sim 13$ 的星系上。对于这类系统，我们评估了模型物理参数变化对 ALMA 第 7 波段观测通量的影响。我们还预测了一个 $M_* \sim 10^9 M_{\odot}$ 星系多波段观测可能产生的通量。在本文中，我们扩展了之前的工作，考虑固定模型参数，并讨论我们的模型对于更广泛的 z 、 M_* 和 ALMA 波段的预测。

2. 尘埃模型

我们实现了在 De Rossi & Bromm (2023) 中描述的尘埃发射模型，该模型又基于在 De Rossi & Bromm (2017) 和 De Rossi & Bromm (2019) 中详细解释的方法。此模型的预测适用于研究高 z (e.g., De Rossi et al., 2018) 处的观测源。为了读者方便，我们在此简要概述我们的模型；更多细节，请参阅上述文章。

我们假设一个模型星系由中心的第二代恒星聚集集体组成，周围环绕着气态和尘埃混合物。我们认为这个系统位于暗物质晕中 $z \gtrsim 7$ 处。在这项工作中，我们采用与所谓的参考集 De Rossi & Bromm (2017) 相对应的模型物理参数： $D/M = 5 \times 10^{-3}$ 、 $Z_g = 5 \times 10^{-3} Z_{\odot}$ 和 $\eta = 0.01$ 。这些是预期对于第一代星系而言典型的保守值 (Greif & Bromm 2006; Mitchell-Wynne et al. 2015; Schneider et al. 2016; 参见 De Rossi & Bromm 2017, 2019)。恒星辐射是通过使用 YGGDRASIL 模型网格 (Zackrisson et al., 2011) 获得的。

关于尘埃的化学成分，我们考虑在 Cherchneff & Dwek (2010) 中描述的基于硅的 UM-ND-20 化学物质，它表现出与 De Rossi & Bromm (2023) 研究模型之间的中间行为。我们也采用在 Ji et al. (2014) 中实

现的标准粒径分布。根据我们的前期工作，我们通过假设热平衡并应用基尔霍夫定律来确定从所得 T_d 轮廓得出的尘埃发射率来估算尘埃温度 (T_d)。

观测到的模型星系中的尘埃特定通量 $f_{\nu, \text{obs}}$ 被估计为：

$$f_{\nu, \text{obs}} = (1+z) \frac{L_{\nu, \text{em}}}{4\pi d_L^2}, \quad (1)$$

其中 $L_{\nu, \text{em}}$ 是总特定尘埃光度， d_L 是红移为 z 的星系的光度距离。

给定 ALMA 频段观测到的平均比通量由以下公式给出：

$$F_{\text{FIR}} = \frac{\int_{\nu_i}^{\nu_f} f_{\nu, \text{obs}} d\nu_{\text{obs}}}{\nu_f - \nu_i}, \quad (2)$$

其中 ν_i 和 ν_f 表示对应于该频段的频率范围。我们评估了与 De Rossi & Bromm (2023) 相同的频段 (Band 3: 84-116 GHz, Band 4: 125-163 GHz, Band 5: 163-211 GHz, Band 6: 211-275 GHz, Band 7: 275-373 GHz, Band 8: 385-500 GHz, Band 9: 602-720 GHz, Band 10: 787-950 GHz)。

最后，我们采用了一个 Λ 冷暗物质 (Λ CDM) 宇宙学模型，其中 $h=0.67$, $\Omega_b=0.049$, $\Omega_m=0.32$, $\Omega_\Lambda=0.68$ (Planck Collaboration et al., 2014)。

3. 结果

在图 1 (左面板) 中，我们将 F_{FIR} 作为模型源位于 $z = 13$ 处的 M_* 的函数进行评估，并考虑不同的 ALMA 波段。我们发现所有分析波段的远红外通量随 M_* 呈现线性增加，且与较高频率相关的波段斜率和归一化程度更大。特别是，具有较高 M_* 的源在不同波段中显示出最大的远红外通量变化，在对应于 ALMA 波段 3 和 10 的 $M_* \sim 10^{11} M_\odot$ 处，通量差异达到 ~ 2 个数量级。图 1 中的不同符号表示在 $z \gtrsim 11$ (Fujimoto et al., 2023, see their tables 1 and 3) 波段选择的星系候选体的 ALMA 观测数据，对应的来源为：S5-z17-1 (波段 7, Fujimoto et al. 2023; 黑色十字)、GHZ1/GLz11 (波段 7, Yoon et al. 2023; 绿色星号)、GHZ2/GLz13 (波段 6, Bakx et al. 2023, Popping 2023; 蓝色圆圈) 和 HD1 (波段 6, Harikane et al. 2022, 粉红色三角形; 波段 4, Kaasinen et al. 2023, 红色正方形)，可能分别位于 $z \approx 18.41$ 、10.87、12.43 和 15.39 位置 (Fujimoto et al., 2023)。对于 GHZ1/GLz11 给出了一个初步的探测结果，而所有其他源的数据则

对应于上限通量。正如 De Rossi & Bromm (2023) 所指出的，只要假设第一代星系中的恒星物质属性具有保守的典型参数值，我们的模型预测就与从 ALMA 推断出的上限通量一致。

在图 1 (右面板) 中，我们分析了模型对频段 7 中 ALMA 流量随 z 变化的预测，这在观测研究中常用。有趣的是，如果系统位于更高的 z ，具有类似 M_* 的系统在远红外线波段会更亮。特别是，当 z 从 7 增加到 17 时，对于所有考虑的 M_* ，流量增加了大约 ~ 1 个数量级。De Rossi & Bromm (2019) 在评估未来空间望远镜在远红外线中检测第一代星系的能力时，获得了类似的趋势。根据这项工作，第一代星系受到强烈的负 K 校正影响。一方面，由宇宙微波背景设定的较高温度下限促使当 z 增加 (e.g., Safranek-Shrader et al., 2016) 时，尘埃亮度更高。另一方面，在更高的 z 时，恒星群体可以更有效地加热尘埃颗粒，因为系统在空间上更加集中。因此，考虑到由 JWST 观测到的类似 M_* 的星系候选体，较高 z 的星系将更容易被 ALMA 检测到。但是，只要尘埃属性不随 z 显著变化，这一点就成立，而目前这一点还不清楚。

图 2 (左面板) 展示了我们模型对应于用 ALMA 进行的多波段观测的不同 M_* 源在 $z = 13$ 处的预测。 F_{FIR} 与中心频带频率之间的关系形状似乎不显著依赖于 M_* ： F_{FIR} 在 3-7 波段随中心频率显示出微弱增加，然后在 7-10 波段该关系趋于平坦。然而，对于后者波段，我们注意到质量较小的星系斜率有非常轻微的下降。特别是，随着 F_{FIR} 在 M_* 中的增加，在较高频率下增幅更大，如图 2 所示：当 M_* 在范围 10^6 – $10^{10} M_\odot$ 内增加时，第 3 波段的通量增加了 ~ 4 个数量级，而第 10 波段的通量则增加了 ~ 6 个数量级。

多波段观测使用 ALMA 对不同 z 的 $M_* = 10^9 M_\odot$ 源进行分析，结果见图 2 (右面板)。很明显，对于类似 M_* 的源， F_{FIR} 与中心频段频率之间的关系形状受到 z 的影响。这可以解释为，随着 z 的增加，尘埃光谱能量分布的不同特征进入每个波段的波长范围 (参见 De Rossi & Bromm 2019 中的讨论)。这些光谱特性是由尘埃颗粒的具体化学成分产生的。因此，ALMA 多频带观测可以提供关于作为 z 函数的尘埃化学信息，使我们能够约束其演化。我们再次注意到，在最高红移 ($z \sim 17$) 处的星系与在 $z = 7$ 处的类似系统相比，在所有波段都更亮，这是由于前

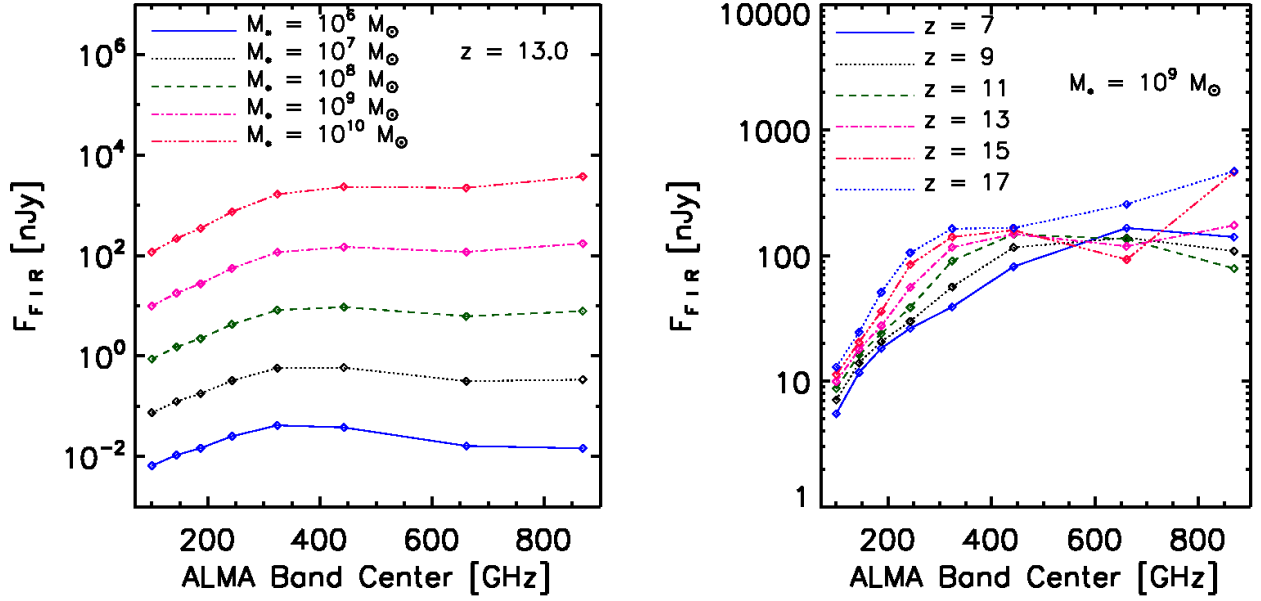


Fig. 2. 平均 FIR 通量与可用 ALMA 频段 (3-10) 的中心频带频率对比。左面板: 不同 M_* 位于 $z = 13$ 处所获得预测的比较。右侧面板: 不同 z 处的 $M_* = 10^9 M_\odot$ 来源所获得预测的比较。

面提到的强大负 K-校正所致。一般来说, 对于 3-8 波段, F_{FIR} 随 z 增加, 在 6-7 波段达到最高变化。 z 的趋势在 9-10 波段中不太明显, 但在我们的最大评估值 $z = 17$ 下这些波段获得了最高的通量。因此, 对于第一批星系获得的这种强烈的负 K 校正可以促进对早期宇宙 (e.g., Gall et al., 2011) 中尘埃的起源和性质的探索。

4. 结论

通过实现一个原初尘埃发射模型, 我们研究了第一代星系在 $z \gtrsim 7$ 波段的可能远红外/毫米波信号。我们预测了不同 ALMA 波段对应的观测通量, 并考虑了处于 $M_* \sim 10^6-11 M_\odot$ 恒星质量范围内的源。与之前的研究一致, 我们的结果符合当前来自 ALMA 的上限通量限制。

如预期的那样, FIR 通量几乎与系统的质量成正比增加, 但斜率取决于考虑的 ALMA 频段。相反的是, 对应于 ALMA 波段 3-8 的通量随着 z 的增加而更高; 因此, 在较大的宇宙距离下, 具有相似质量的源在 FIR 中更亮。这是由于高 z 处星系受到强烈负 K 校正的结果, 这在 De Rossi & Bromm (2019) 中有详细讨论。因此, 如果尘埃性质随着 z 的变化不大, 那么位于较高 z 的给定 M_* 的 JWST 源可能更容易被

ALMA 探测到。

我们的研究结果支持 JWST 和 ALMA 之间的协同作用在探究早期宇宙中尘埃性质方面的巨大潜力, 这反过来又成为宇宙化学演化在最初十亿年 (e.g. Karlsson et al., 2013) 中的一个强有力探测器。

Acknowledgements: 我们感谢 Alexander Ji 提供了用于此处不同尘埃模型的表格形式的尘埃消光率。这项工作利用了 Yggdrasil 代码 (Zackrisson et al., 2011), 该代码采用了基于 Padova-AGB 轨道 (Leitherer et al., 1999; Vázquez & Leitherer, 2005) 的 Starburst99 SSP 模型来处理 Pop II 恒星。我们感谢国家促进研究、技术发展和创新局 (Agencia I+D+i, PICT-2021-GRF-TI-00290, 阿根廷) 的支持。

References

- Adams N.J., et al., 2023, MNRAS, 518, 4755
- Bakx T.J.L.C., et al., 2023, MNRAS, 519, 5076
- Cherchneff I., Dwek E., 2010, ApJ, 713, 1
- De Rossi M.E., Bromm V., 2017, MNRAS, 465, 3668
- De Rossi M.E., Bromm V., 2019, ApJ, 883, 113
- De Rossi M.E., Bromm V., 2023, ApJL, 946, L20
- De Rossi M.E., et al., 2018, ApJ, 869, 4
- Finkelstein S.L., et al., 2022, ApJL, 940, L55
- Fujimoto S., et al., 2023, ApJ, 955, 130
- Gall C., Hjorth J., Andersen A.C., 2011, A&A Rv, 19, 43
- Greif T.H., Bromm V., 2006, MNRAS, 373, 128
- Harikane Y., et al., 2022, ApJ, 929, 1
- Jaacks J., Finkelstein S.L., Bromm V., 2018, MNRAS, 475, 3883

- Jaacks J., Finkelstein S.L., Bromm V., 2019, MNRAS, 488, 7945
 2202
 Ji A.P., Frebel A., Bromm V., 2014, ApJ, 782, 95
 Kaasinen M., et al., 2023, A&A, 671, A29
 Karlsson T., Bromm V., Bland-Hawthorn J., 2013, Reviews
 of Modern Physics, 85, 809
 Labbé I., et al., 2023, Nature, 616, 266
 Leitherer C., et al., 1999, ApJS, 123, 3
 Mitchell-Wynne K., et al., 2015, Nature Communications, 6,
 Planck Collaboration, et al., 2014, A&A, 571, A16
 Popping G., 2023, A&A, 669, L8
 Safranek-Shrader C., et al., 2016, MNRAS, 455, 3288
 Schneider R., Hunt L., Valiante R., 2016, MNRAS, 457, 1842
 Vázquez G.A., Leitherer C., 2005, ApJ, 621, 695
 Yoon I., et al., 2023, ApJ, 950, 61
 Zackrisson E., et al., 2011, ApJ, 740, 13