

# 无线电辐射亮度合并冲击 的兴起与衰落来自大量星系团模拟样本

S.E. Nuza<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Argentina<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

Received: ... / Accepted: ...

©The Authors 2024

**Resumen** / La generación de ondas de choque es una consecuencia natural del proceso jerárquico de formación de estructura. Con el tiempo, las estructuras cósmicas crecen en masa y tamaño mediante fusiones y a través de la acreción continua de material en los pozos de potencial de los halos de materia oscura. En particular, algunos cúmulos galácticos dinámicamente perturbados exhiben radio estructuras no térmicas conocidas como *radio relics*, que se cree están ligadas a choques de fusión en diferentes etapas de evolución. Estas ondas de choque brillan como resultado de la aceleración de electrones relativistas en presencia de campos magnéticos. En esta contribución, se analiza una muestra de re-simulaciones hidrodinámicas de cúmulos galácticos en un contexto cosmológico pertenecientes al proyecto THE THREE HUNDRED PROJECT con el fin de estudiar la evolución de los *relics* en función de la masa cumular y el corrimiento al rojo. Esta muestra sintética nos permite calcular en detalle la radio luminosidad de los choques durante fusiones de cúmulos galácticos desde su generación al comienzo de la fusión hasta su desaparición.

**Abstract** / 合并冲击波的产生是结构形成层次过程的自然结果。随着时间的推移，宇宙结构通过合并和持续向暗物质晕势阱中积累物质而增长质量与尺寸。特别是，一些动态扰动的星系团表现出令人惊叹的非热射电特征，被称为射电源遗迹，人们认为这些射电源遗迹可以追踪到不同演化阶段的星系团合并冲击波。人们认为这些射电冲击波是在星系团内部磁场存在的情况下由宇宙射线电子加速照亮的。在此贡献中，我们分析了属于三百工程的一组大型合并星系团的水动力学、宇宙再模拟数据，以研究射电源遗迹作为函数随星系团质量和红移的中值演化情况。这个合成星系团合并样本使我们能够详细计算从核心通过到消亡过程中射电冲击波的亮度输出。

**Keywords** / 星系：星团：团内介质 — 激波—辐射机制：非热

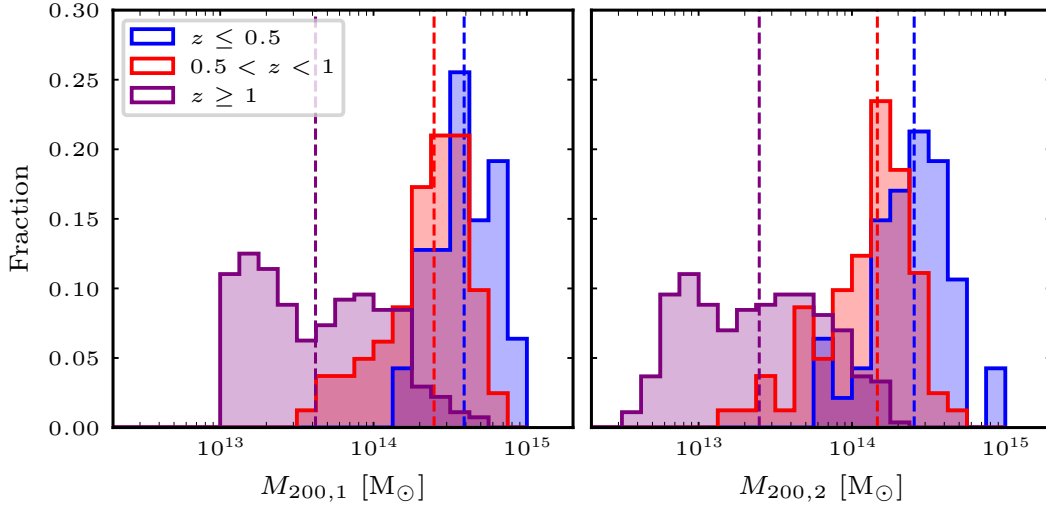
## 1. 介绍

在宇宙结构的分层形成场景中，大型暗物质晕的增长是由于与其他系统的吸积和合并。在这种情况下，在晕族组装过程中自然会产生冲击波，并且这种现象发生在广泛的尺度上。特别是，人们认为星系团在其生命周期内会经历一系列主要的合并事件，从而导致形成合并激波，这些激波是（再）加速宇宙射线电子（CRe）的理想场所。在团际磁场的存在下，这些 CRe 会产生非热无线电辐射，这种辐射可以追踪到星系团外围的大规模冲击波。所谓的无线电遗迹通常会在显示出明显相互作用迹象（e.g., Nuza et al., 2012）的动

态扰动系统中被观测到。

之前关于根据当前形成假说（e.g., Hoeft et al., 2011）从模拟星系团样本建模射电遗迹群体的研究，例如，重点关注了它们作为星团质量和红移（Nuza et al., 2012）的函数出现情况、标度关系（Nuza et al., 2012, 2017; Lee et al., 2024）、极化结构（Wittor et al., 2019）和光谱特性（Wittor et al., 2021）。这些射电遗迹样本通常是从大型宇宙学模拟体积中提取的有限数量的快照构建而成，从而限制了对高时间分辨率下射电遗迹属性演化的研究。

最近，Nuza (2023) 从所谓的三百项目（Cui et al.,



**Fig. 1.** 左側面板：最庞大前身的质量分布， $M_{200,1}$ ，在我们星系团合并样本中的 3 个不同红移区间。右侧面板：同样适用于二级前身质量， $M_{200,2}$ 。两个面板中的虚线垂直线表示每个直方图的中位数质量值。

2018) 的更大时间采样银河团重新模拟中受益，构建了射电遗迹光曲线，首次计算了在完整模拟宇宙演化过程中由银河团合并获得的非热射电辐射预期输出。Nuza et al. (2024) 的一篇后续论文将这项研究扩展到了几百个集群区域样本，专注于射电源亮度光曲线和射电遗迹功率及集群质量关系的大样本平均趋势估计。

在这篇贡献中，我们进一步探讨了在由 Nuza et al. (2024) 星系团样本提取的两个主要结构特征的碰撞系统接近和合并阶段，平均无线电遗迹光曲线的行为方面的几个方面，重点是预期的无线电功率的时间演化。特别地，我们集中研究了样本的质量、红移分布以及初始配置，并根据我们的非热辐射模型来关注星系群和星系团中合并激波产生的无线电亮度输出。

本过程组织如下。在第 2 节中，我们讨论了本文使用的星系团合并样本。在第 3 节中，我们简要描述了模拟中的非热射电辐射模型和激波探测器。在第 4 节中，我们讨论了我们的结果。最后，在第 5 节中，我们提出了结论。

## 2. 星系团合并目录

在这项工作中，我们使用了一个属于三百项目的星系团区域样本，该样本是来自  $1 h^{-3} \text{Gpc}^3$  多暗模拟 (Klypin et al., 2016) 的 324 个球形放大重模拟星系团区域，半径为  $15 h^{-1} \text{Mpc}$ ，其中  $h$  是简化的哈勃常

数。采用的宇宙学模型与 Planck 2015 宇宙学 (Planck Collaboration et al., 2016) 一致。星系团区域使用代码装置-X(e.g., Beck et al., 2016) 进行了重新模拟，其中包括完整的流体力学、依赖于金属的气体冷却、一个紫外背景辐射场以及其它相关的小尺度天体物理过程如恒星形成、超新星/活动星系核反馈和黑洞增长。每次重新模拟开始时的质量分辨率分别为  $1.27 \times 10^9 h^{-1} M_\odot$  和  $2.36 \times 10^8 h^{-1} M_\odot$ ，分别对应暗物质粒子和气体粒子。

基于模拟的星系团区域，我们构建了一个合并目录，显示在等于或小于星系团动力学时间的时间间隔 (Contreras-Santos et al., 2022) 内质量显著增加  $\Delta M/M \geq 0.5$ 。尽管星系团合并过程中可能存在多种天体物理情景（有时涉及超过两个物体），但我们仅通过考虑两个主要合并系统来表征这些合并事件。我们注意到所选择的特定质量分数增长保证了我们的合并样本主要对应重大合并事件，即  $\mu \equiv M_{200,2}/M_{200,1} \gtrsim 0.3$ ，其中  $M_{200,1}$  和  $M_{200,2}$  分别为主星系团和次要星系团的质量。因此，我们最终得到一个包含 555 个清晰解析的合并样本，其中  $M_{200,1} \geq 10^{13} M_\odot$  在  $R_{200,1}$  内，即主前身半径内包围着比宇宙临界密度高 200 倍的超密度区域。

### 2.1. 星系团合并子样本

此外，我们将合并目录分成不同的子样本。这样我们能够研究团簇质量和并合系统红移对最终射

电光变曲线的影响。首先，我们选择 i) 对于满足  $10^{13} \leq M_{200,1}/M_{\odot} < 10^{14}$  条件的并合群组 and ii) 满足  $M_{200,1} \geq 10^{14} M_{\odot}$  条件的并合团簇。由于目录中的大多数碰撞对应主要合并事件，这种选择确保了主质量和次质量是同一数量级的，从而自然地样本分为较轻/较重的合并体。其次，我们还通过选取系统的合并红移而非团簇质量构建了额外的子样本。我们的目录中每个合并的红移计算为  $t_{\text{start}}$  和  $t_{\text{end}}$  对应红移之间的平均值，即每个合并的开始和结束时间 (see the discussion in Contreras-Santos et al., 2022)。具体来说，我们还通过施加条件  $z \geq z'$  和  $z < z'$ ，分别选取了 iii) 早期合并样本和 iv) 晚期合并样本。为了评估整个宇宙历史中合并系统的演化，我们简单地取  $z' = 1$ ，因为样本中大多数质量较小的星团都位于此值之上 (见图 1)。

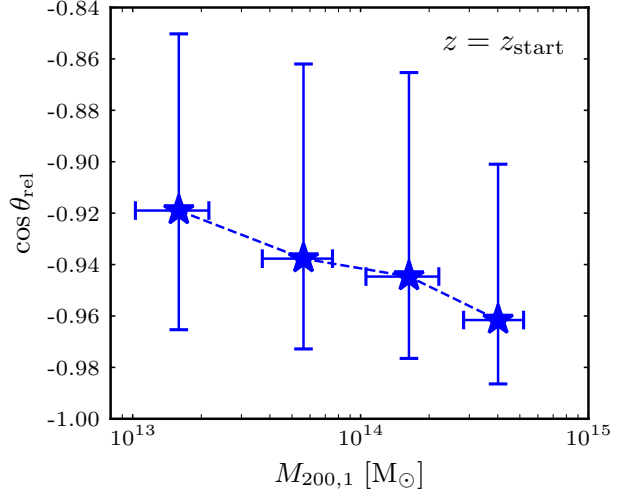
### 3. 无线电输出来自冲击

结构形成冲击中产生的射电辐射是按照 Nuza et al. (2017) 计算的。在这个模型中，固定比例的热电子在激波前沿被加速，获得与弥散激波加速 (DSA) 情景一致的能量分布。随后，这些高能电子被下游等离子体携带，在此过程中经历辐射损失，主要是通过同步辐射和逆康普顿散射与宇宙微波背景 (CMB) 光子相互作用。在激波后的非热辐射是通过假设恒定的激波速度沿下游区域积分电子分布得到的，该速度可以与声速马赫数  $\mathcal{M}$  相关联。然后，每单位频率  $\nu$  和面积  $A$  的射电功率  $P_{\nu,A}$  对每个气体粒子的比例是

$$P_{\nu,A} \propto n_e \nu^{-\frac{s}{2}} T_d^{\frac{3}{2}} B_d^{1+\frac{s}{2}} (B_{\text{CMB}}^2 + B_d^2)^{-1} \Psi(\mathcal{M}), (1)$$

其中， $n_e$  是电子密度， $s$  是由 DSA 给出的电子能量分布的斜率， $T_d$  是激波后的温度， $B_d$  是激波后的磁场， $B_{\text{CMB}}$  是 CMB 能量密度的磁测量值， $\Psi(\mathcal{M})$  与激波强度有关，强烈抑制了  $\mathcal{M} \lesssim 2$  的无线电辐射。

磁场假设与局部电子密度成比例，遵循与 Coma 星系团观测一致的分布 (Dolag et al., 2001; Bonafede et al., 2010)。模拟中的激波前沿是通过满足一组标准 (如汇聚流和熵/密度跃变) 的气体粒子来识别的，并使用 Rankine-Hugoniot 条件计算马赫数 (Landau & Lifshitz, 1959)。关于非热无线电模型和激波探测器的更多细节可以在 Nuza et al. (2017) 及其引用文献中找到。



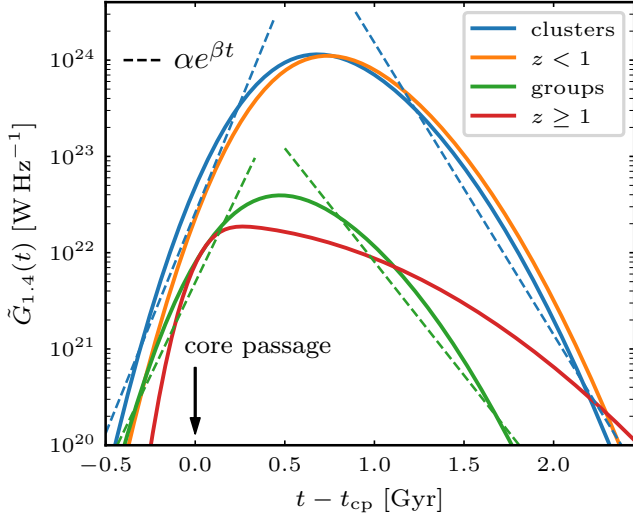
**Fig. 2.** 两主要前身星在聚类样本中相对位置和速度向量之间夹角的余弦值的中位数，作为主前身星质量的函数，在合并开始红移时计算 (参见第 4.1 节)。水平误差棒表示每个区间的标准偏差，而垂直误差棒代表 25 百分位数和 75 百分位数。

## 4. 结果

### 4.1. 星系团质量分布和并合轨道

图 1 展示了我们样本中在星系团合并期间不同红移区间内母体质量的分布情况。特别是，所有红移区间的合并比值，即中位数星系团质量值的比例  $\mu' = \tilde{M}_{200,2}/\tilde{M}_{200,1}$  为  $\mu' \gtrsim 0.6$ ，这表明我们星系团合并样本中的两个主要结构相似。此外，随着红移的变化，母体质量呈现出明显的趋势，其中质量较小 (较大) 的系统位于较大的 (较小的) 红移处。具体来说，样本中最庞大的星系团形成于红移  $z \leq 0.5$  处，达到的质量与局部庞大星系团类似，这与观测结果一致。这是结构形成的层次性自然结果，在这个过程中，最庞大的系统是通过较轻系统的合并而形成的。

两个主要合并前身的相对速度投影到它们之间的径向矢量方向上的归一化值， $\cos \theta_{\text{rel}}$ ，在图 2 中作为主前身质量的函数给出。这里， $\theta_{\text{rel}}$  是在根据 Contreras-Santos et al. (2022) 的时间定义计算集群合并开始时间时两个矢量之间的相对角度。这个数值提供关于两个合并结构所遵循轨道性质的信息，其中  $\cos \theta_{\text{rel}} = -1$  对应于完全径向轨道。如图 2 所示，在我们的目录中，从星系团到集群的绝大多数系统在交互开始时显示出相当径向的轨道，这转化为核心经过时约几百千秒差距的典型撞击参数。这是可以预期的，因为在宇宙学背景下相撞结构通常来自自由与中央



**Fig. 3.** 星系团碰撞后在 1.4 GHz 中值无线电光变曲线的演化（减去线性基线，见第 4.2 节）作为相对于核心通过时间的函数，对于在第 2.1 节中引入的合并子样本：i) 组 ( $10^{13} \leq M_{200,1}/M_{\odot} < 10^{14}$ )；ii) 星团 ( $M_{200,1} \geq 10^{14} M_{\odot}$ )；iii) 早期 ( $z \geq 1$ )，和 iv) 晚期 ( $z < 1$ ) 合并。虚线对应于每个光曲线峰值前后星团和群体子样本的最佳拟合指数函数。

集群相连的大尺度宇宙丝决定的首选方向。然而，对于质量较小的集群来说，这一趋势稍微不那么明显，因为它们在合并阶段早期更容易受到扰动。

#### 4.2. 来自一组星系团合并的射电光度演化

为了研究团簇合并过程中产生的平均射电光度输出，我们遵循了之前的研究，并根据第 3 节中引入的非热模型，在整个合并演化过程中，计算了我们的星系团目录中的激波在距离主团中心  $R_{200,1}(t)$  内产生的所有 1.4 GHz 的射电辐射。这个距离足以涵盖合并射电激波的时间演变，从它们的开始到结束，而不包括太多由外部激波产生的辐射。因此，我们获得了一组射电光变曲线，可以考虑每个系统的中心通过时间  $t_{cp}$  来进行组合。该参数是通过碰撞过程中两个最巨大的前身体的相对距离和速度进行评估来估算的。这样就可以估计出作为团簇质量和红移函数的星系团合并的中值射电光度光变曲线。

在团块合并过程中，模拟数据所描述的中值射电遗迹光度用以下表达式表示：

$$\tilde{P}_{1.4}(t) = \tilde{G}_{1.4}(t) + \tilde{l}_{1.4}(t), \quad (2)$$

其中  $\tilde{G}_{1.4}(t)$  是一个偏斜高斯函数，用于重现无线电光度演化，而  $\tilde{l}_{1.4}(t)$  是一条线性基线，用来模拟可能

在星系团体积内产生的无关并合冲击的伪辐射（即不相关的辐射）的累积效应。

图 3 展示了在核心通过后，扣除线性函数  $\tilde{l}_{1.4}(t)$  后的中值射电光曲线随时间的变化情况。对于在第 2.1 节定义的 4 个合并子样本而言，一般情况下，在核心通过后的数亿年内，所有曲线都显示出射电光度输出显著增加的现象。这一现象由射电增长阶段中的虚线指数拟合所强调。特别是，归属于星团子样本（蓝色实线）的最大质量合并事件在增长阶段可以将射电激波辐射增强到大约  $\sim 2$  个数量级。同样地，晚期子样本（橙色实线）显示了类似的演化过程，因为大多数大质量系统通常是在较低红移处组装的。在发射峰值之后，在所有情况下，由于光曲线的偏斜性，射电发射都在较长的时间尺度上衰减。较小质量合并由星系群（绿色实线）和早期（红色实线）子样本代表，它们展示出类似的演化过程，尽管达到的射电光度峰值要低得多。虽然这两个子样本中的射电增长阶段是可比较的，但在早期子样本中，峰值后的衰减阶段不那么显著，这主要是因为包含了在高红移处高度扰动、较低质量的系统。总体而言，我们的子样本中的射电激波需要  $\sim 1.2 - 1.6$  Gyr 才能恢复到核心通过时的光度水平。

#### 5. 结论

在此工作中，我们利用了从三百工程开始的星系团重模拟集合的大时间采样，研究了在星系团碰撞过程中合并激波的无线电亮度输出。我们的目录包括总共 555 次主要合并，这些合并在一个主要由两个主要碰撞结构定义的宇宙学背景下进行，尽管更复杂的情况并不少见。一般来说，大部分大规模合并发生在较低的红移处，这与公认的结构形成场景中的层次性质一致。碰撞系统以几乎径向轨道开始合并阶段，并具有较小的切向速度分量，在核心通过时转化为几百千秒差距的影响参数。

在将合并目录分成几个包含较少和较多质量系统的子样本后，我们计算了星系团合并过程中遗迹的中位数射电光曲线，以表征从合并激波开始到核心通过前再到  $\gtrsim 1$  Gyr 后消亡的射电亮度输出，这在一定程度上取决于星系团的质量。我们发现典型的光曲线在核心通过后急剧上升，直到在核心通过后的  $\sim 500 - 700$  Myr 达到发射峰值。总体而言，合并激

波代表了非热射电宇宙的冰山一角，主要由最高星系密度区域塑造而成。

*Acknowledgements:* S.E.N. 是 CONICET 的 Carrera del Investigador Científico 成员。他感谢 CONICET (PIBAA R73734), Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT 2021-GRF-TI-00290) 和 UBACyT (20020170100129BA) 的支持。

## References

- Beck A.M., et al., 2016, MNRAS, 455, 2110  
 Bonafede A., et al., 2010, A&A, 513, A30  
 Contreras-Santos A., et al., 2022, MNRAS, 511, 2897  
 Cui W., et al., 2018, MNRAS, 480, 2898  
 Dolag K., et al., 2001, A&A, 378, 777  
 Hoeft M., et al., 2011, JApA, 32, 509  
 Klypin A., et al., 2016, MNRAS, 457, 4340  
 Landau L.D., Lifshitz E.M., 1959, *Fluid mechanics*  
 Lee W., et al., 2024, A&A, 686, A55  
 Nuza S.E., 2023, BAAA, 64, 166  
 Nuza S.E., et al., 2012, MNRAS, 420, 2006  
 Nuza S.E., et al., 2017, MNRAS, 470, 240  
 Nuza S.E., et al., 2024, A&A, 690, A146  
 Planck Collaboration, et al., 2016, A&A, 594, A13  
 Wittor D., et al., 2019, MNRAS, 490, 3987  
 Wittor D., et al., 2021, MNRAS, 506, 396