

INTERNAL KINEMATICS OF YOUNG CLUSTERS

Radcliffe Wave

— *a shear origin.*

从星团内部运动学看太阳邻域大尺度波动的剪切起源

Yong-Kun Zhang · 张永坤

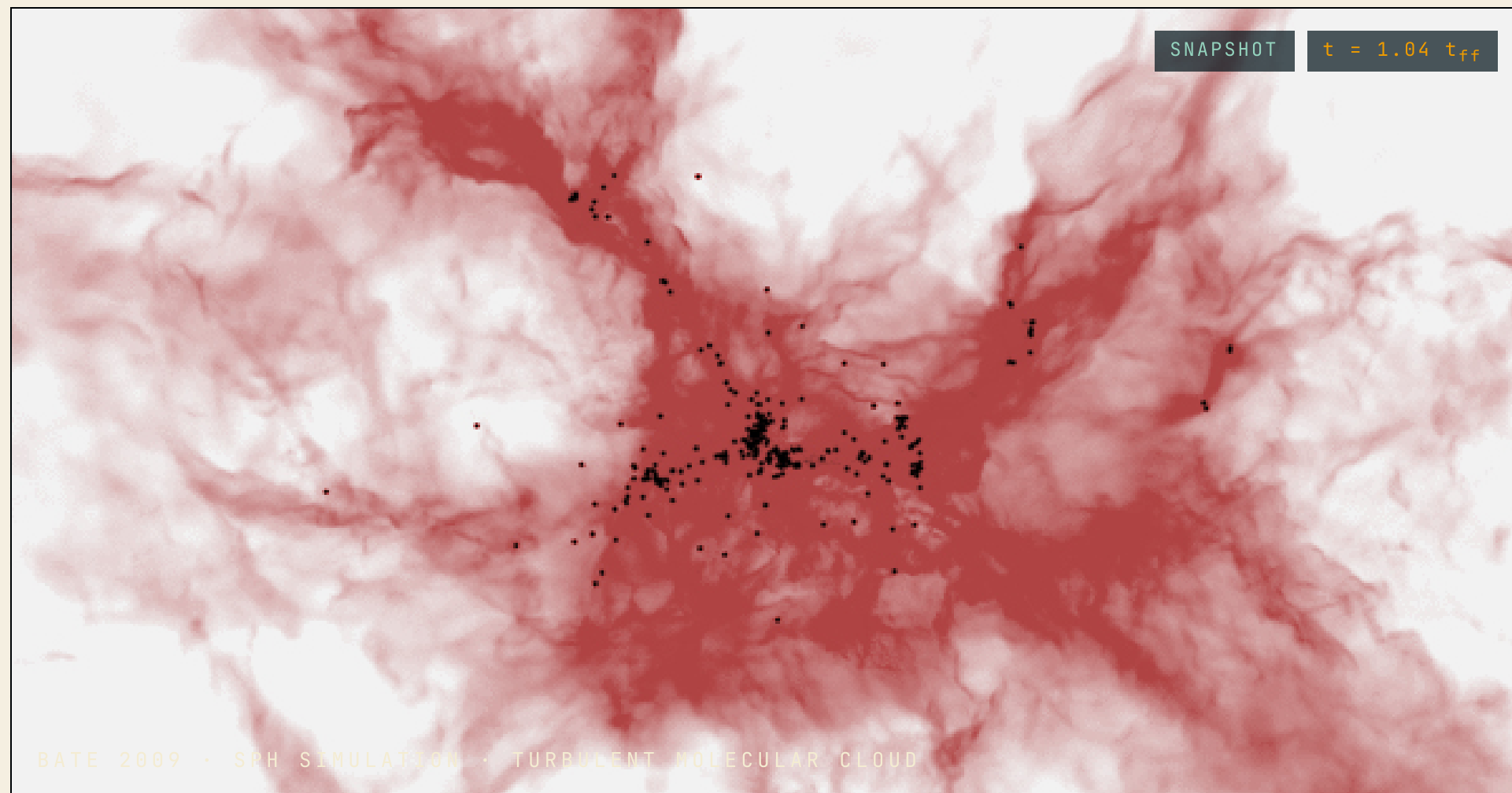
NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORIES · CAS

ykzhang@nao.cas.cn

GAIA DR3 × LAMOST × APOGEE

KINEMATICS · CLUSTER EVOLUTION

A cluster's motion carries *the memory of its birth.*



01 恒星几乎都在湍动的分子云中成团形成。新生星团的内部速度结构，直接继承了形成环境中的速度场——随机湍流、整体旋转，或是外部剪切场留下的方向性拉伸。

02 今天的运动状态既是形成与早期演化的结果，也决定了星团接下来会继续束缚、膨胀瓦解，还是被外场持续塑形。解析这个速度场，就能回溯分子云的运动历史。

ASTROMETRY · SPECTROSCOPY

Three surveys, one *6D picture*.

Gaia 提供位置与自行，LAMOST 与 SDSS/APOGEE 补齐视向速度 — 把每颗恒星的完整运动状态测量为 (x, y, z, v_x, v_y, v_z) 六个坐标。



01 · ASTROMETRY

Gaia *DR3*

$(\varpi, \alpha, \delta, \mu_\alpha, \mu_\delta) \rightarrow (x, y, z, v_x, v_y)$

视差 + 自行 · 10^9 颗恒星，为局部几百秒差距的三维地图提供骨架。

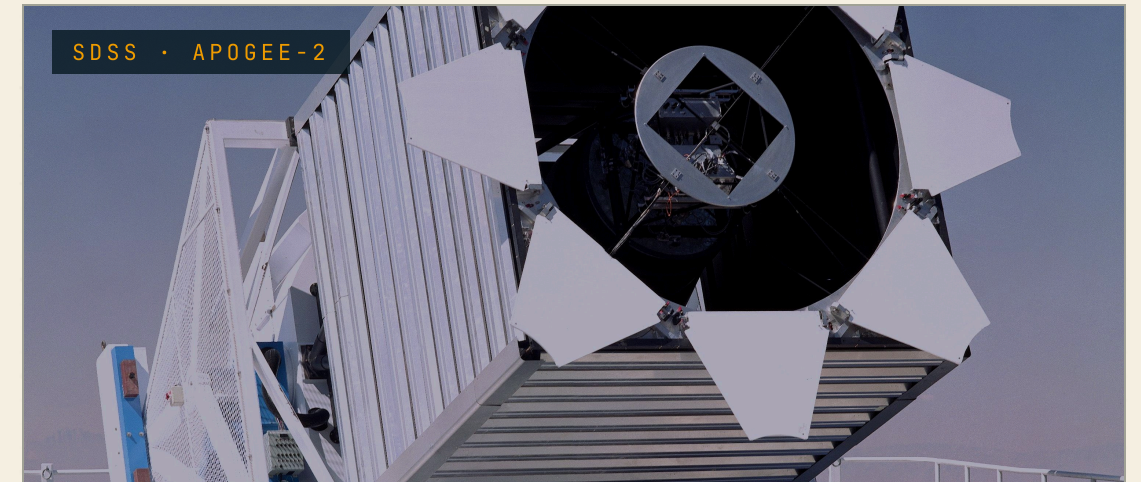


02 · SPECTROSCOPY (OPTICAL)

LAMOST *DR9*

$R \approx 1800 \cdot v_r + [\text{Fe}/\text{H}] + \log g$

低中分辨率可见光光谱 · 覆盖北天大面积天区，为 Gaia 补齐视向速度 v_r 。



03 · SPECTROSCOPY (IR)

APOGEE *DR17*

H-band $R \approx 22\,500 \cdot \sigma(v_r) \lesssim 0.1 \text{ km/s}$

近红外高分辨率光谱 · 穿透尘埃看到形成区深处，与 LAMOST 互为补全。

VELOCITY GRADIENT TENSOR · 定义

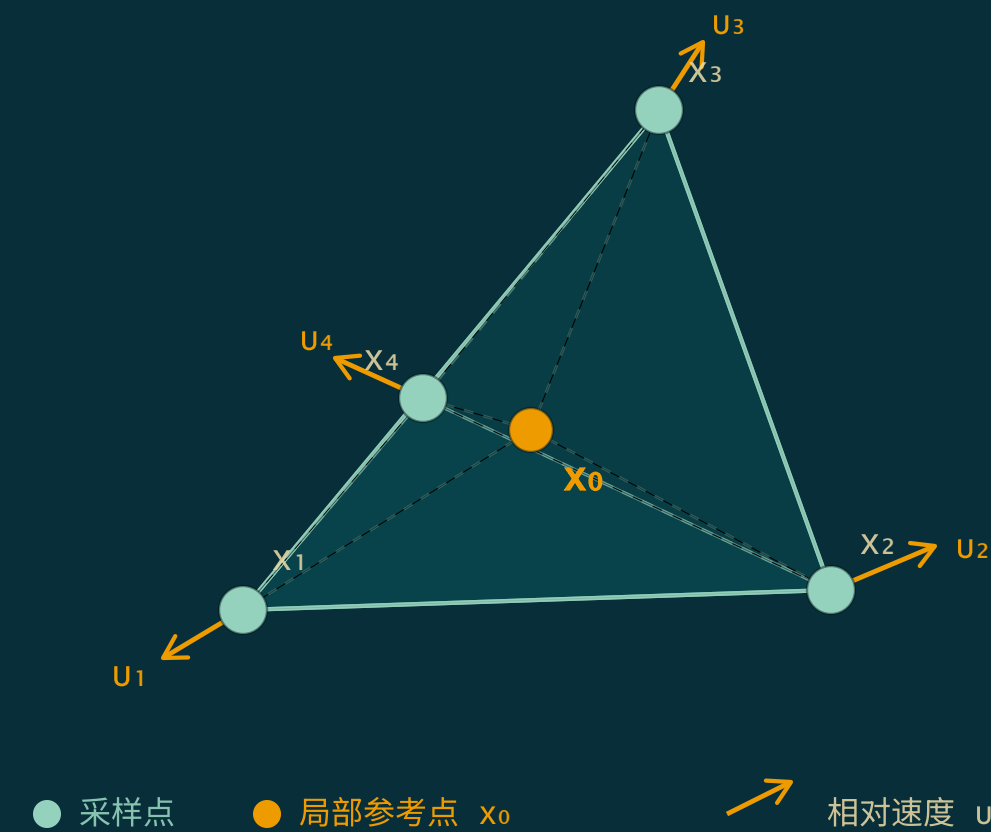
用一个 3×3 矩阵， 描述局部速度场在空间里怎样变化。

在一个足够小的邻域里，速度场可以做一阶展开；因此只要知道几个不共面的采样点的位置和速度，就能重建这个局部梯度。

TETRAHEDRON SAMPLING

四个点不共面，才能真正约束三维梯度

相对位置给出几何基底，相对速度给出在这些方向上的变化率



局部一阶展开

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}_0 + \mathbf{x}) \approx \mathbf{u}(\mathbf{x}_0) + [\nabla \mathbf{u}]_{\mathbf{x}_0} \cdot \mathbf{x}$$

$$\mathbf{u} \approx \mathbf{M}\mathbf{x}$$

一阶展开里的线性系数就是局部速度梯度；在这个局部参考系里，我们把它记成 \mathbf{M} 。

$$\mathbf{G} = \mathbf{X}^T \mathbf{X} \quad \mathbf{W} = \mathbf{X}^T \mathbf{V} \quad \mathbf{M} = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{W}$$

\mathbf{G} 只由位置构成，记录采样点的几何排布。

\mathbf{W} 把位置和速度对应起来，记录“朝哪个方向变快”。

\mathbf{M} 是最符合这些位置和速度关系的局部梯度矩阵。

为什么四个点就够？

\mathbf{M} 有 9 个未知分量；四个点各给出 3 个速度约束，总共 12 个标量方程。

为什么必须不共面？

只有这样 $\mathbf{G} = \mathbf{X}^T \mathbf{X}$ 才可逆，三维速度梯度的 9 个分量才有稳定解。

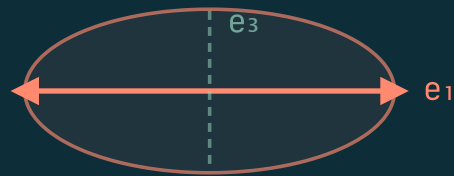
$M = S + \Omega$ · 为什么它能拆开不同运动学

同一个张量里， 旋转、拉伸和膨胀可以被分开理解。

$$\mathbf{M} = \mathbf{S} + \mathbf{\Omega} \quad \mathbf{S} = \frac{1}{2}(\mathbf{M} + \mathbf{M}^T) \quad \mathbf{\Omega} = \frac{1}{2}(\mathbf{M} - \mathbf{M}^T)$$

因为任意矩阵都能唯一写成“对称部分 + 反对称部分”，所以 M 的不同运动学成分可以分开讨论。

$S \rightarrow$ 形变



$$d|\mathbf{r}|^2/dt = 2 \mathbf{r}^T \mathbf{S} \mathbf{r}$$

因为 $\mathbf{r}^T \mathbf{\Omega} \mathbf{r} = \mathbf{r} \cdot (\mathbf{\Omega} \mathbf{r}) = \frac{1}{2} \mathbf{r} \cdot (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) = 0$: $\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}$ 永远垂直于 \mathbf{r} , 所以只有 S 会改变两点间距。

$$S \mathbf{e}_i = \lambda_i \mathbf{e}_i$$

特征向量给出形变主轴，特征值给出沿这些方向的拉伸或压缩率。

$\Omega \rightarrow$ 旋转



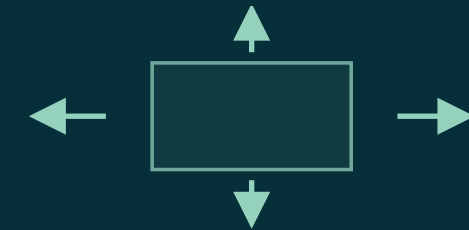
$$\mathbf{\Omega} \mathbf{r} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}$$

因为 $\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}$ 按定义同时垂直于 $\boldsymbol{\omega}$ 和 \mathbf{r} , 所以 $\mathbf{\Omega} \mathbf{r}$ 是切向速度增量: 它只改方向, 不改长度。

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \varepsilon_{ijk} \omega_k$$

也就是说, 反对称部分总能等价地写成“绕某根轴 $\boldsymbol{\omega}$ 的局部刚体旋转”。

$\text{TR}(M) \rightarrow$ 膨胀 / 收缩



$$(1/V) dV/dt = \text{tr}(M)$$

迹是对角项之和, 对应各方向平均的伸缩率, 所以它衡量整体体积变化。

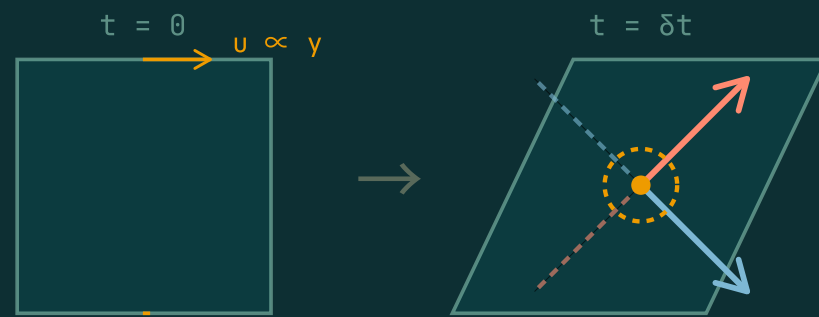
$$\text{tr}(M) = \text{tr}(S), \quad \text{tr}(\Omega) = 0$$

因此迹只管膨胀或收缩, 不参与纯旋转。

典型例子 · 简单剪切

一个速度场， 同时包含拉伸和旋转。

几何图像



这是最典型的**简单剪切**：速度只沿 x 方向，但大小随 y 线性增加。于是上层比下层流得更快，一个初始正方形在短时间后就被剪成平行四边形。

关键点是：这种运动看起来像“整体被扭了一下”，但它并不是纯旋转；因为形状也在改变，所以剪切天然同时包含形变和旋转两部分。

$$\mathbf{u} = (\gamma y, 0, 0)$$

特征分解 + 涡量

这个例子里，局部速度梯度矩阵 \mathbf{M} 只有一个非零剪切项。任意矩阵都能唯一写成 $\mathbf{M} = \mathbf{S} + \mathbf{\Omega}$ ，其中 $\mathbf{S} = \frac{1}{2}(\mathbf{M} + \mathbf{M}^T)$ 是对称部分， $\mathbf{\Omega} = \frac{1}{2}(\mathbf{M} - \mathbf{M}^T)$ 是反对称部分，所以我们总能把“改形状”和“改方向”拆开。

S 的特征分解

$$\lambda_1 = +\gamma/2, \quad \mathbf{e}_1 = (1, 1, 0)/\sqrt{2}$$

$$\lambda_2 = 0, \quad \mathbf{e}_2 = (0, 0, 1)$$

$$\lambda_3 = -\gamma/2, \quad \mathbf{e}_3 = (1, -1, 0)/\sqrt{2}$$

 Ω 的涡量

$$\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{u} = (0, 0, -\gamma)$$

对称部分 \mathbf{S} 给出沿 \mathbf{e}_1 的拉伸、沿正交方向的压缩；反对称部分 $\mathbf{\Omega}$ 给出绕 z 轴的局部旋转，也就是涡量 $\boldsymbol{\omega} = (0, 0, -\gamma)$ 。

这就是为什么简单剪切不是单一运动，而是 \mathbf{S} 和 $\mathbf{\Omega}$ 同时非零的最基本例子。

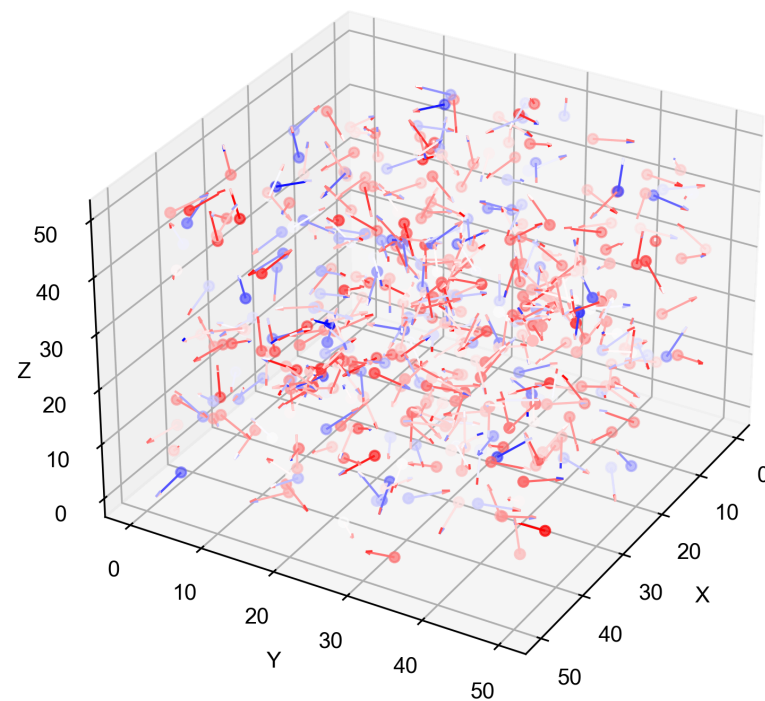
这也是后面解释观测结果时最重要的几何模板：特征向量给出主轴方向，特征值给出沿这些主轴的拉伸或压缩率； $\boldsymbol{\omega}$ 告诉我们绕什么轴旋转。

SANITY CHECKS · TOY MODELS

两个已知输入，验证方法的可靠性。

I CASE ONE · 纯热运动 Random position · random velocity

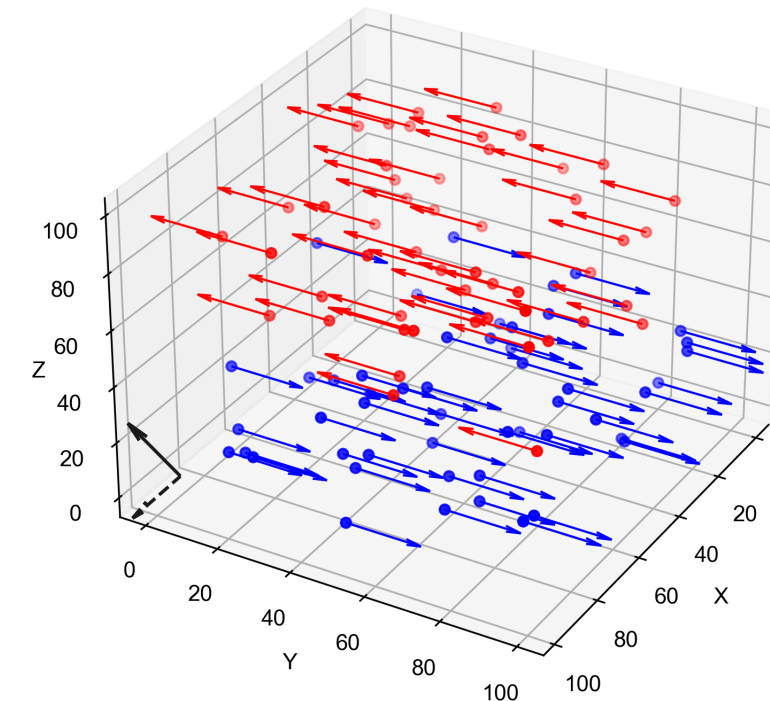
粒子位置和速度均随机分布，无任何组织性运动。
期望： $\omega \approx 0$ ， $\lambda \approx 0$ ， $\text{tr}(M) \approx 0$ 。



RESULT
 ω 和 λ 均在噪声水平，整个系统无膨胀。

II CASE TWO · 简单剪切场 Random position · shear velocity

以 $z = 50$ 为界：上半部分集体向 $-y$ 方向运动，下半部分集体向 $+y$ 方向运动。期望： e_1 斜向 45° ， ω 按右手定则指向面外。



RESULT
正确测量出 45° 拉伸方向和右手定则旋转方向，与输入完全吻合。

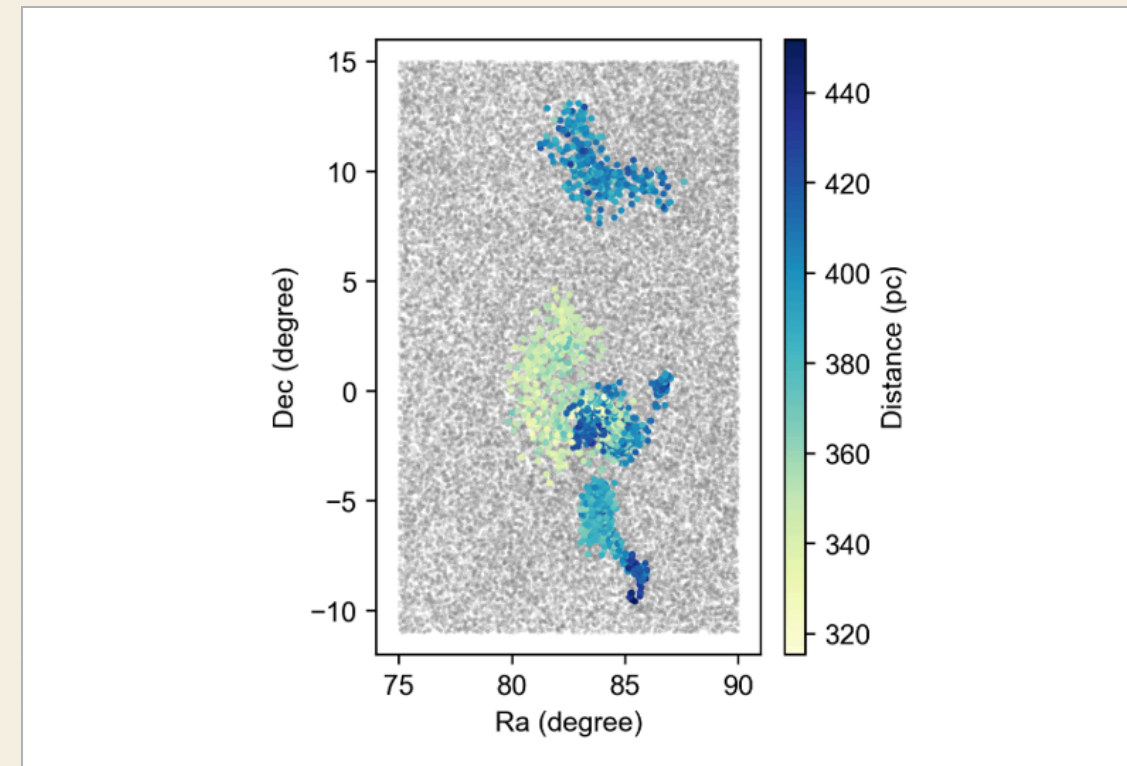
THE ORION COMPLEX · CLOSEST TEST-BED

HDBSCAN → UMAP → *six sub-regions.*

STEP 01

Extract Orion from field

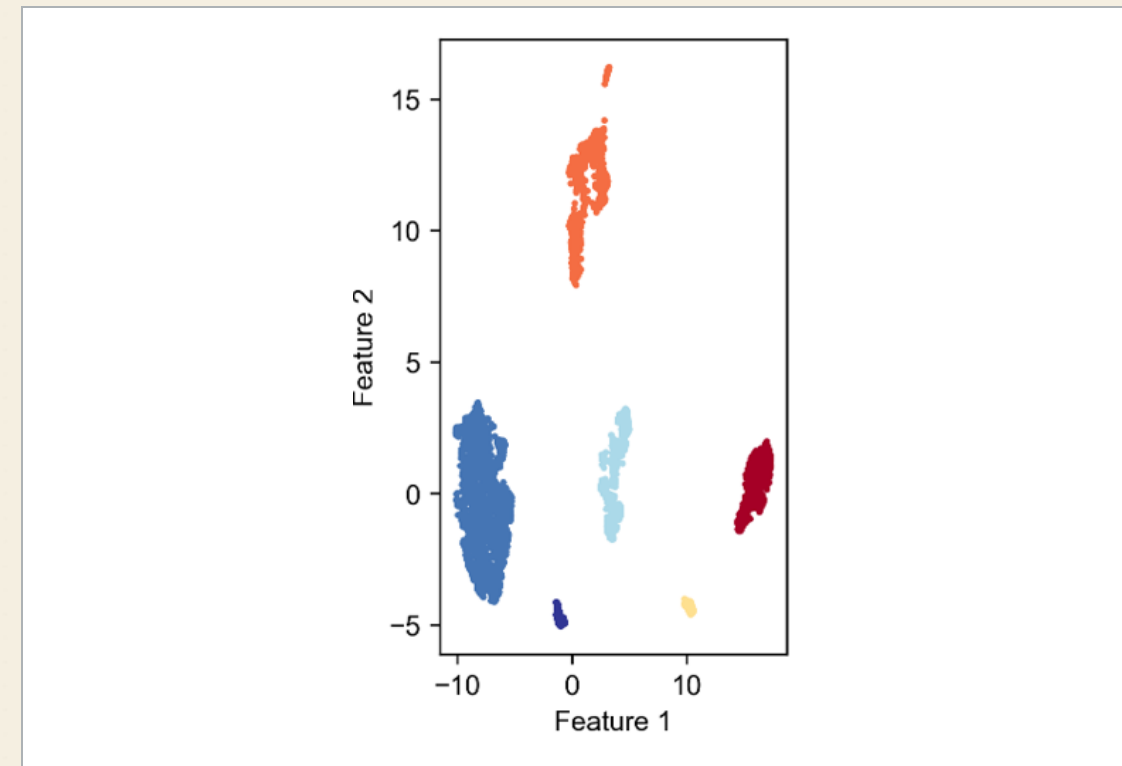
HDBSCAN 在 6D 相空间分离成员星 vs 背景场星。



STEP 02

Reduce & re-cluster

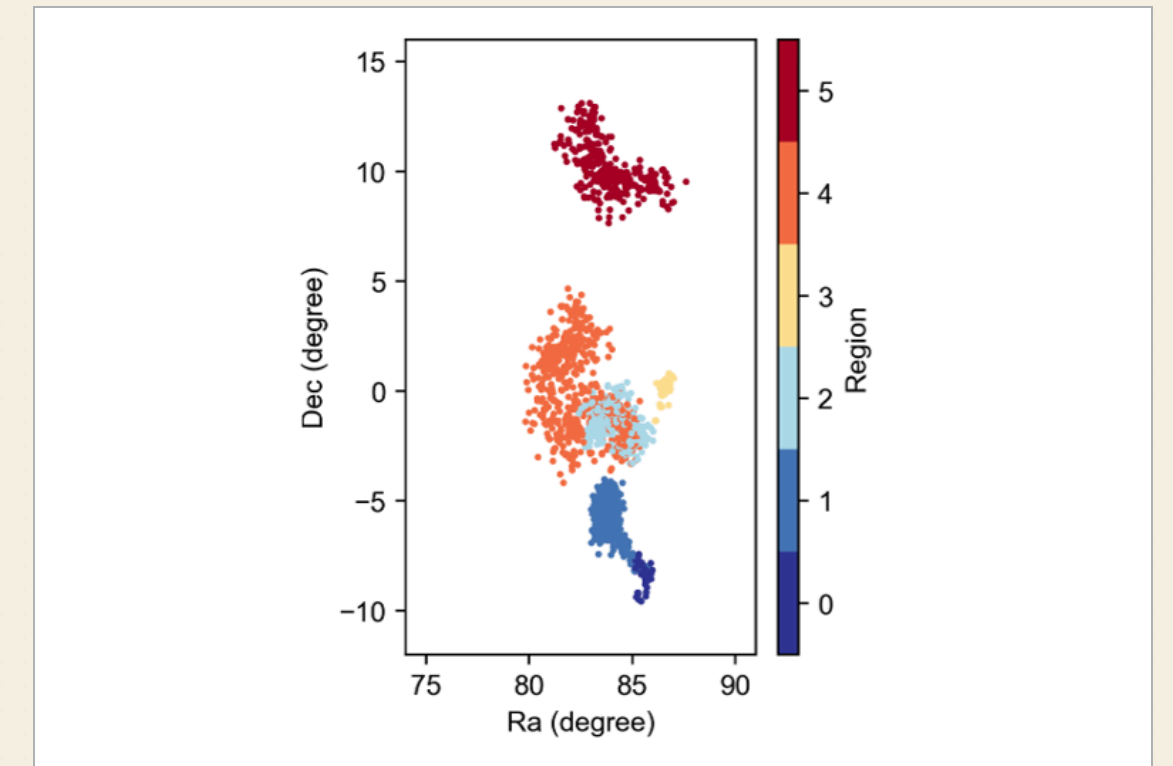
UMAP 降维后得到天然的六个聚类。



STEP 03

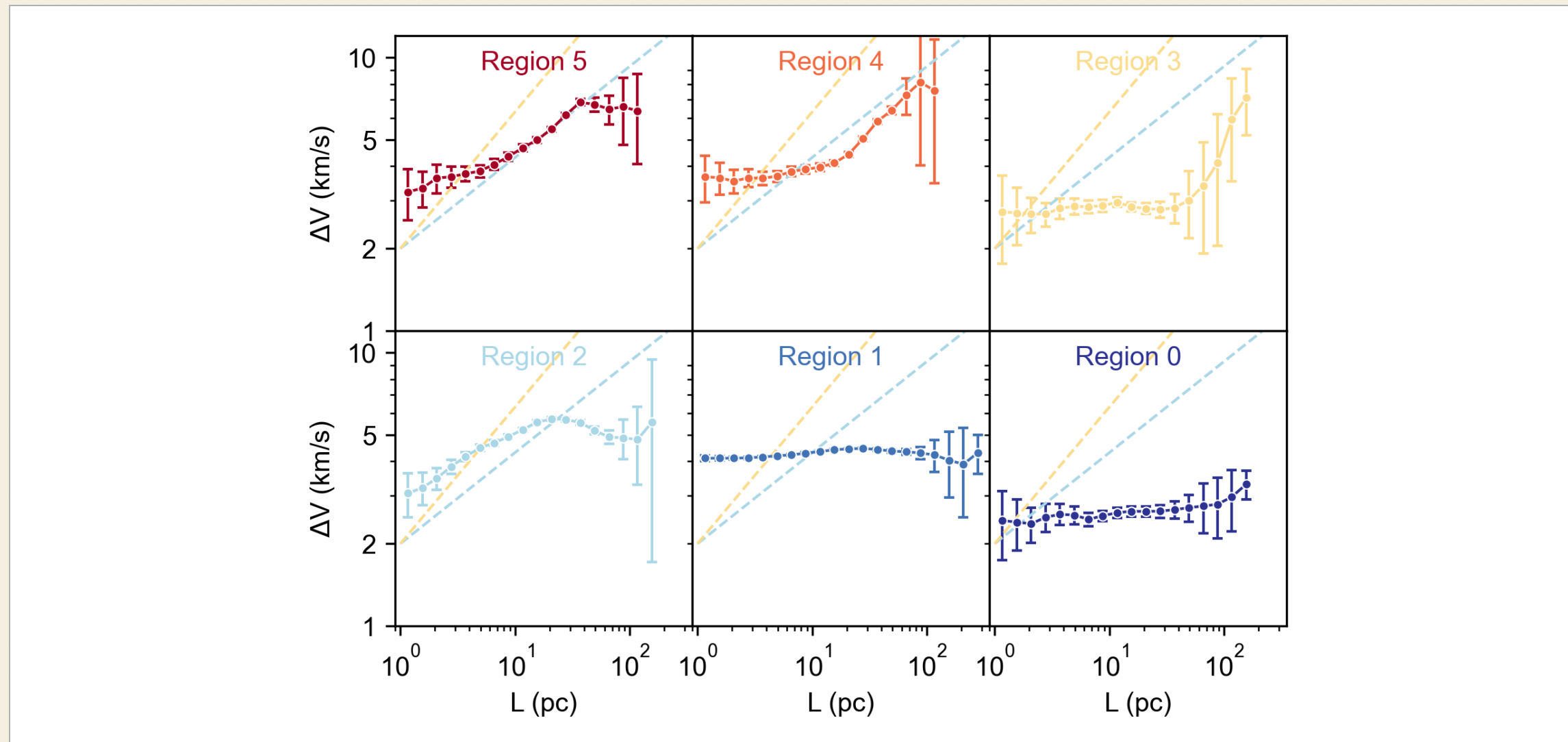
Map back to sky

子区域投影回 (Ra, Dec) 坐标平面。



$\Delta V(L)$ · NON-THERMAL MOTION IN ORION

The structure function reveals *where turbulent memory survives.*



READING THE CURVES

横轴 L (pc): 成对恒星的距离; 纵轴 ΔV (km/s): 速度差。用 $\Delta V(L)$ 统计非热运动: **平坦**代表热运动主导, **幂律上翘**代表仍存在非热的系统运动。

REGION 0 · 1 (ONC 区域)

曲线平坦 · 由**热运动**主导。这两个区域对应 Orion Nebula Cluster (ONC), 经历了快速的动力学弛豫, 已失去初始湍流运动学的记忆, 当前近似纯热运动。

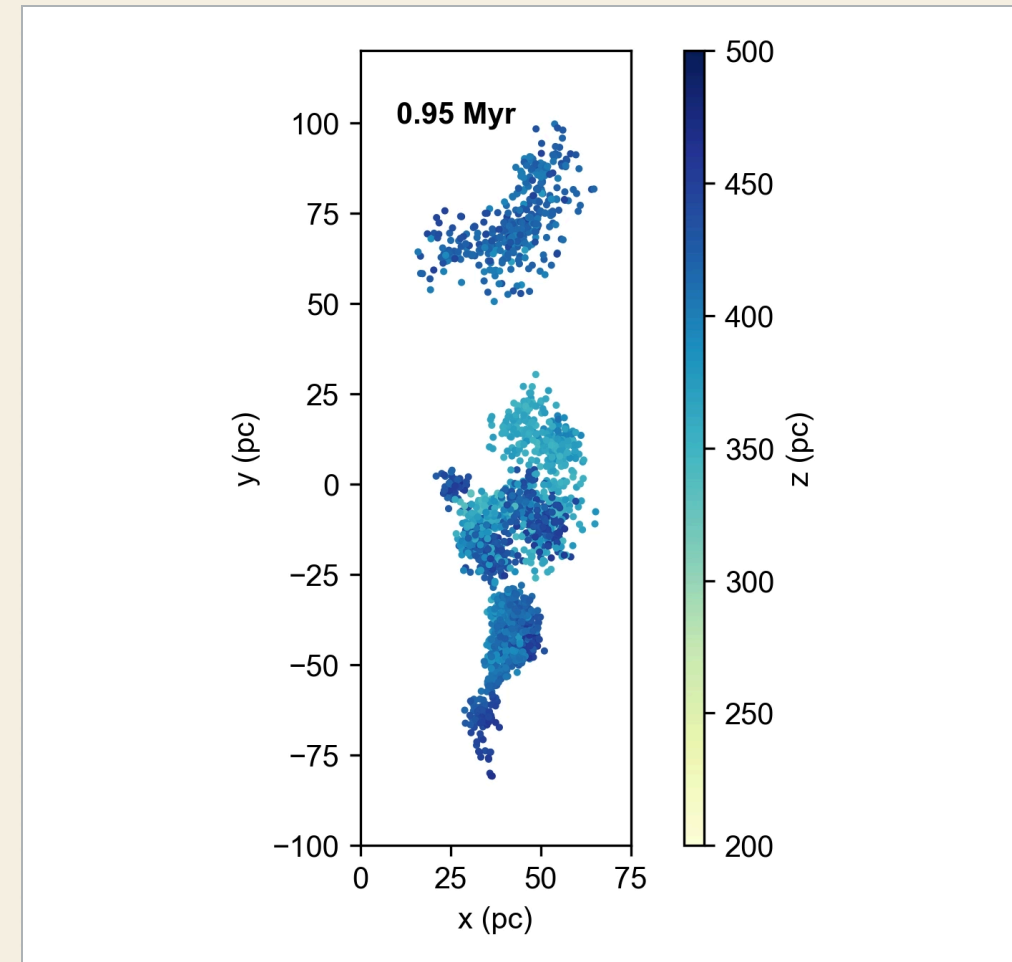
REGION 2-5 · OTHER REGIONS

其余区域在大尺度上仍显示幂律上翘 · 说明仍保留了**湍流运动学记忆**; 也可能叠加了超新星的局部能量注入。存在显著的**非热系统运动**。

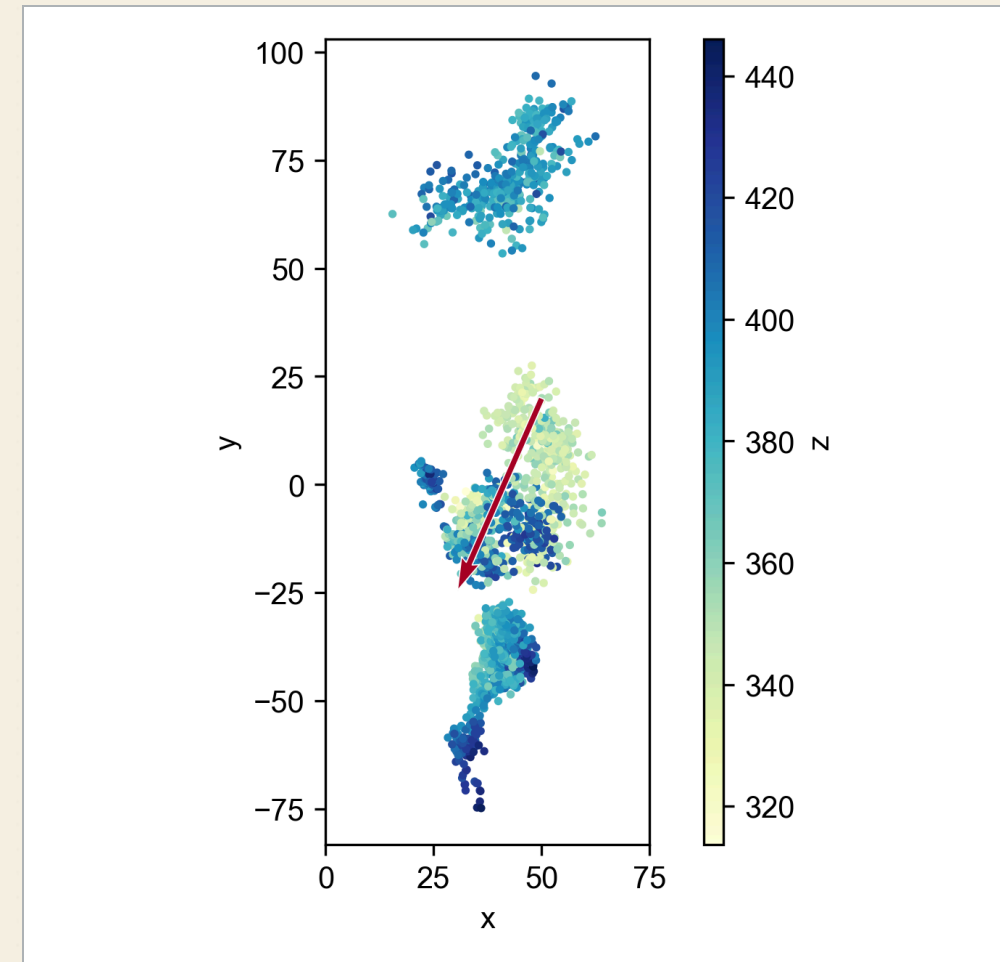
ORION · ROTATION IN THE X-Y PLANE

Geometry agrees with *the tensor* — independently.

t = -1 MYR



t = 0 · OBSERVED + FLOW



两条独立路径

A 几何外推
忽略引力，按当前速度前后推 1 Myr — 视频中可清楚看到猎户座复合体在 xy 平面的旋转。

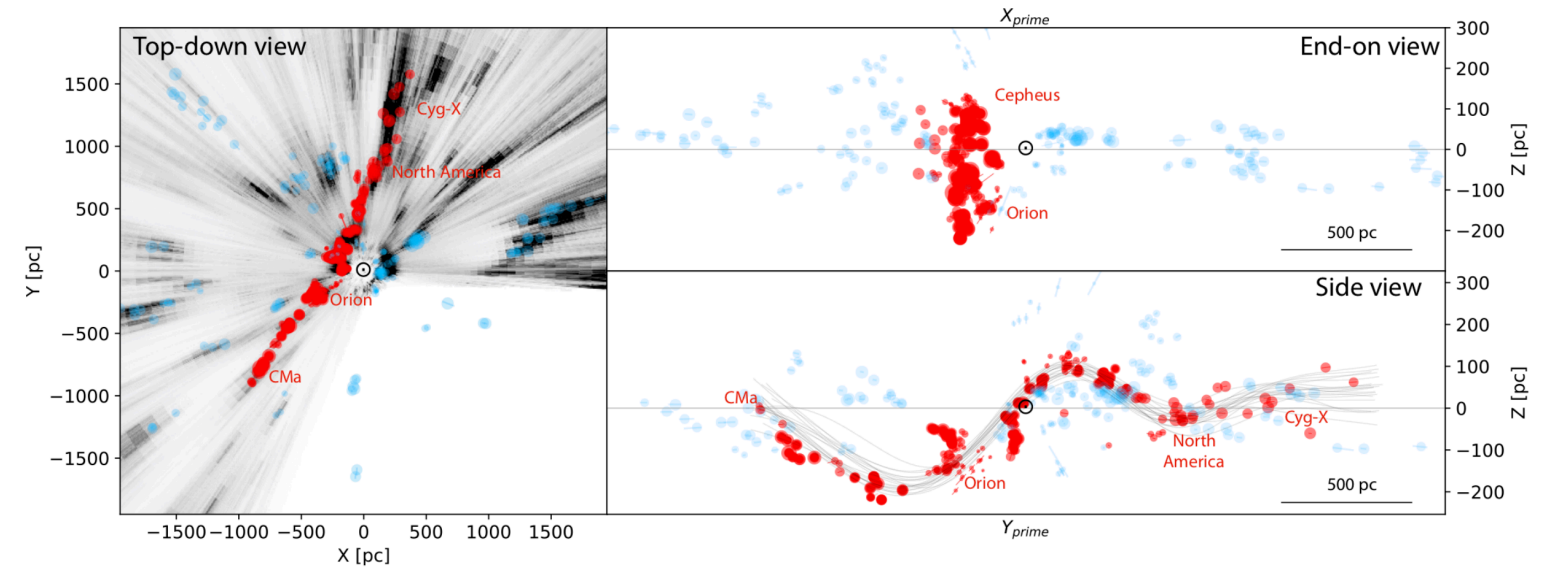
B 速度梯度张量
直接从成员星的速度场解出 ω — 旋转方向与 A 完全一致。

结论
一个纯张量代数，一个纯几何外推，互相印证 \Rightarrow 方法可信赖，可推广至 **Radcliffe Wave 样本**。

ALVES ET AL. · 2020 · NATURE

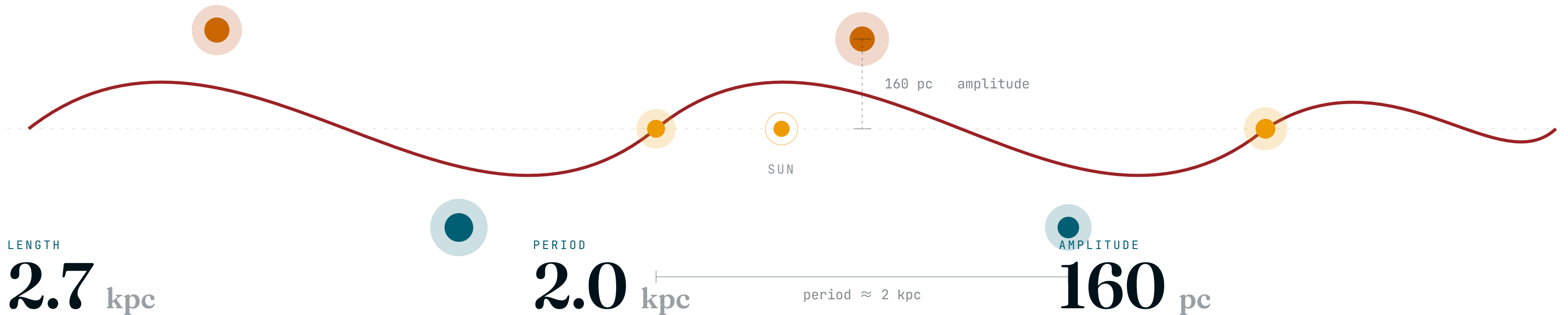
The Radcliffe Wave.

一条穿越太阳邻域、跨过多个恒星形成区的气态大尺度波动结构 — 由分子云距离（消光 + 视差）三维反演发现。



ALVES et al. 2020 · NATURE

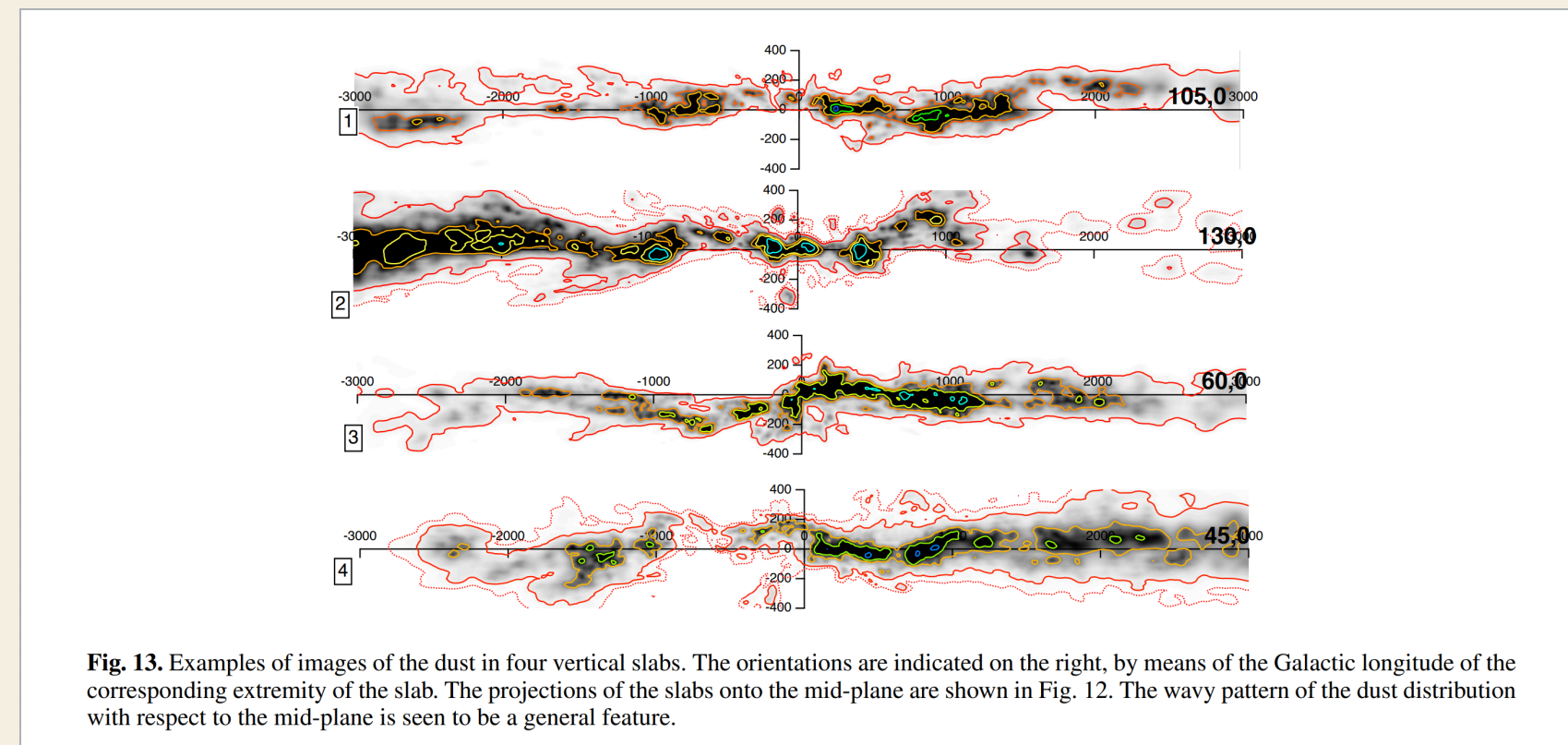
这条波横跨 Taurus、Perseus、Orion、Cepheus 等多个著名恒星形成区，振幅超过分子云盘的厚度，是太阳邻域内最大尺度的气态结构之一。



OTHER EVIDENCE - 尘埃分布 · 星团速度

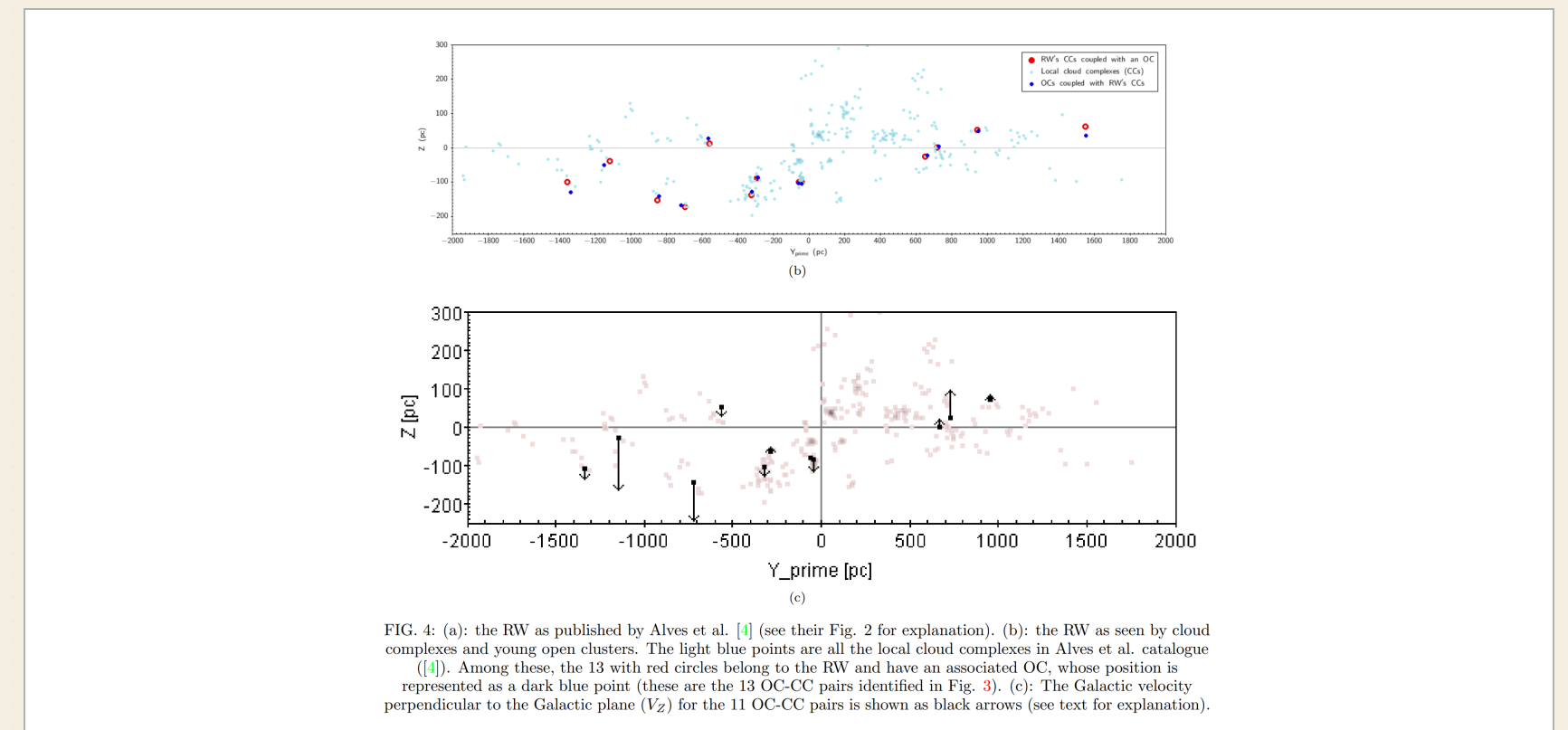
尘埃和星团，独立指向同一振荡。

01 3D DUST MAP · LEIKE ET AL. 2022
arXiv:2203.01627



用 Gaia EDR3 和 2MASS 重建三维消光图后，在 y - z 平面能看到尘埃分布呈近似正弦起伏，和 Radcliffe Wave 的空间形态一致。

02 CLUSTER PHASE SPACE · KONIETZKA ET AL. 2022
arXiv:2111.04685



对 13 个距离 Radcliffe Wave < 150 pc 的年轻星团做相空间分析后，可以看到 z 方向速度也随 y 坐标起伏，和这条波的速度图像一致。

OTHER EVIDENCE - 脉泽 · T TAU 星 · YSO

更多示踪体，给出一致画像。

03 MASERS + T TAU · REID ET AL. 2022
arXiv:2207.00245

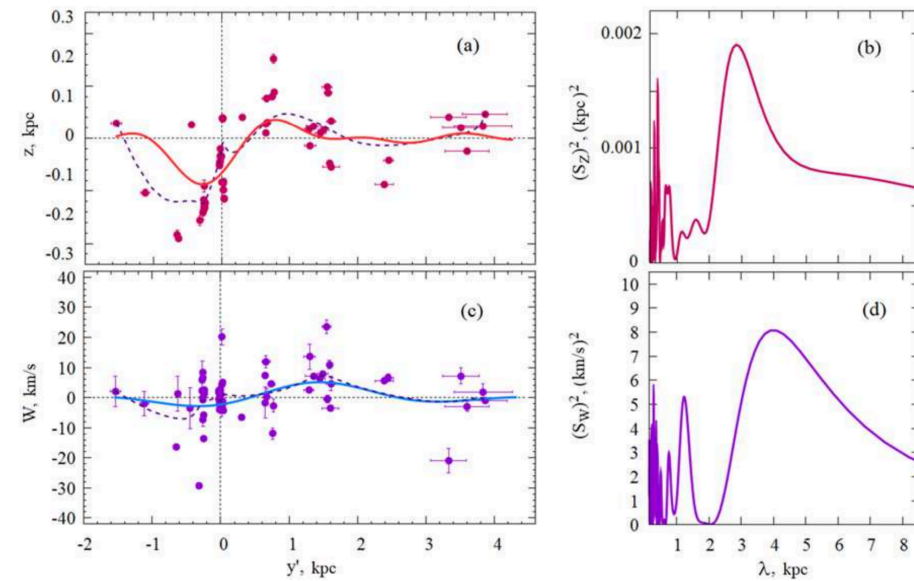


Figure 2: Maser coordinates z as a function of distance y' (a) and their power spectrum (b), vertical velocities of W masers as a function of distance y' (c) and their power spectrum (r), periodic curves shown by solid thick lines reflect the results of spectral analysis, dotted lines show smoothed average values.

用 VLBI 测得的脉泽，以及 T Tau 型星的位置和速度做谱分析，也能得到与 Radcliffe Wave 接近的正弦振荡参数。

04 YSO ORBITAL PHASE · ZUCKER ET AL. 2022
arXiv:2208.06469

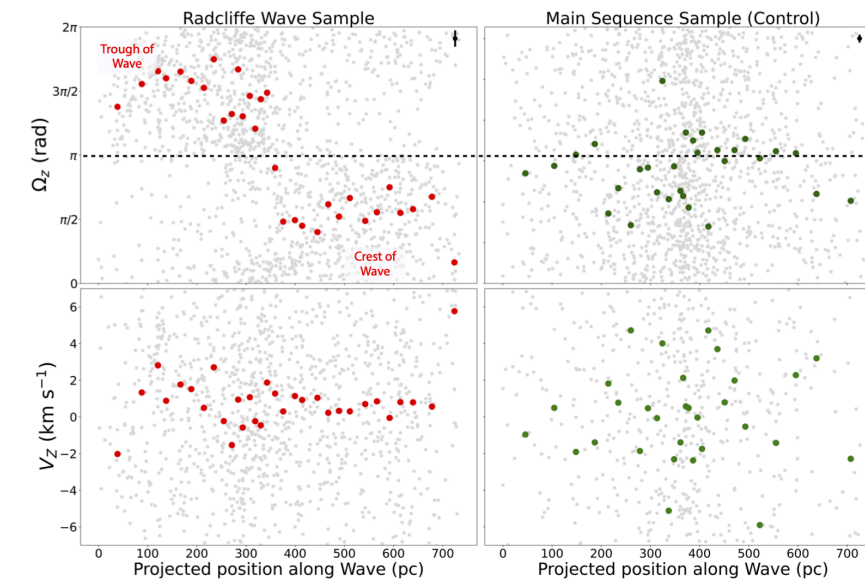
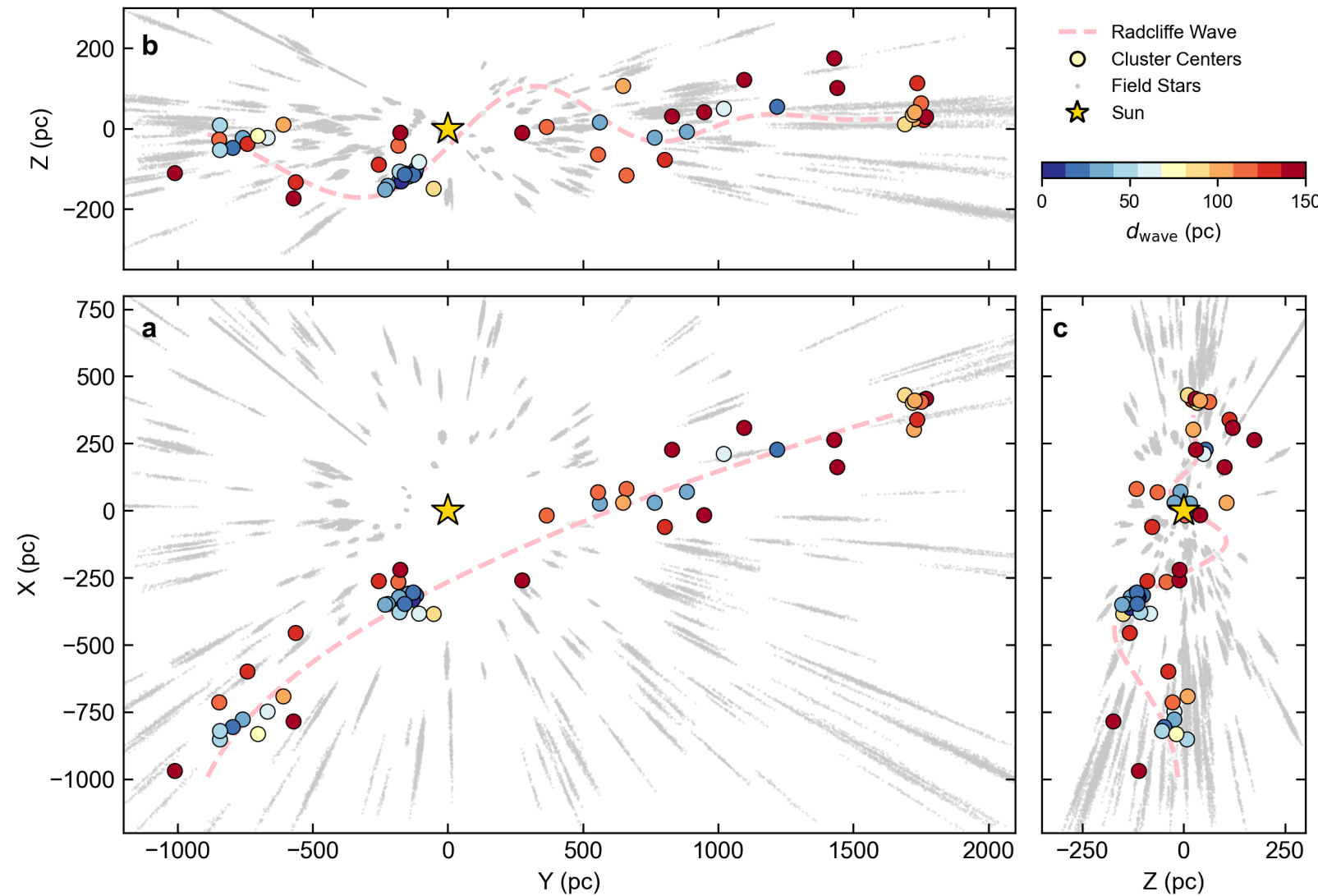


Figure 3. **Top:** Vertical angle vs. projected position along the Radcliffe Wave for the Radcliffe Wave pre-main sequence star sample (left) and the older Main Sequence control sample (right). The grey points represent the stars in each sample and the colored dots are the binned “phase-marginalized” medians. In the upper right hand corner of each panel we show the typical error on the vertical angle for each sample in black. In the Radcliffe Wave sample of young stars, we see a clear linear trend in phase space consistent with a wave-like oscillation. No such trend exists in the older stellar population, implying that this is not purely due to the cuts used to select both samples. **Bottom:** Same as the top panel, but for the vertical velocity v_z vs. projected position along the Radcliffe Wave. Unlike with the vertical angle, we find no systematic trend in the vertical velocities of the young stars as a function of position along the wave and we detect no fluctuations in the average vertical velocity at a level $\geq 3 \text{ km s}^{-1}$.

把附近 YSO 放进银河势场里计算轨道后，可以看到垂直银盘运动的轨道相位沿投影位置有明显变化；这个信号在 YSO 中清楚，在主序星里几乎没有。

样本选取 · 距离 RADCLIFFE WAVE < 160 PC (波的振幅)

从 Gaia 星团星表筛选出波附近的年轻星团样本。



图例

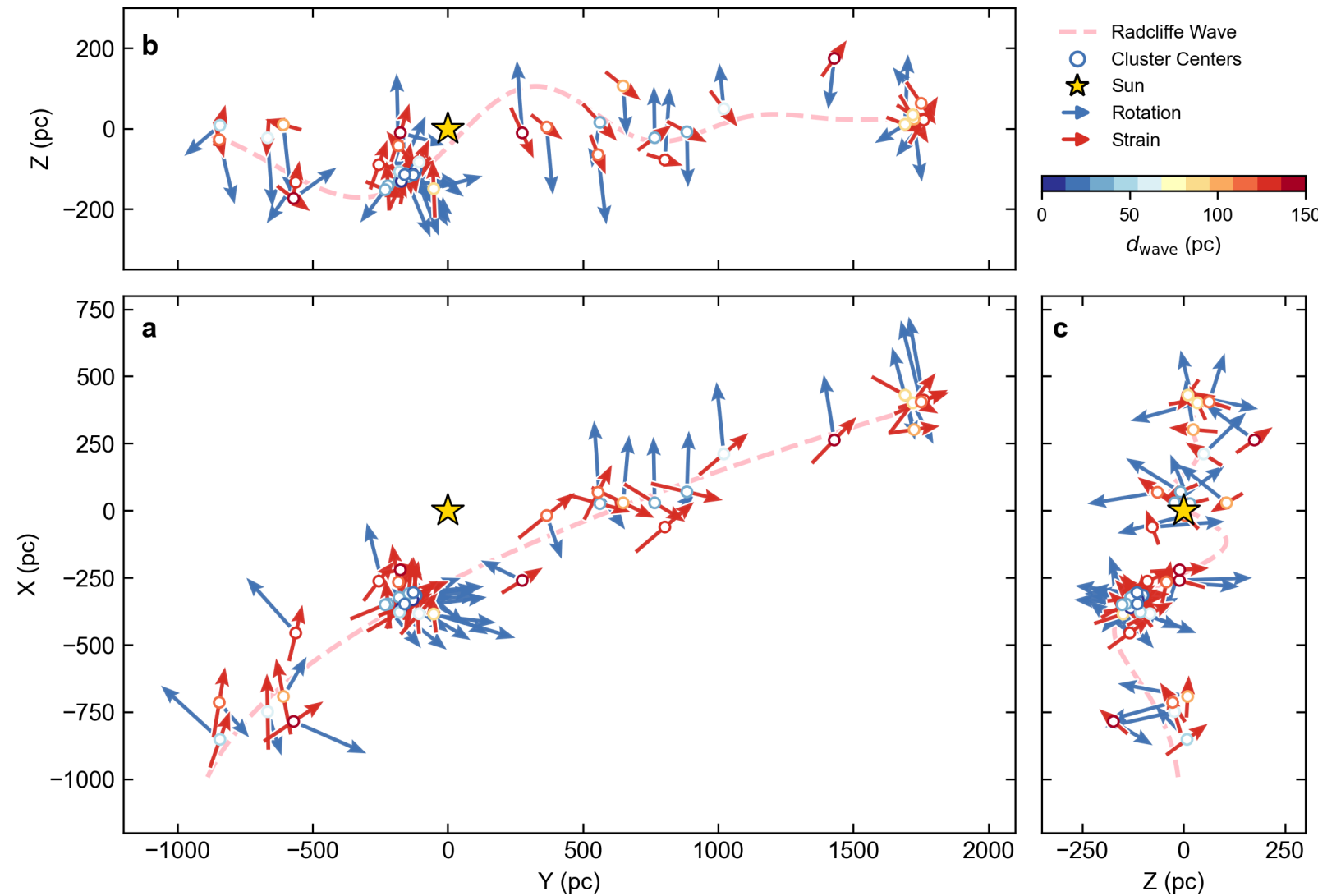
- Radcliffe Wave 拟合
- 星团位置 ($d < 160$ pc)
- 灰色点: $d > 160$ pc
- $d_{\text{wave}}: 0 \rightarrow 160$ pc

样本构建

从 Gaia DR3 星团星表中筛选距离 Radcliffe Wave 小于 160 pc (即波的振幅) 的样本。灰色点为距离超过 160 pc 的对照组。

关键图 · 对每个星团做速度梯度张量分解

拉伸方向 **倾向于沿着波**， 旋转方向 **倾向于垂直于波**。



每个星团一对方向向量

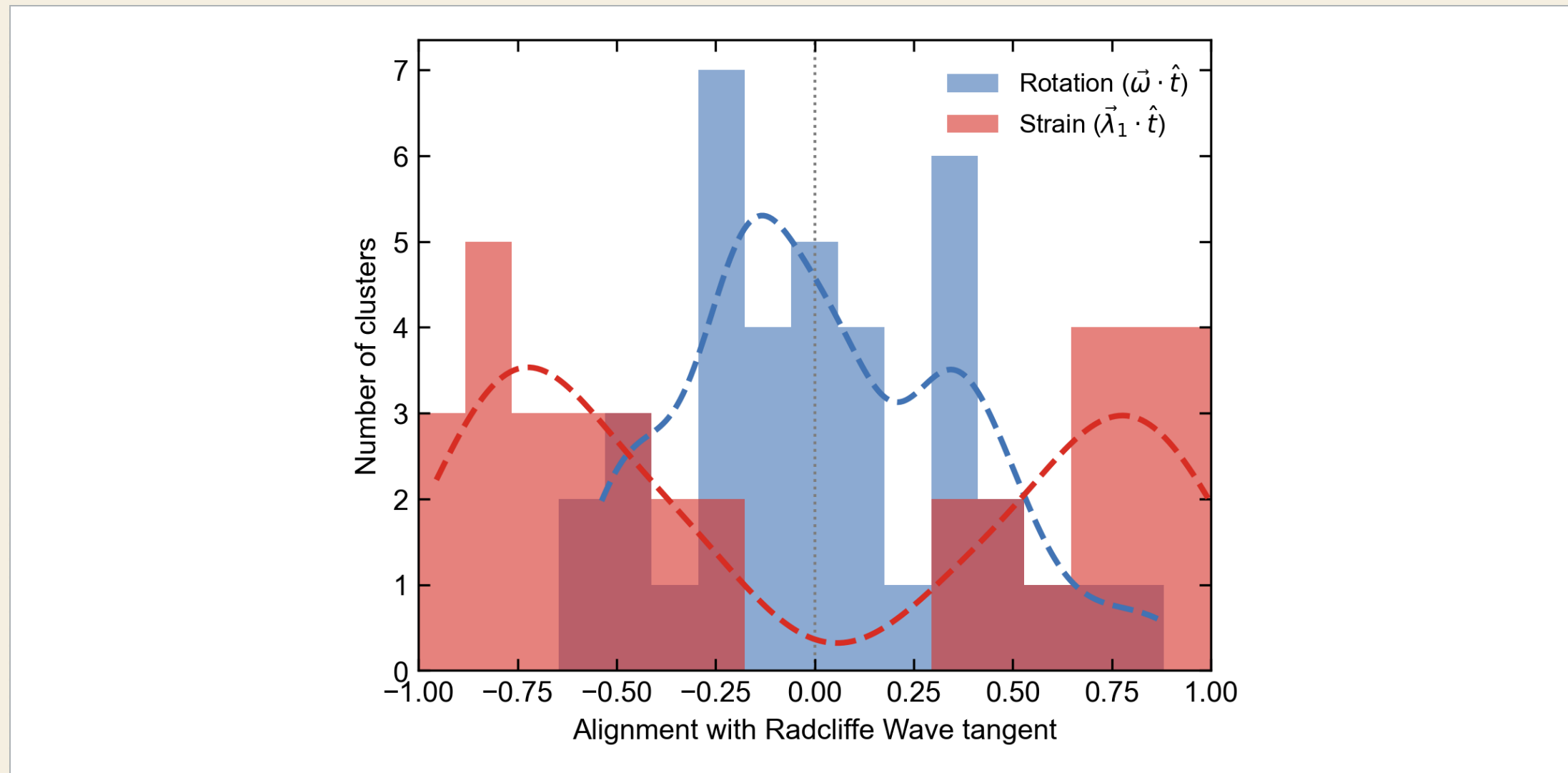
- 旋转轴 ω**
来自 $\Omega = \frac{1}{2}(M - M^T)$
- 拉伸主轴 e_1**
来自 $S = \frac{1}{2}(M + M^T)$

方法与发现

结合 Gaia、APOGEE 和 LAMOST 数据补全星团六维运动学参数，对每个星团计算速度梯度张量，取最近的波面切线方向做点积。红色箭头（拉伸 e_1 ）倾向于沿波切线方向，蓝色箭头（旋转 ω ）倾向于垂直于波。下一页用直方图量化这一方向耦合。

方向分布直方图 · 量化上一页的视觉印象

拉伸方向 **倾向于沿着波**， 旋转方向 **倾向于垂直于波**。



横轴定义

$$x = (\hat{\omega} \cdot \hat{t})_{\text{wave}} \text{ 或 } (\hat{e}_1 \cdot \hat{t})_{\text{wave}}$$

与 Radcliffe Wave 局部切线的点积

■ 旋转（蓝色）

分布集中在 0 附近 — 旋转轴平均垂直于波切线。

■ 拉伸（红色）

±1 处出现清晰双峰 — 主应变方向沿（或反向沿）波切线。

解读

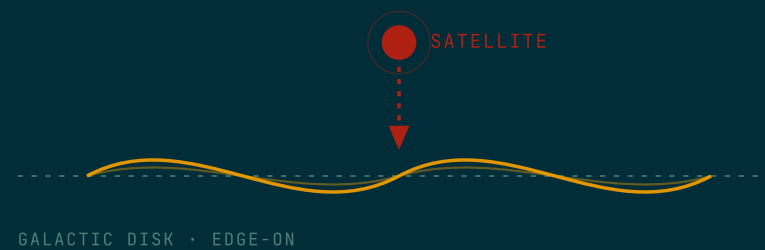
波上星团的内部运动学与波的几何方向之间存在统计上的**方向耦合**，与外部大尺度剪切场塑造这一结构的图像相符。

两种形成机制 · 从方向耦合到物理图像

卫星星系冲击， Or 银河系大尺度剪切？

卫星星系冲击 · 垂向水波

HYPOTHESIS A

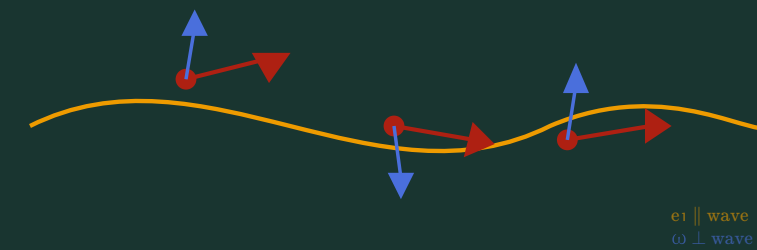


矮星系穿越银盘时，像水波一样激发垂向涟漪并随时间向外传播 (Bickley et al. 2022)。这种机制只产生垂向振荡，**不带剪切信号**——星团内部不会出现方向性拉伸。

WEINBERG et al. · IMPULSIVE VERTICAL FORCING

银盘-非共转晕界面 · KH 不稳定性

HYPOTHESIS B ✓



银盘与非共转晕在界面处存在速度剪切，可触发 Kelvin-Helmholtz 不稳定性，并将气体梳理成沿切线方向延伸的波状丝状体 (Fleck 2020)。这种机制自然预言 e_1 **|| 波切线**、 $\omega \perp$ **波**，与我们观测到的方向耦合吻合。

→ 与观测方向耦合一致，支持剪切主导的形成机制

结论 · CONCLUSION

三条结论。

01

新方法

速度梯度感知张量——研究星团动力学的新工具

可以定量地将星团内部运动学分解为**拉伸**、**旋转**、**膨胀**三个正交分量，为区分形成机制提供新的诊断量。猎户座的旋转得到了独立验证。

02

主要发现

Radcliffe Wave 具有剪切起源

波上年轻星团的 $e_1 \parallel$ **波切线**、 $\omega \perp$ **波**的系统性对齐，更符合由**银盘-非共转晕界面速度剪切触发的 KH 不稳定性**塑造的图像。

03

展望

更多结构，更大图景

将方法推广至更多星团与分子云，进一步揭示银河系结构与演化；并预期银河系中存在更多类似的大尺度波动结构。

展望 · SIBLINGS IN THE MILKY WAY

若剪切是 Radcliffe Wave 的成因，银河系中预期还有更多。

Feather

内银河 CO 气体波 · VEENA ET AL. 2021
arXiv:2110.13938

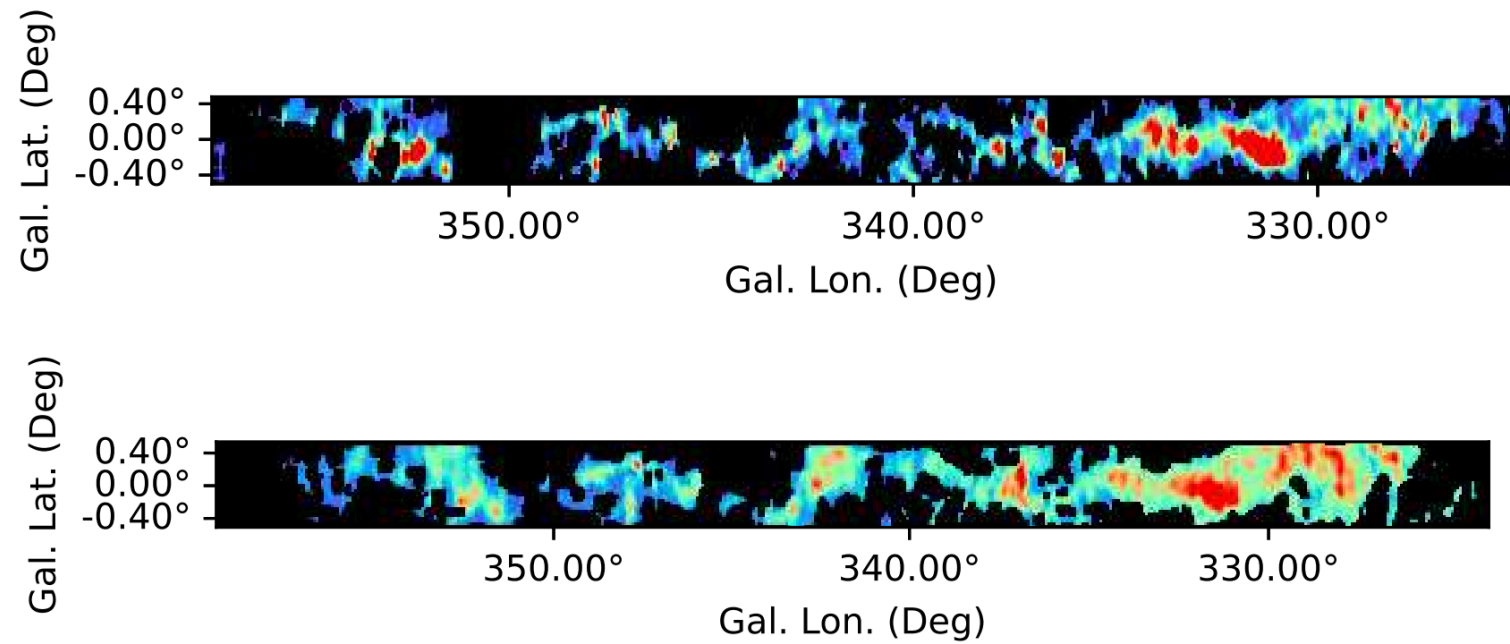


Figure 1. (top) ¹³CO integrated intensity map from SEDIGISM survey in the velocity range -95 to -75 km/s showing the wave-like feature. (bottom) ¹²CO integrated intensity map from ThrUMMS survey in the same velocity range as the top panel, smoothed to an angular resolution of 5'. Images are stretched along the Y axis for a better visualization.

内银河 CO 巡天中发现长达 5 kpc 的丝状气体结构，同样呈现正弦波状形态。可能由银盘的大尺度密度波或差分剪切塑造，与 Radcliffe Wave 的剪切成因图像一脉相承。

Maggie

巨型 HI 丝状体 · SYED ET AL. 2022
arXiv:2111.01057

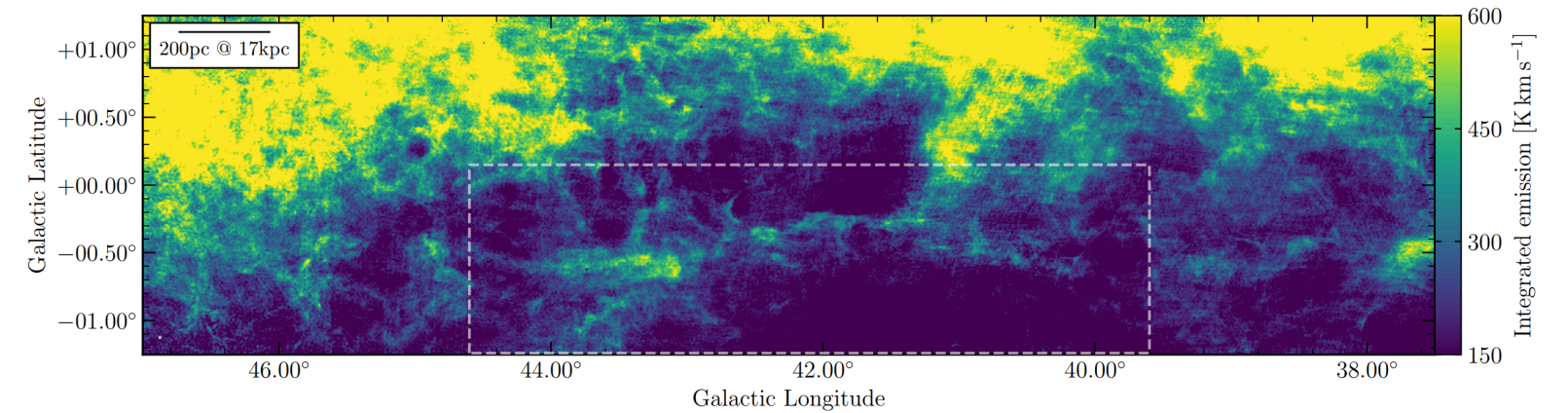


Fig. 1. Overview of Maggie. The map shows the integrated HI emission in the velocity interval between -57.5 and -48.5 km s⁻¹. Maggie is located below the Galactic midplane. The white dashed box containing Maggie marks the region that is considered in the subsequent analysis.

HI 巡天发现长约 1.2 kpc 的原子气体丝状体，无活跃恒星形成，幂律速度结构函数指向亚音速 Kolmogorov 湍流。

谢谢!

欢迎提问 · Questions & Discussion

Yong-Kun Zhang · 张永坤

NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORIES · CAS

ykzhang@nao.cas.cn