
 [交大首页 \(https://www.sjtu.edu.cn/\)](https://www.sjtu.edu.cn/)

 [上海交大报 \(http://shjdb.sjtu.edu.cn/\)](http://shjdb.sjtu.edu.cn/)

 (https://weibo.com/chiaotunguniv?refer_flag=1001030102_)



[旧版新闻学术网入口 \(https://oldnews.sjtu.edu.cn/\)](https://oldnews.sjtu.edu.cn/)



上海交通大学 · 新闻学术网
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

(<https://news.sjtu.edu.cn/index.html>)

[首页 \(/index.html\)](/index.html) / [探索发现 \(/tsfx/index.html\)](/tsfx/index.html) / [交大智慧 \(/jdzh/index.html\)](/jdzh/index.html)

站内搜索



/ 正文

探索发现 · 交大智慧

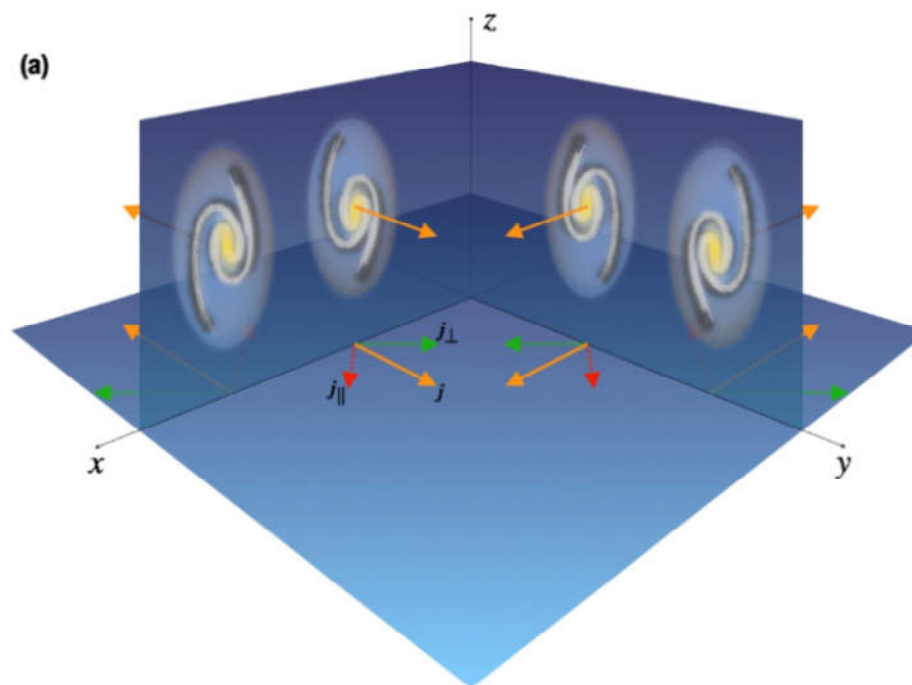
宇宙早期宇称是否守恒？利用星系角动量来检验

2020年04月06日 责任编辑：靳小芊



自然界曾被认为是简单、对称的。1956年，李政道与杨振宁提出弱相互作用中的宇称不守恒，并获得诺贝尔物理学奖。既然对称性在微观尺度被完全破坏，那么在宏观的宇宙呢？宇宙早期微观尺度的对称性破缺（parity violation）会不会在今天的天体物理尺度上留下可观测的印记？

为了解答这些令人好奇的问题，研究团队试图通过宇宙大尺度结构来重构宇宙早期可能出现的对称性破缺，如手性（chirality）不对称、螺旋性（helicity）不对称。宇宙大尺度结构是观测到的星系在宇宙空间中的三维分布。星系在空间的数密度对应宇宙早期的原初密度扰动。然而，为测量不对称性，需要一定数量的自由度。密度场是标量场，其仅有一个自由度，不足以携带任何手性和螺旋特征。幸运的是，人们不仅观测了数百万个星系的位置分布，还观测了它们的角动量。这些星系的角动量场是矢量场，有三个自由度，携带了额外的大尺度结构及早期宇宙的信息。因此可以通过观测星系角动量来研究宇宙早期的结构和不对称性。



(a) **Observability of galaxy spins** assuming thin-disk approximation. Projective angle, parallactic angle, spiral feature and color gradient are used to infer the 3D spin vector (orange vectors). Using only spiral features (i.e. in Galaxy Zoo) we only obtain j_{\parallel} component (red vectors) parallel to the line of sight.

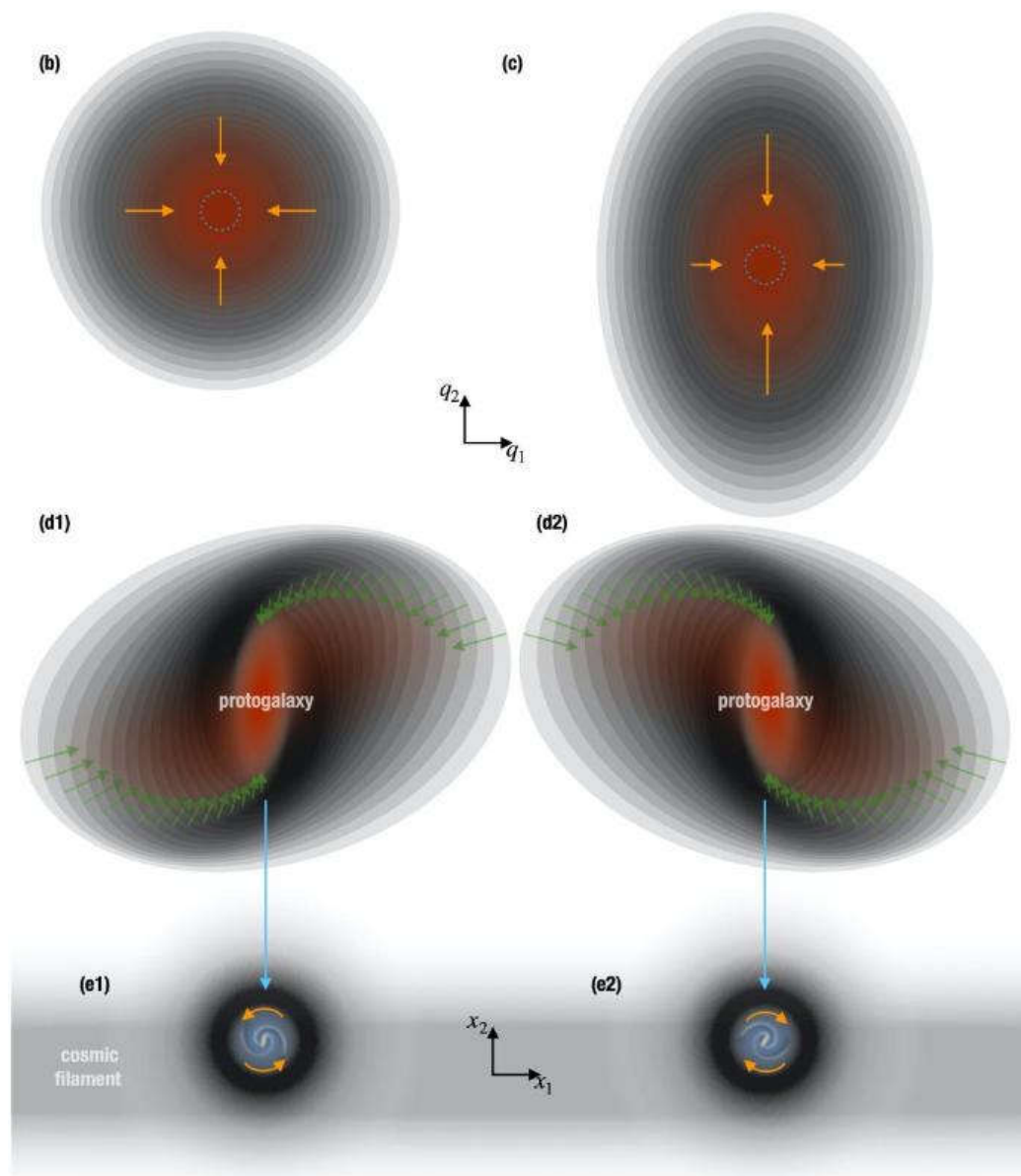
如何观测星系角动量 —— 图(a)：通过观测盘星系（薄盘近似）在天空的投影椭圆可以推测出星系旋转的角动量方向的四种可能性。为消除这四种角动量方向的简并，还需要观测旋涡星系的旋涡“缠绕”方向，分别为“S”型或“Z”型，以及星系盘的颜色梯度，如图(a)所示。绝大多数星系向旋臂“凸”的方向旋转，且在远离观测者的方向呈现更多的尘埃消光（颜色

偏红)。另外，谱线的Doppler效应也可以测量星系的旋转方向。图(a)橙色箭头表示了星系的角动量方向，红色/绿色箭头表示沿视线平行/垂直方向的角动量方向。

三维矢量场如何携带螺旋特征 —— 螺旋性是矢量场与其自身的旋度的平行性的性质。若矢量场反平行于其旋度，或二者的内积为负，则称左旋，反之为右旋（DNA双螺旋为右旋，大多数海螺、螺丝钉为右旋，右旋的镜像为左旋）。在数学上可以将矢量场分解为与其旋度反平行（左旋）、平行（右旋）和垂直（散度）的三部分。其中散度部分是人们熟悉的E（电场、标量）模式，而左旋和右旋的和是人们熟悉的B（磁场）模式。在Fourier空间求解旋度算符（ $\nabla \times$ ）的本征方程，得到三个本征值和本征矢量，并构成对应的投影矩阵。这三个投影矩阵可将原矢量场分解为E模式、左旋和右旋模式。后两者在Fourier空间振幅（功率谱）的统计不对称是螺旋性的体现。在Fourier空间k标量的螺旋功率谱不违反宇宙学原理，即矢量场满足均匀和各向同性。

重构早期宇宙的信息 —— 为了回答早期宇宙结构的问题，需要观测那些与原初宇宙结构的信息线性相关的观测量。太小尺度的恒星、行星甚至世间万物，都经历了高度非线性的过程，与宇宙早期的结构相关性很低；宇宙微波背景辐射、星系分布和大尺度结构仍然包含宇宙早期结构的信息。星系的旋转方向和其所在的暗物质晕（dark matter halo）的角动量方向高度相关，而暗物质晕在Euler空间和Lagrangian空间（即宇宙初期的

protohalo) 也呈现角动量方向的高度相关, 而后者可以很好地被宇宙早期的潮汐扭动理论 (tidal torque theory) 描述。所以, 在Lagrangian空间的星系角动量是早期宇宙结构的探针。



- (b) **Isotropic tidal field.** Isotropic Lagrangian region (red cloud) is gravitationally collapsed (orange arrows) into a virtualized object (blue dotted circle).
- (c) **Anisotropic, scale-independent tidal field.** The gravitational force is stronger along the Lagrangian coordinate q_1 , as represented by a long orange arrow. Consequently, the Lagrangian region is elongated along this direction. Here, the direction of the major axis of T does not depend on the smoothing scale.
- (d) **Anisotropic, scale-dependent tidal field.** Similar to (c), but as we move to larger scales, major axis of T rotates clockwise (d1) / anticlockwise (d2). This is illustrated by the pairs of green arrows. As a result, the Lagrangian regions will be slightly tilted as we go further from the center.
- (e) **Evolution of the two systems from (d)** into two halo-galaxy systems inside a filament (grey bar). The tidal torques have opposite signs, spinning the halo-galaxy systems in opposite directions. As a result, (e1) ends up with spin pointing out of the screen and we observe an "S"-shaped spiral galaxy, while (e2) has spin pointing into the screen and we observe a "Z"-shaped spiral galaxy.

Notes:

- (1) Grey ellipses represent tidal tensor $T = (T_{ij}) = \partial_{q_i} \partial_{q_j} \phi$. Their major axes are oriented along the major principal axes of T and show directions of (relatively) stronger gravitational clustering. Concentric ellipses represent T averaged over increasingly larger smoothing scales, with the largest ellipse corresponding to the largest smoothing scale.
- (2) In our Universe, we are able to reconstruct the initial gravitational potential (d1,d2) from the positions of galaxies, and thus predict the oriented spins of galaxies (e1,e2).
- (3) We are able to predict the full 3D direction of the spin, so we can explicitly distinguish between j and $-j$. Measurements of galaxy shapes (intrinsic alignments) cannot provide such a distinction.

潮汐扭动 (tidal twist) —— 星系分布可重构宇宙原初密度场。研究团队提出利用密度 (潮汐) 场信息重构原初角动量信息 (spin mode reconstruction), 并验证了其于星系/暗物质晕的可观测角动量的相关性。潮汐场, 即密度场的逆Laplace算子的Hessian矩阵。图(b-e)中展示了二维空间的宇宙中潮汐与星系角动量的联系, 其中用椭圆的长轴和短轴表示潮汐张量的两个本征轴, 椭圆的大小对应于相应 (平滑) 尺度的潮汐。(b)中各向同性且不依赖于尺度的潮汐场导致球 (圆) 塌缩, 不产生角动量; (c)中各向不同性、但尺度无关的潮汐导致椭圆塌缩, 不产生角动量; (d)中不同尺度潮汐场的本征轴 (绿色箭头表示潮汐主轴) 随尺度变化, 大尺度的潮

汐场扭动小尺度的原星系（protogalaxy），产生角动量spin mode，并在(e)中的宇宙纤维结构（cosmic filament）中形成两个角动量相反的星系。(d1,e1)和(d2,e2)互为镜面反演；这种奇宇称（parity-odd）的可观测量可被原初偶宇称（parity-even）的密度场（标量）及潮汐场（对称张量）预测，因此这个可观测量也是早期宇宙的探针。早期宇宙的宇称破缺可能会通过这种spin mode携带到今天星系的角动量场。Yu, Hao-Ran et al. (<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.124.101302>) 的 Conclusion and discussion中及相关参考文献给出了可能的对称性破缺机制。

此项研究以“Probing Primordial Chirality with Galaxy Spins”为题于2020年3月10日发表在《物理评论快报》上【Yu, Hao-Ran et al. (<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.124.101302>) Physical Review Letters, 124,101302(2020)】。本文第一作者和通信作者为于浩然，他于2017年7月至2019年11月在李政道研究所天文与天体物理研究部任博士后研究员。在此期间，他主导的“中微子的非线性成团及宇宙大尺度结构”等3个科研项目先后获得博士后科学基金、基金委青年科研基金的支持。自博士后出站后，于浩然至厦门大学任天文系副教授、南强青年拔尖人才计划支持的特任研究员、博士生导师。另外合作参与此项研究的还有：加拿大理论天体物理中心教授、李政道研究所高级访问学者彭威礼

(Ue-Li Pen), 以及上海交大物理与天文学院的特别副研究员余瑜, 特聘教授、李政道研究所兼职研究员杨小虎, 讲席教授、李政道研究所天文与天体物理研究部主任景益鹏院士等。

此项工作得到了国家自然科学基金青年科学基金项目NSFC11903021的支持。

文章链接:

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.124.101302>

(<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.124.101302>)

作者: 于浩然

供稿单位: 李政道研究所

沪ICP备05052060 (<http://www.beian.miit.gov.cn/>) 沪举报中心 版权所有© 上海交通大学 新

闻网编辑部维护

地址: 上海市东川路800号 邮编: 200240 查号: 86-21-54740000