

旋涡星系密度波理论的进展

岳曾元

(北京大学地球物理系)

提 要

本文对密度波理论的总的观点和近年来取得的新进展作了概括和评述。

一、理论的基本目的和基本方法

为说明密度波理论的基本目的，还是让我们首先引用Oort在1962年的一段话^[1]：

“在具有强较差旋转(如在所有非棒型旋涡中所发现的强较差旋转)的系统中，旋涡的特点是十分自然的。结构上的任一种不规则性都可能被拉成旋涡的一部分。但这一点并不是我们所要考虑的现象。我们必须考虑遍及整个星系的旋涡结构，它从核心伸展到外缘，并且由从两个对称点开始伸出的两条旋臂所组成。尽管这一结构常常很不规则并且出现断裂，但在很多星系中能够认出这一大尺度现象的一般形式。”

这就是说，天文界首先关心的是：在强较差旋转体系中为什么能存在和维持大尺度的规则旋涡图案？为什么这种图案多为对称双臂？

密度波模式理论的基本目的正是要解释这种大尺度的规则现象，而不是局部的、细节的、无规则的现象。密度波模式理论并不排除后者，它可以与后者共存，相辅相成，达到对于星系结构的更完整的认识。但不可否认，对大尺度规则结构的研究在整个星系结构的研究中具有某种“提纲挈领”的作用。特别是由于星系的形态分类是由大尺度规则结构来决定的，所以模式理论显然适于研究星系形态分类的动力学机制。

为了抓住大尺度规则结构这一中心议题，尽快得出可与观测比较的结果，并达到对于现象本质的深入了解，密度波理论采用的不是一种纯演绎的方法，而是在承认存在大尺度规则旋涡结构这一观测事实的基础上，提出准稳旋涡结构(QSSS)假设，再经过若干简化，得出可供观测比较的定量结果，并阐明其主要的物理机制，使得人们对过程的主要方面的认识能在较短时间内大大地向前推进一步，而把逻辑结构中的其它细节问题(并非不重要)留到以后去逐步解决。林家翘所采取的正是这一途径^[2,3]。这也是在困难复杂的实际问题面前，应用数学家的一种典型的作法。

1984年7月8日收到。

1984年上海天体物理前沿讨论会上的报告。

二、准稳过程与瞬变过程

如设 $\Omega(r)$ 为星系盘上的自转曲线，则可取星系盘上某一典型位置处的 Ω^{-1} 作为时间尺度。在这一时间尺度内形态和幅度变化不大的过程可称为缓变(或准稳)过程；反之，在这一时间尺度内形态和幅度变化甚大的过程称为瞬变过程。在实际星系中，这两种过程都存在，但决定着大尺度规则结构的应是准稳过程。

顺便指出，Lindblad (1895—1965) 一生用了几十年时间研究星系的旋涡结构，虽然他提出的密度波一词在概念上远不够明晰，并包含一些不正确的设想，但有两点是应当肯定的：第一，他试图用引力作为主要机制来解释这一现象；第二，他在晚年(1963年)提出了在较差旋转体系中存在准稳旋涡结构(quasi-stationary spiral structure)的可能性^[4]。林家翘则从一开始就抓住了问题的核心，将 QSSS 作为基本假设，并赋予它远为清晰的物理内容。

三、理论结构的示意图

我们可将理论结构的大致线索用上页图来表示。

四、渐近模式理论

渐近模式理论在密度波理论中占有重要的地位。所谓渐近理论，是利用扰动密度分布呈旋涡形波状的特点，将扰动密度与扰动引力势的关系作某种局部近似。这一简化将积分微分方程组化成微分方程组，大大有利于阐明过程的主要物理机制。由于渐近理论不能反映引力的长程性质，因此渐近理论所预言的趋势应当用更准确的数值方法加以检验。渐近理论的优点则在于它能给出数值方法所不能给出的物理机制。

下面我们着重介绍渐近理论得出的两种超反射(over-reflection)机制。

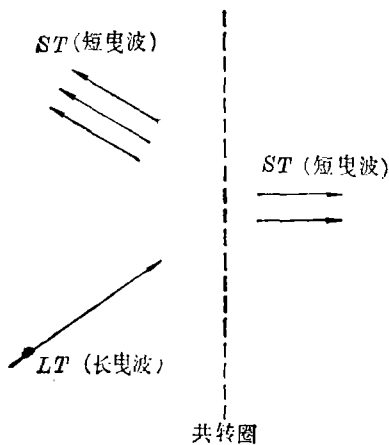


图2 “Waser”机制。

1. 第一种超反射机制(Waser机制)

“Waser” (wave amplification by stimulated emission of radiation) 机制是 Mark^[5] 于1976年提出的，它在林家翘及其合作者们逐步完善的动力学全局模式理论中占有一个重要的地位。“Waser”机制可由图2示意：在共转圈以内，长曳波向外传播，达到共转圈后，产生一个向外传播的短曳波和一个向内反射的短曳波。由于波能密度在共转圈两侧符号相反，能量守恒自然导致了反射波幅的放大。

在整个星系盘上的动力学机制(模式的构成)可由图3示意，图中 k_s^2 是出现在渐近理论的动力学方程

$$\frac{d^2u}{dr^2} + k_3^2(r, \omega)u = 0 \quad (4.1)$$

中的系数, u 是一个与扰动面密度复振幅 $\sigma_1(r)$ 相联系的量。方程(4.1)在边界条件

$$\begin{cases} u \text{ 正则,} & \text{当 } r \rightarrow 0 \\ \text{波向外辐射,} & \text{当 } r \rightarrow \infty \end{cases} \quad (4.2)$$

之下构成一个复本征值问题。林家翘和刘汝莹处理了 $K_3^2(r)$ 在 r_{co} 处与 r 轴相切的简化情形, 得出了主要的物理机制^[6]。对于 $K_3^2(r)$ 曲线的更一般情形(甚至包括有限厚度效应)的处理见文献[7, 8, 9]。

应当强调, 比较大的核球对于正常旋涡星系起着重要的作用。这个比较大的核球造成了所谓“Q 垒”, 并在数学上导致内回转点 r_{ce} 的存在(图 3)。从物理上说, 大的核球阻挡了波的内传, 使之在 r_{ce} 处反射, 从而中心区无棒形成, 于是导致正常旋涡结构。如果“Q 垒”足够低, 内传的曳波将穿过中心而形成导波, 于是与曳波合成为棒形, 导致棒旋结构。Q 垒还有另一作用, 即当存在内 Lindblad 共振点时, 如果核球足够大, 使 Q 垒位于内 Lindblad 共振点之外, 则能够“保护”波模式, 使之不遭受内 Lindblad 共振的吸收。

2. 第二种超反射机制(swing amplification)

这里我们简略地介绍一下近年来林家翘及其合作者找到的另一超反射机制^[10]。按照 Lau-Bertin 的三次色散关系^[11], 除了长波和短波之外, 还存在一种开展波(open wave), 它的波长比长波更长, 但传播方向却与短波相同, 于是会发生如图 4 所示的第二类超反射。入射的导波反射成为放大的曳波, 故称为第二类超反射(swing amplification)。

在色散关系中包含两个参数

$$J = \frac{4m\pi G\sigma_0\Omega}{r\kappa^3} \sqrt{s} \quad (4.4)$$

和

$$Q = \frac{\kappa a_0}{\pi G\sigma_0}, \quad (4.5)$$

其中 σ_0 为基态的星盘面密度, $\Omega(r)$ 为旋转曲线,

$$s = -\frac{d \ln \Omega}{d \ln r}, \quad (4.6)$$

表示较差旋转的程度(在 $\Omega \propto r^{-1}$ 的典型情形下有 $s=1$)。Q 的物理意义是大家熟悉的, 它代表弥散速度的一种无量纲量度, 它反映着 a_0 所导致的弥散效应与局部物质自引力的聚集效应两者的相对强弱。J 的物理意义不那么一目了然, 但通过一些量阶分析不难看出, J 大体上反映

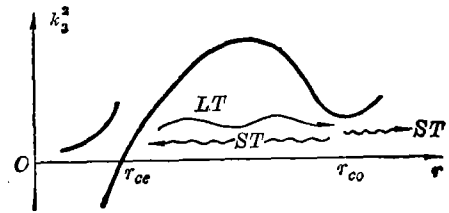


图 3 由长、短曳波构成的模式。

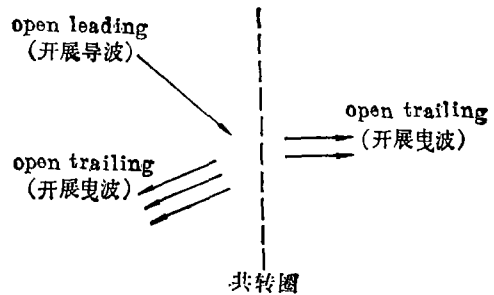


图 4 第二类超反射 (swing amplification)^[10]。

着盘质量在总质量(包括核球、盘和晕)中所占的相对大小: 盘质量所占比重越大, 则 J 越大, 反之亦然。可以证明^[10], 在 (J, Q) 平面内, 当

$$JQ^2 \leq 4\sqrt{3}/9 \quad (4.7)$$

有物理意义的解通常只有长波和短波 (其中有一小局部区域例外, 存在三种波: 长波、短波和开展波)。当

$$JQ^2 > 4\sqrt{3}/9 \quad (4.8)$$

只有开展波。

五、精确模式的计算

Pannatoni^[12]找到了一种计算方案, 来求流体力学方程和Poisson积分(即不用WKB近似的、精确的密度与引力势关系)之下模式的精确解。尽管在辐射条件的处理上仍然带有近似, 但数值结果表明计算方案是可靠的(结果对于边界点的选取不敏感), 与渐近理论比较也是令人满意的^[6]。

这种数值方法又由Haass等人^[13]加以发展, 并计算了大量星系模型下的模式。系统地改变基态参量 $\sigma_0(r)$ 、 $\Omega(r)$ 和 $Q(r)$, 则模式也系统地、有规律地发生改变。将这种趋势与渐近理论得出的趋势相比较, 从而肯定后者阐明的机制。两条途径相结合, 为星系的形态分类给出了动力学的依据。

六、星系形态分类的动力学研究

如果说, 林家翘的理论在六十年代最重要的应用在于通过色散关系和星系激波直接解释了大量天文现象(包括恒星形成触发机制这样的重要问题), 那么, 从七十年代初至今所作的关于动力学模式的研究所导致的最重要应用, 便是指出了星系形态分类的动力学机制。这方面已取得若干令人信服的进展。让我们引用Haass、Bertin和Lin^[13](1982)文中的一些结果(见图5和图6)。

图5显示的结果, 与从Sa到Sc星系旋臂越来越开、而核球越来越小的观测事实相一致。

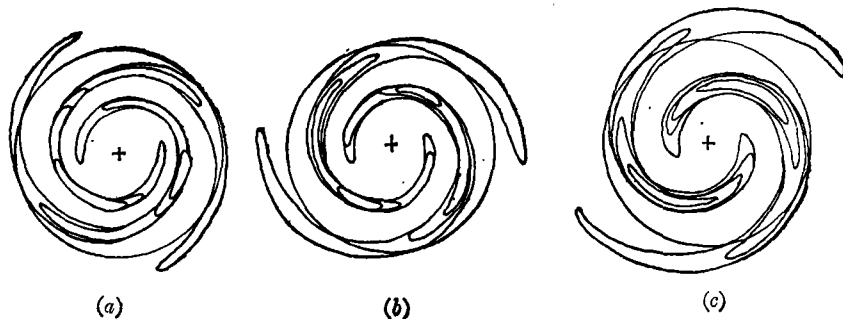


图5 从(a)到(c), $\Omega(r)$ 和 $Q(r)$ 相同, $\sigma_0(r)$ 渐增(在 $\Omega(r)$ 不变情形下, 这意味着核球质量渐减), 算出的模式由紧到松, 与观测一致。图中所示为扰动面密度的等高线^[13]。

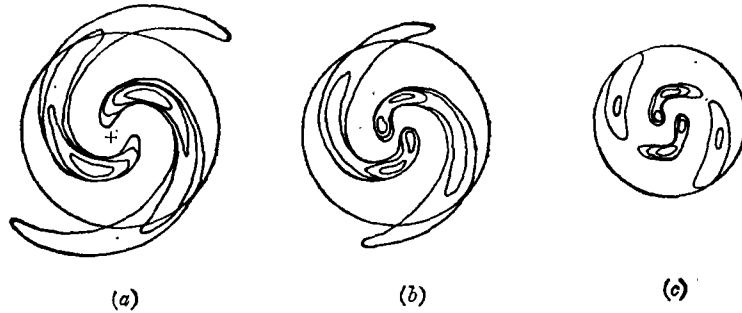


图 6 由(a)到(c), $\Omega(r)$, $\sigma_0(r)$ 相同, 而 Q 全渐低, 算出从正常旋涡星系到棒旋星系的过渡(注意画出的只是扰动面密度等高线, 为看出棒形, 需将基态迭加上)^[15]。

图 6 则显示了棒旋星系的机制: 当 Q 全足够低时, 内传的曳波可穿过中心而成为导波, 两者的合成便导致中心区棒的形成。

七、其它若干问题

1. 关于双臂的优越性

概括地说, 内 Lindblad 共振的吸收作用使双臂模式优于多臂模式, 增长率使双臂模式优于单臂模式。

更具体地说, 内 Lindblad 共振点位于满足

$$\Omega_p = \Omega(r) - \frac{\kappa(r)}{m} \quad (7.1)$$

的 r 处。式中 Ω_p 为图案角速度, κ 为本轮频率, m 为臂数。对于 $m=2$, 内 Lindblad 共振点要么不存在, 要么很靠近星系中心。当核球较大时, “ Q 全” 会将密度波阻挡在 Q 全之外, 使之并未与内 Lindblad 共振点接触, 即并未实际上发生内 Lindblad 共振和吸收。对于 $m=3$, $m=4 \dots$ 情形, 内 Lindblad 共振点已离中心较远, 核球通常不能“保护”这些多臂模式, 使之免遭内 Lindblad 共振的吸收。这是双臂优于多臂的主要原因。至于单臂模式为什么少见, 目前密度波理论的解释是, 通常单臂模的增长不如双臂模快。

2. 自调节过程(self-regulation)

当星盘上存在某种比较剧烈的不稳定性时, 会使星的弥散速度加快(即星盘变“热”), 导致 Q 值增加, 从而降低不稳定性, 有利于达到准稳。

3. N 体模拟方法

由于计算技术的限制, 计算时采用的 N 比星系中实际的星数小得太多, 于是往往夸大了不稳

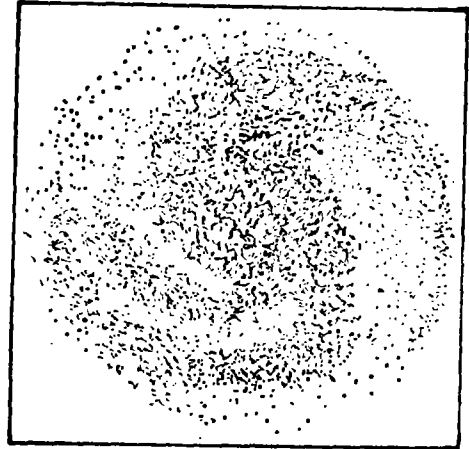


图 7 某一星系模型三个增长最快的模式的迭加。实际星系 D100 中类似的图案可能由多模迭加所致^[16]。

定性。同样，由于计算技术的限制，要想增大 N ，往往必须对引力的计算作更多的简化和近似。总之，在这条途径上仍有许多困难。

4. 多模迭加与演化

当几个模式迭加在一起时，由于各模式图案速度和增长率均不相同，总图案必然随时间而演化。Haass等曾用三模迭加，得出与实际星系 $D100$ 相象的图案^[13]，即在两个主臂之外还包括一个短臂的图案(见图 7)。

参 考 文 献

- [1] Oort, J. H., in *Stellar Matter in Galaxies*, ed. by Woltjer, L., 234, (1962).
- [2] Lin, C. C. and Shu, F. H., *Astrophys. J.*, 140 (1964), 646.
- [3] Lin, C. C., *SIAM J. Appl. Math.*, 14 (1966), 876.
- [4] Toomre, A., *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 15 (1977), 437.
- [5] Mark, J. W-K, *Astrophys. J.* 205 (1976), 363.
- [6] Lin, C. C. and Lau Y. Y., *Studies in Appl. Math.*, 60 (1979), 97—163.
- [7] Yue, Z. Y., *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 20 (1982), 1—46.
- [8] Yue, Z. Y., *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 20 (1982), 47—68.
- [9] Yue, Z. Y., *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 20 (1982), 69—110.
- [10] Lin, C. C. and Bertin, G. invited review paper at IAU Symposium, No. 106, (1983).
- [11] Lau, Y. Y. and Bertin, G., *Astrophys. J.*, 226 (1978), 508—520.
- [12] Pannatoni, R. F., *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 24 (1983), 165—212.
- [13] Haass, J., Bertin, G. and Lin, C. C., *Proc. Nat. Acad. Sci., USA*, 79 (1982), 3908—3912.

Advances on the Density Wave Theory of Spiral Galaxies

Yue Zengyuan

(Department of Geophysics, Beijing University)

Abstract

The general perspective and the recent advances of the density wave theory of spiral galaxies are summarized and reviewed.

As Oort pointed out in 1962, the major problem in this field is how to explain the existence and the maintenance of the large-scale regular spiral patterns in a system of strongly differential rotation and the prominence of the two-armed features. The main purpose of the modal theory of density wave, which has been successfully developed by Lin and his collaborators during the last two decades, is simply to explain the large-scale regular structure, the "grand design", rather than the local, detailed and less regular features.

Since the morphological classification of galaxies is based on the large-scale regular structure, the modal theory is appropriate for the investigation of the dynamical basis of the morphological classification. The coexistence of large-scale regular structure and relatively irregular features suggests that the modal approach and the initial value approach are complementary rather than contradictory.

The overall picture of the structure of the theory can be sketched as in Fig.1.

Two types of over-reflection of waves near the corotation are briefly described. The modes consisting of long and short trailing waves were first established by Lin and Lau and later extended to more general situations by Lin's collaborators. A sizable bulge in the center or the "Q-barrier" plays an important role in maintaining the normal spirals, and the inner Lindblad resonance holds the key to the prominence of the two-armed features.

In addition to the long and short waves, the third category of waves, the open waves, has been found recently by using the Lau-Bertin cubic dispersion relationship (see Lin and Bertin^[10]). It was found that the (J, Q) plane could be divided into two regions where over-reflections of Type I and II are important respectively.

The most important application of the density wave theory in the 1960's was to give explanations to a lot of astronomical observations and the mechanism for the star formation in terms of the dispersion relationship and the galactic shock wave, while the most important application of the theory during the second stage, roughly since early 1970's, is the dynamical classification of galaxies in terms of the investigation of modes. Convincing results along this line have been obtained by Lin and his collaborators during the last years. By changing the functions of the basic state $\sigma_0(r)$, $\Omega(r)$ and $Q(r)$ systematically, they obtained the transition from tightly wound to open spiral modes and the transition from normal to barred spiral modes as shown in Fig.5 and Fig.6 respectively.

Although the modal approach is different from the initial value approach, some kind of evolution can be investigated by superposition of modes with different pattern velocities and different growth rates.