

索取号: _____

密级: 一般_____

南京師範大學

硕士学位论文



盘星系旋转矢量方向分布 及内禀扁度研究

作者: 朱朝曦

院系: 物理科学与技术学院

指导教师: 袁启荣

学科专业: 天体物理

答辩日期: _____

声 明

本人郑重声明：

- 1、坚持以“求实、创新”的科学精神从事研究工作。
- 2、本论文是我个人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。
- 3、本论文中除引文外，所有实验、数据和有关材料均是真实的。
- 4、本论文中除引文和致谢的内容外，不包含其他人或其它机构已经发表或撰写过的研究成果。
- 5、其他同志对本研究所做的贡献均已在论文中作了声明并表示了谢意。

作者签名：朱朝曦_____

日 期：2003.04.01_____

目录

摘要

Abstract

第一章 前言

参考文献

第二章 盘星系的内禀扁度

2.1 引言

2.2 研究方法

2.3 样本及数据分析

2.4 讨论

参考文献

第三章 Virgo 团中盘星系旋转矢量方向分布

3.1 引言

3.2 Virgo 团中旋涡星系旋转矢量方向分布

3.2.1 样本数据

3.2.2 统计结果

3.2.3 图形分析

3.2.4 分析和结论

3.3 Virgo 团中盘星系旋转矢量方向分布

3.3.1 样本数据

3.3.2 统计结果

I. θ 分布

II. ϕ 分布

III. 面积分布

3.3.3 结论

参考文献

第四章 本超星系团中场星系旋涡矢量方向的分布

1 引言

2 研究方法

3 统计结果

4 星系内禀扁度 q_0 的影响

5 讨论和结论

参考文献

致谢

摘要

本文主要对本超星系团中的场星系、不同样本来源的 Virgo 团成员星系的旋转矢量方向分布情况进行统计分析,以期寻找星系或星系团等宇宙大尺度结构的形成和起源信息并给已有或新的星系或星系团形成和起源理论提供观测依据和实验佐证。本文也对盘星系的厚度与长轴长之比——星系的内禀扁度进行了统计和分析。(1)我们从 LEDA 数据库中选取了 14,988 颗盘星系进行了内禀扁度的统计分析。研究表明,盘星系的内禀扁度与星系的形态密切相关。整体上说,透镜星系和不规则星系的内禀扁度 q_0 大于旋涡星系,早型旋涡星系的内禀扁度 q_0 大于晚型旋涡星系,其中 Scd 星系的内禀扁度 q_0 最小。(2)利用 P.FouQUE(1990)所得带有倾角数据的完备的 Virgo 团旋涡星系样本,对 Virgo 团旋涡星系旋转矢量分布进行统计得出:Virgo 团旋涡星系旋转矢量方向与盘面之间的夹角分布是非各向同性分布的,旋转矢量方向倾向于平行和垂直于超星系盘面两个方向;早期类型星系和晚期类型星系有不同的转旋矢量方向分布,暗示星系旋转矢量方向跟星系类型有关,不同的星系类型可能有不同的大尺度起源;Virgo 团旋涡星系旋转矢量方向倾向于指向 Virgo 团中心;在统计星系旋转矢量方向分布时,内禀扁度 q_0 取 0.2 并不影响最终结论。(3)利用所得的 $q_0 - T$ 关系,对 A CATALOGUE OF THE VIRGO DISK GALAXIES 中的数据进行处理,得出:Virgo 团中盘星系旋转矢量方向分布是非各相同性的;Virgo 团中盘星系旋转矢量方向倾向于平行于团平面;Virgo 团中盘星系旋转矢量方向在团平面上的投影倾向于指向与 Virgo 团中心方向成 45° 角的方向;星系旋转矢量方向分布是与星系类型指数是相关的,可能星系旋转矢量方向分布随星系类型指数增大存在连续的序列。(4)从北天亮星系星表严格挑选了 220 个场星系作为样本,我们运用 Kolmogorow-Smirnov (K-S)检验法得出这些场星系旋转矢量分布是非各向同性的并且分布跟形状是有关。这显示不同形状的星系可能有不同的大尺度起源。我们也考虑了星系内在扁度的影响,扁度 0.2 的微小变化不影响我们的结论

关键词: Virgo 团, 旋涡矢量, 内禀扁度

ABSTRACT

This thesis mainly concentrates on the study of the distributions of the spin vectors' orientation of the field galaxies in the Local Supercluster and the galaxies in the Virgo Cluster from different samples in order to exploit the information of the formation and origin of galaxies and clusters and the observational basis and proof for the old or new theories about the formation and origin of galaxies and clusters. (1) Our statistical analysis on 14,988 disk galaxies taken from the LEDA database shows that the intrinsic flatness is closely related to galactic morphology. In general, the intrinsic axis ratios q_0 for the lenticular and irregular galaxies are larger than those of the spirals, and the early-type spirals have a larger q_0 than the late-types. The Scd galaxies are found to have the minimum q_0 . (2) The complete sample of 178 virgo cluster spiral galaxies (P.FouQUE 1990) with inclination angles is used to test the orientation distribution of spiral galaxies' spin vectors in the Virgo. The conclusions are as follows: The distribution of the angle θ between galactic spin vectors and the local supercluster plane are found to be anisotropic; Two humps at low and high θ in the histograms shows that galactic spin vectors tend to point at parallel and perpendicular to the local supercluster plane with respect to the expected random distribution; The orientation distribution of the spin vectors of Early spiral galaxies and late spiral galaxies is different, which indicates a morphological dependence of the orientation of the spin vectors of disk galaxies and different types of galaxies maybe owe different large scale origin; The projection on the local supercluster plane of the spin vectors of the spiral galaxies in the Virgo cluster tend to point towards the Virgo center; When we test the orientation distribution of the spin vectors of the spiral galaxie, if the intrinsic flatness q_0 of spiral galaxies is simply considered to be equal to 0.2, the final conclusions are not influenced. (3) The newly generated $q_0 - T$ relation is used to deal with the data of A CATALOGUE OF THE VIRGO DISK GALAXIES, and the conclusions are drawn as follows: The distribution of the orientation of disk galactic spin vectors in the Virgo Cluster is anisotropic; The orientation of spin vectors of the disk galaxies in the Virgo cluster tends to be parallel with the plane of the Virgo Cluster; The projection on the local supercluster plane of the spin vectors of the disk galaxies in the Virgo cluster tend to point towards the orientation of the 45° angle deviating from the Virgo center; The distribution of the orientation of galactic spin vectors is morphological dependent, and it indicates that the distribution of the orientation of galactic spin vectors maybe form continuous series with the

index of galactic types .(4)A Kolmogorow-Smirnov (K-S) test is applied to the sample of the 220 field galaxies that are strictly selected from the Photometric Atlas of Northern Bright Galaxies. The results show that the spin vectors of these field galaxies are significantly anisotropic, and the dependence upon galactic morphology is also confirmed. The implication is that the galaxies with different morphologies might have different large-scale origins. The influence of the intrinsic flatness of disk galaxies is taken into account. We find that the slight deviation from 0.2 does not influence our conclusions.

[Keyword]: the Virgo cluster; the spin vector; the intrinsic flatness

第一章. 引言

星系团或超星系团成员星系的角动量分布研究对了解星系以及宇宙大尺度结构形成及演化具有重要意义^{[1][2]}。这个问题最早可以追溯到1875年。P. Nilson's 论文^[3]对1973年以前有关这方面的研究进行了相当详细的概述。

如果自从星系形成以来星系的角动量并没改变多少的话^{[4][5]}，那么目前盘星系旋转矢量（即星系角动量方向）的方向可以表示星系形成时最初情形星系旋转矢量方向。因而对星系旋转矢量方向的分析可以了解有关星系起源方面的知识。最近研究也表明，重新模拟出宇宙中所观察到的纤维状结构是可能的^{[6][7][8][9][10]}，这可以通过如下方法完成：结构形成是早期宇宙处于均匀各向同性的高斯随机场中扰动的结果。这种方法给出了 $\sim 30Mpc$ 空洞，与观测是一致的。这些模拟表明暗物质模型中结构是以丝形为特征并且它们形成了网络。后时代纪元邻近星系的关联性也能观测到。把超星系团看作是能记住导致星系盘面方向非随机性这一时期的化石是可能的。因而对星系旋转矢量方向的分析可以了解有关星系等宇宙大尺度结构形成方面的知识。

对星系团或超星系团成员星系旋转矢量方向性的研究^[11]的人很多，但可能是由于方法和样本标准不同^{[12][13]}，结果也不同，然而方向一致的证据越来越多。

关于星系和星系团形成和起源的理论模型很多，不少都对星系团成员旋转矢量方向的分步作了理论上的预言和解释。有代表性的理论模型主要有以下四种：

(1). "pancake"模型(也叫"top-down"模型)^{[14][15]}。这一理论认为星系旋转矢量方向倾向于平行于所在星系团或超星系团盘面。在这一模型中，星系团首先形成，然后碎裂成星系。垂直于星系团或超星系团盘面的逐步冷却的振动波所产生的湍动旋涡的一致性或者原始星系星云和垂直于星系团或超星系团盘面下落的物质的碰撞都被认为可导致星系旋转矢量方向的一致性。

(2). "Explosion"模型^{[16][17]}。和"pancake"模型一样，这一理论也认为星系旋转矢量方向倾向于平行于所在星系团或超星系团盘面。和"pancake"模型类似

方式,这一模型认为由于一系列爆炸导致不断增大的外壳的残骸不断冷却并碎裂成星系。

(3). "Bottom-up" 模型 (也叫"hierarchy"模型^[18])。该理论预测星系旋转矢量的方向应是完全随机分布的。按照这一模型,星系首先形成,由于引力,星系不断积聚形成星系团,在此过程中由于潮汐力的缘故,星系获得了它们的角动量方向。

(4). 初始旋涡理论^[19]。这一理论认为星系旋转矢量方向应垂直于星系团盘面。依据这一理论,在宇宙早期就存在某种类型的旋涡,由此产生扁平旋转的原始星系团,进而星系在其中形成,星系旋转轴垂直于星系团盘面。但由于这一理论预测的宇宙背景辐射非各同性比观测所得大的太多,因此这一理论目前已脱离了星系形成理论的主流。

我们可以统计某个星系团或超星系团内成员星系旋转矢量方向分布,并和以上的理论模型预测的应有的结果比较,从而推断星系或星系团是怎样形成和演化的,或是由以上模型一种还是多种共同作用的结果,并给人们修正已由的模型和研究新的模型提供观测上的依据。

因此,获得星系团或超星系团中星系旋转矢量方向的分布,考察星系团或超星系团成员星系旋涡矢量方向与所在的星系团或超星系团盘面之间的关系进而推测星系和星系团形成和演化及起源是天体物理学面临的一个重要而又基本的问题。

由于本超星系团离我在近,对其观测资料也最丰富最准确,因而对其研究的人也最多。

由于直接用常用的赤道坐标系坐标表示星系旋转矢量方向并且统计星系旋转矢量方向和超星系盘面之间关系很不方便。为此目前人们都使用超星系坐标系(L,B),以超星系盘面作为SGX轴和SGY轴所在X-Y平面,SGZ轴取超星系北极的方向。本文主要统计本超星系团中星系的旋转矢量方向空间分布,因此我们使用本超星系团极坐标系。我们使用由Flin&Godlowski(1986)^[20]定义的本超星系团超星系坐标系(L,B,P)代替赤道坐标(α, δ, PA)系统,(其中L和B是星系超星系坐标,P和PA分别是两种系统中对应的位置角)。在赤道坐标系统中,本超星系团北极坐标是 $\alpha_{sgp} = 285^\circ.5$, $\delta_{sgp} = +16^\circ$ ^[21]。在本超星系团坐标系统中,

基本大圆选择通过 Virgo 团中心 ($\alpha = 186^\circ.25, \delta = +13^\circ 10'$)^[21]。Virgo 团中心接近于超星系坐标 X (SGX) 轴方向: $L = 0, B = -3^\circ.19$, 超星系 X 轴和 Y 轴所在平面位于本超星系团盘面上。

星系超星系坐标 (L, B, P) 和赤道坐标 (α, δ, PA) 的关系如下^[20]:

$$\text{当 } \alpha \in [\alpha_{sgp}, 2\pi), \alpha_f = \alpha - \alpha_{sgp}, L = L_p - L_f$$

$$\text{当 } \alpha \in [0, \alpha_{sgp} - \pi), \alpha_f = \alpha - \alpha_{sgp} + 2\pi, L = L_p - L_f$$

$$\text{当 } \alpha \in [\alpha_{sgp} - \pi, \alpha_{sgp}), \alpha_f = \alpha_{sgp} - \alpha, \begin{cases} L = L_p + L_f & (L_f \leq 2\pi - L_p) \\ L = L_p + L_f - 2\pi & (L_f > 2\pi - L_p) \end{cases}$$

其中 $L_p = 284^\circ.6$ 北天极超星系经度, L_f 由下式给出:

$$\begin{cases} \cos B \sin L_f = \cos \delta \sin \alpha_f \\ \cos B \cos L_f = \sin \delta \cos \delta_{sgp} - \cos \delta \sin \delta_{sgp} \cos \alpha_f, \\ \sin B = \sin \delta \sin \delta_{sgp} + \cos \delta \cos \delta_{sgp} \cos \alpha_f. \end{cases}$$

又^[12]

$$\sin t = \cos \delta_{sgp} \sin \eta / \cos B$$

$$\text{其中 } \eta = \begin{cases} \alpha - \alpha_{sgp} & (\alpha \geq \alpha_{sgp}) \\ \alpha - \alpha_{sgp} + 2\pi & (\alpha < \alpha_{sgp} - \pi) \\ \alpha_{sgp} - \alpha & (\alpha_{sgp} - \pi \leq \alpha < \alpha_{sgp}) \end{cases}$$

$$\text{若 } \alpha < \alpha_{sgp} - \pi \text{ 或 } \alpha \geq \alpha_{sgp}, \text{ 则 } P = \begin{cases} PA - t & (PA \geq t) \\ PA - t + \pi & (PA < t) \end{cases}$$

$$\text{若 } \alpha_{sgp} - \pi \leq \alpha < \alpha_{sgp}, \text{ 则 } P = \begin{cases} PA + t & (PA \leq \pi - t) \\ PA + t - \pi & (PA > \pi - t) \end{cases}$$

使用这一超星系坐标系统, 若定义 (θ, ϕ) 来表示星系旋转矢量的方向, θ 是本超星系团盘面即超星系坐标系统 X 轴和 Y 轴所在平面间和旋转矢量的夹角, ϕ 是旋转矢量在本超星系团盘面 (X-Y 平面) 上的投影和本超星系团坐标系 X 轴方向的夹角 (近似指向 Virgo 团中心)。

星系旋转矢量方向 (θ, ϕ) 和超星系坐标 (L, B, P) 的关系^[20]有

$$\sin \theta = -\cos i \sin B \pm \sin i \sin P \cos B$$

$$\sin \phi = (\cos \theta)^{-1} [-\cos i \cos B \sin L + \sin i (\mp \sin P \sin B \sin L \mp \cos P \cos L)]$$

其中 i 是星系轴和观测视线之间的夹角即所谓的倾角。对盘星系，倾角 i 一般利用^[22]公式： $\cos^2 i = (q^2 - q_0^2)/(1 - q_0^2)$ 求得，其中 $q = b/a$ 是星系短半轴与长半轴之比（即轴率）的观测值，而 $q_0 = b_0/a_0$ 是星系轴率的真实值（内禀扁度），相当于星系盘的厚度与盘直径之比，可以用 q_0 来表示盘星系的内禀扁度。对 q_0 值，用不同的样本不同的方法人们得到的结果并不一致，但一般在统计盘星系旋转矢量方向时人们倾向于取 $q_0 = 0.2$ 。

由于我们不清楚盘星系短轴那一边更靠近我们，以及星系角动量矢量方向是指向还是远离我们（尽管对少部分星系能通过其它途径知道，但这样的样本一般太少，无法进行统计分析）。因此对每个星系，在已知赤道坐标系参数 (α, δ, PA) 及倾角情况下，除了利用上面的公式得到两种还有关于超星系坐标原点对称方向的情况也是可能的解，即对每个星系其角动量矢量方向有四种可能。在统计中，仿照 Kashikawa&Okamura^[12]和 Hu et al.^[13]，一般都把这四种可能看成是相互独立的。

对星系旋转矢量方向分布的统计方法很多，最常用的是以下几种：

I. 付里叶检验法

若理论上等区间样本数应相等,并且如果对均匀分布的偏离是 Θ 的微变函数，那么我们可以用以下模型近似^[2]：

$$N(\Theta_i) = N_0(1 + \Delta_1 \cos 2\Theta_i + \Delta_2 \sin 2\Theta_i)$$

系数 Δ_1 和 Δ_2 的估计（ n 是区间数）：

$$\Delta_1 = \frac{2 \sum N(\Theta_i) \cos 2\Theta_i}{nN_0}$$

$$\Delta_2 = \frac{2 \sum N(\Theta_i) \sin 2\Theta_i}{nN_0}$$

Δ_1 和 Δ_2 的标准偏差是

$$\sigma(\Delta) = \left(\frac{n}{2} N_0\right)^{-1/2}$$

Δ_1 和 Δ_2 的概率分布接近于高斯分布, $\Delta = (\Delta_1^2 + \Delta_2^2)^{1/2}$ 超过某一给定值的概率是

$$P(> \Delta) = e^{(-nN_0\Delta^2/4)}$$

若理论上等区间样本数应不等, 并且如果对理论分布的偏离是 Θ 的微变函数, 那么我们可以用以下模型近似^[23] .:

$$N(\Theta_i) = N_0(1 + \Delta_{11} \cos 2\theta_i + \Delta_{21} \sin 2\theta_i + \Delta_{12} \cos 4\theta_i + \Delta_{22} \sin 4\theta_i)$$

$$\Delta_{11} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i - N_{0i}) \cos 2\Theta_i}{\sum_{i=1}^n N_{0i} \cos^2 2\Theta_i} \quad \text{其中} \quad \sum_{i=1}^n N_{0i} \cos^2 2\Theta_i \approx \frac{n}{2} N_0$$

$$\Delta_{21} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i - N_{0i}) \sin 2\Theta_i}{\sum_{i=1}^n N_{0i} \sin^2 2\Theta_i} \quad \text{其中} \quad \sum_{i=1}^n N_{0i} \sin^2 2\Theta_i \approx \frac{n}{2} N_0$$

$$\sigma(\Delta_{11}) = \left(\sum_{i=1}^n N_{0i} \cos^2 2\Theta_i\right)^{-1/2}$$

$$\sigma(\Delta_{21}) = \left(\sum_{i=1}^n N_{0i} \sin^2 2\Theta_i\right)^{-1/2}$$

由于 $\sigma(\Delta_{11}) \approx \sigma(\Delta_{21}) \approx [(n/2)N_0]^{-1/2}$, $\Delta_j = (\Delta_{1j}^2 + \Delta_{2j}^2)^{1/2}$ 超过某一给定值的概率是

$$P(> \Delta_j) = e^{\left(\frac{-nN_0\Delta_j^2}{4}\right)}, \quad \Delta_j \text{ 的标准偏差是}$$

$$\sigma(\Delta) = \left(\frac{n}{2} N_0\right)^{-1/2}$$

II. 相关系数

若理论上等区间样本数应相等, 则 N_0 理论上预期的每区间样本数^[2]

$$C = \sum_{i=1}^n (N_i - N_0)(N_{i+1} - N_0) / N_0$$

(其中 $N_{n+1} = N_1$)

$$\sigma(C) \cong n^{\frac{1}{2}}$$

显然, 若方向是随机均匀的, 则 C 的期望值是 0, 对随机均匀分布, C 的概率分布接近于高斯分布。

若理论上等区间样本数并不等, 则 N_k 理论上预期的第 i 区间样本数 N_{0i} , 则^[23]

$$C = \sum_{i=1}^n (N_i - N_{0i})(N_{i+1} - N_{0i+1}) / (N_{0i} N_{0i+1})^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma(C) \cong n^{\frac{1}{2}}$$

其中 $N_{n+1} = N_1$, $N_{0n+1} = N_{01}$

III. χ^2 检验法

$$\chi^2_{\nu} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_{ei} - N_{oi})^2 / N_{ei}$$

$$P(> \chi^2_{\nu}) = [2^{\frac{\nu}{2}} \Gamma(\frac{\nu}{2})]^{-1} \int_0^{\chi^2} e^{-\frac{t}{2}} t^{\frac{\nu}{2}-1} dt$$

n 是样本被分成的区间数, N_{ei} 是第 i 个区间角动量矢量空间上各向同性分布应有的星系数, N_{oi} 是第 i 个区间实际符合条件的星系数, $\nu = n-1$ 是自由度。当 χ^2_{ν} 越小, $P(> \chi^2_{\nu})$ 越大, 样本星系角动量矢量方向分布越接近于各向同性分布。 $P(> \chi^2_{\nu})$ 给出了样本星系角动量矢量方向分布对各向同性分布的符合程度。 χ^2 检验法的缺点是要对样本进行分区, 这样在每个区间内的数据信息就被均化了, 因此不同的分区可能导致 χ^2 检验法得到不同的结果。

IV. Kolmogorow-Smirnov (K-S) 检验法

观察样本 $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 的累积分布函数是 $S_n(x)$, 理论分布函数是 $P(x)$ (所谓零假设)。我们可以得到统计量 $d (= \text{MAX}\{|S_n(x) - P(x)|\})$, 超过 d 的概率是 $P\{D > d\} = 1 - L(\sqrt{nd})$, 其中 $L(x) = 1 - 2 \sum_{j=1}^{\infty} (-1)^{j-1} e^{-2j^2 x^2}$ 。可见 d 越小, 对应 $P\{D > d\}$ 越大, 相应观测样本的累积分布函数 $S_n(x)$ 和理论累积分布函数 $P(x)$ 符合的越好。我们把 $P\{D > d\}$ 看作是观测和理论符合程度的概率。(K-S) 检验法也可用来检验两种样本是否服从同样的分布。(K-S) 检验法的好处是无需对样本

数据进行分区，在这点上可弥补 χ^2 检验法的不足。

本文主要采用后两种： χ^2 检验法和(K-S)检验法。我们的主要工作如下：

1. 盘星系的内禀扁度对计算星系的空间倾角非常重要。我们从 LEDA 数据库中选取了 14,988 颗盘星系进行了内禀扁度的统计分析。研究表明，盘星系的内禀扁度与星系的形态密切相关。整体上说，透镜星系和不规则星系的内禀扁度 q_0 大于旋涡星系，早型旋涡星系的内禀扁度 q_0 大于晚型旋涡星系，其中 Scd 星系的内禀扁度 q_0 最小。利用所得的 $q_0 - T$ 关系，我们还对 16 颗已知倾角的亮星系进行了倾角计算，发现与其他方法估计的空间倾角符合得较好。

2. I. 利用 P.FouQUE(1990)所得带有倾角数据的完备的 Virgo 团旋涡星系样本，对 Virgo 团旋涡星系角动量分布进行统计得到如下结论：(1) Virgo 团旋涡星系角动量方向与盘面之间的夹角分布是非各向同性分布的。Virgo 团旋涡星系角动量方向倾向于平行和垂直于超星系盘面两个方向。(2) 早期类型星系和晚期类型星系有不同的旋转矢量方向分布。暗示星系角动量方向跟星系类型有关，不同的星系类型可能有不同的大尺度起源。(3) Virgo 团旋涡星系角动量方向倾向于指向 Virgo 团中心。(4) 在统计星系角动量方向分布时，内禀扁度 q_0 取 0.2 并不影响最终结论。

II. 利用所得的 $q_0 - T$ 关系，对 A CATALOGUE OF THE VIRGO DISK GALAXIES (Q.R. Yuan 1996) 中的数据进行处理，得到如下结论：(1) Virgo 团中盘星系旋涡矢量方向倾向于平行于团平面。(2) Virgo 团中盘星系旋涡矢量方向在团平面上的投影倾向于指向与 Virgo 团中心方向成 45° 角的方向。(3) 星系旋涡矢量方向分布是与星系类型指数是相关的，可能星系旋涡矢量方向分布随星系类型指数增大存在连续的序列。(4) Virgo 团中盘星系旋涡矢量方向分布是非各向同性的，这无论从其 θ 角分布、 ϕ 角分布的 χ^2 检验结果还是图形分析中，还是旋涡矢量方向的面积分布都可以看出。

3. 从北天亮星系星表严格挑选了 220 个场星系作为样本，我们运用 Kolmogorow-Smirnov (K-S) 检验法得出这些场星系旋转矢量分布是非各向同性的并且分布跟形状是有关。这显示不同形状的星系可能有不同的大尺度起源。与

χ^2 测试比较, K-S 测试是一种无偏测试法。我们也考虑了星系内在扁度的影响, 扁度 0.2 的微小变化不影响我们的结论

[参考文献]

1. Shandarin, S. F., 1974. *Astr. Zh.*, 51, 667(English translation, 1974. *Soviet Astr.*, 18, 392).
2. Hawley, D. L. & Peebles, P. J. E., 1975. *Astr. J.*, 80, 477.
3. Nilson P., 1974, *Uppsala Astron. Obs.*, Rep. No. 3
4. Thompson L. A., 1976, *ApJ* 209, 22
5. Farouki R., Shapiro S.L., 1981, *ApJ* 243, 32
6. Bond J. R., Kofman L., Pogosyan D., 1996, *Nat.*, 380, 603
7. Sathyaprakash B. S., Sahni V., Shandarin S. F., 1996, *ApJ*, 462, L5
8. Yess C., Shandarin S. F., 1996, *ApJ*, 465, 2
9. Martel H., Shapiro P. R., 1999a, astro-ph/9903425
10. Martel H., Shapiro P. R., 1999b, astro-ph/9904121
11. Djorgovski, S.:1987, In: *Nearly Normal Galaxies*, ed. Faber, S.M., Springer-Verlag, New York, p. 227
12. Kashikawa N., Okamura S., 1992, *PASJ* 44, 493(KO)
13. Hu F.X., Wu G.X., Su H.J., Liu Y.Z., 1995, *A&A* 302, 45(HWSLL)
14. Doroshkevich, A. G. 1973, *Astrophys. Letters*, 14, 11
15. Doroshkevich, A. G., and Shandarin, S. F. 1978, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 184, 643.
16. Ostriker, J. P., and Cowie, L. L. 1981, *Astrophys. J. Letters*, 243, L127.
17. Ikeuchi, S. 1981, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 33, 211.
18. Peebles, P. J. E., 1969, *Astrophys. J.*, 155, 393.
19. Ozeynoy, L. M. 1978, in *The Large Scale Structure of the Universe*, IAU Symp. No. 79, ed. M. S. Longair and J. Einsato (D. Reidel Publishing

Company, Dordrecht), p. 427

20. Flin P., & Godlowski, W.1986, MNRAS, 222, 525(FG).
21. Tammann G. A., Sandage A., 1976, ApJ, 207, L1
22. Holmberg, E. 1946, Medd.Lunds.Astron.Obs., Ser. 6, No. 117.
23. Włodzimierz Godlowski., 1993, Astron. Soc. 265, 874

第二章. 盘星系的内禀扁度

2.1 引言

众所周知, 当人们研究旋涡星系的绝对星等与其 HI 线宽的关系 (即 Tully-Fisher 关系^[1]) 时, 观测所得的 HI 线宽 W_{obs} 先必须进行倾角改正, 即真实的 HI 线宽 W 等于 $W_{\text{obs}}/\cos i$, 其中 i 是星系的倾角, 也就是视线方向与星系盘面的夹角。另外, 在研究盘星系旋转矢量分布时, 星系的倾角 i 也是最基本的观测参数之一^[2,3]。对一个盘星系而言, 若设想其形状为扁平的旋转椭球, 倾角 i 可用 Hubble^[4]公式 $\cos^2 i = (1 - q^2)/(1 - q_0^2)$ 来计算, 其中 $q = b/a$ 是星系短半轴与长半轴之比 (即轴率) 的观测值, 而 $q_0 = b_0/a_0$ 是星系轴率的真实值, 相当于星系盘的厚度与盘直径之比, 可以用 q_0 来表示盘星系的内禀扁度。当 q_0 越小, 则星系本质上越扁。由此可见, 盘星系的内禀扁度 q_0 将直接影响星系空间倾角的确定, 对研究盘星系大样本的观测性质非常重要。

有很多人对盘星系的内禀扁度 q_0 进行过研究。早在 1946 年 Holmberg^[5]就得出 $q_0 = 0.2$, 后来 Heidmann 等^[6]和 Bottinelli 等^[7]认为 q_0 跟星系的形态类型有关, 并且分别根据 RC1 和 RC2 亮星系表的分类方法^[8,9], 从各类形态的盘星系中找到出最大的轴率比 $R_{\text{max}} = a/b$ (即最扁星系的轴率), 认为该类型的盘星系的内禀扁度 q_0 就是 $1/R_{\text{max}}$, 从而粗略地给出了 q_0 与星系形态指数 T 之间的关系:

$$\log(q_0) = -0.60 - 0.045T (T \leq 7) \quad , \quad \log(q_0) = -0.65 (T > 7)。$$

Sandage 等^[10] 首先假设 q_0 本质上满足高斯分布, 利用 RC1 星表中亮的旋涡星系和透镜星系大样本, 确定出盘星系内禀扁度的中心值 \bar{q}_0 为 0.25, 分布弥散值 σ 为 0.06。利用这种 q_0 分布预言的星系轴率分布对透镜星系拟合得较好, 但对旋涡星系的拟合结果不令人满意。随后 Van de Bergh^[11]也得到了类似结论。Noerdlinger^[12]利用 Lucy 迭代法, 发现未进行 edge-on 星系内部吸收纠正的结果与 $q_0 = 0.25$ 或 $q_0 = 0.2$ 的内禀扁度分布不符, 并指出这可能是星系核球部分突起的缘故, 最后他得出经吸收改正后的透镜星系符合 $q_0 = 0.2$ 的内禀扁度分布。Guthrie^[13]对 edge-on 旋涡星系的内禀扁度进行了研究, 他从 Uppsala General Catalogue 中挑选出 262 个 edge-on 旋涡星系, 对部分盘星系的核球突起进行了

改正后，得出旋涡星系的内禀扁度约为 $q_0 = 0.11$ 。

Mazan^[14]指出，盘星系内禀扁度的均值 \bar{q}_0 与星系形态有关，而且对于形态相同的盘星系，其内禀扁度的弥散不能忽略。我们假设 q_0 呈高斯分布，不同形态的盘星系应该具有不同的内禀扁度 q_0 分布，即不同形态的盘星系的内禀扁度中心值和弥散度也会不同，并得出了不同形态的盘星系内禀扁度均值 \bar{q}_0 与星系类型的关系：

$$\log(q_0) = -0.43 - 0.053T (-5 \leq T \leq 7), \quad \log(q_0) = -0.38 (T \geq 8)。$$

本文将从 LEDA (Leyon-Meudon Extragalactic Database) 数据库中提取大约 15000 颗盘星系的大样本，在 Sandag 等人^[9]的分析方法的基础上，利用蒙特卡洛方法对各种形态的盘星系（包括透镜星系 S0、旋涡星系 S 和不规则星系 Irr）的内禀扁度分布进行研究。同时，我们还将给出内禀扁度中心值 \bar{q}_0 和星系形态指数 T 之间的关系。

2.2 研究方法

假设盘星系的盘成分呈旋转椭球形，其长短半轴的观测值分别为 a 和 b ，则它的观测轴率 $q = b/a$ 。设盘星系的内禀扁度（即轴率的真实值）为 q_0 ，倾角为 i ，则存在如下关系^[4]：

$$\cos^2 i = \frac{1 - q^2}{1 - q_0^2} \quad (2.1)$$

在倾角一定的情况下，观测到的 q 是不依赖于观察者方位的，即 q 与盘星系的空间位置角 (position angle) 无关。因此当内禀扁度为 q_0 的盘星系随机取向时，其观测轴率落在 q 和 $q + dq$ 之间的概率是

$$P(q | q_0) dq = d(\sin i) \quad (2.2)$$

由 (2.1) 和 (2.2) 可得

$$P(q | q_0) = \frac{q}{(1 - q_0^2)^{\frac{1}{2}} (q^2 - q_0^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.3)$$

设内禀扁度 q_0 的分布函数是 $f(q_0)$ ，则观测到轴率是 q 、内禀扁度是 q_0 的盘星系概率密度函数是 $P(q | q_0)f(q_0)$ 。因此，理论上观测到轴率在区间 $[q_1, q_2]$ 的

星系概率是

$$P(q_1, q_2) = \int_{q_1}^{q_2} dq \int_0^q P(q | q_0) f(q_0) dq_0 \quad (2.4)$$

对于数目为 N 的盘星系样本，观测轴率落在 q_1 到 q_2 之间的理论预言星系数应是

$$N(q_1, q_2) = N \cdot P(q_1, q_2) = N \int_{q_1}^{q_2} q dq \int_0^q \frac{f(q_0)}{(1 - q_0^2)^{\frac{1}{2}} (q^2 - q_0^2)^{\frac{1}{2}}} dq_0 \quad (2.5)$$

本文中假设盘星系的内禀扁度 q_0 满足高斯分布，即

$$f(q_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(q_0 - \bar{q}_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.6)$$

为了求出某种形态的盘星系的内禀扁度中心值 \bar{q}_0 和弥散值 σ ，我们选取不同的 (\bar{q}_0, σ) 组合，并计算出其对应的轴率分布的理论值，然后和观测样本的轴率分布进行比较。我们将使用 χ^2 检验法对内禀扁度中心值和弥散进行挑选。具体做法时，把星系样本按观测轴率分成 n 等份，每区间星系计数分别为 $N_{o1}, N_{o2}, \dots, N_{on}$ ，同样可计算出各区间的理论预言星系数 $N_{e1}, N_{e2}, \dots, N_{en}$ ，我们可以统计

$$\chi_\nu^2 = \frac{1}{\nu} \sum_{i=1}^n \frac{(N_{oi} - N_{ei})^2}{N_{ei}}, \quad (2.7)$$

其中 ν 是自由度，有 $\nu = n - 1$ 。 χ_ν^2 取最小值时表明与观测符合得最好，我们将符合最好的一组 (\bar{q}_0, σ) 分别作为该类盘星系的内禀扁度和弥散值。

在公式 (2.5) 中，由于被积函数中存在奇点，而且在奇点附近函数值发散，给直接数值计算带来了一定的困难。为此，我们采用蒙特卡洛方法计算给定的内禀扁度高斯分布所对应的轴率分布的理论值，并在此基础上求出统计量 χ_ν^2 。由于我们假定盘星系空间取向随机分布，由公式 (2.2) 可知星系倾角 i 的概率分布函数 $P(i) = \cos i$ 。具体的做法是，我们用随机数发生器产生出数目为 100000 的盘星系样本，使得该样本的倾角 i 概率分布满足 $\cos i$ ，同时样本的内禀扁度 q_0 的概率密度函数满足中心值为 \bar{q}_0 、弥散值为 σ 的高斯分布。利用公式 (2.1) 可计算出每个星系的轴率观测值 q ，然后对这些 q 值作分区计数，并归一化到实际的观测样本数目 N ，这样可计算出每个轴率区间的理论预言计数 $N_{e1}, N_{e2}, \dots, N_{en}$ 。

我们将这一算法与 Sandage^[9]直接数值积分的结果进行了比较，发现两种方法的最终结果是一致的。由于蒙特卡洛算法回避了积分算法中的奇点问题，不仅比直接数值积分更精确，而且运算速度更快。

2.3 样本及数据分析

我们的样本取自 LEDA 数据库。我们的选择判据如下：(1) $-3 \leq T \leq 10$ ，其中 T 为星系的形态指数^[8]；(2) $|l| > 20^\circ$ ， l 为银纬；(3) $\log d_{25} > 1.0$ ，即星系视直径大于 1 arcmin。盘星系样本总数达 14993，扣除掉 5 颗无轴率数据的星系，样本中共含有 14988 颗盘星系，其中包含 11487 颗旋涡星系 ($1 < T < 9$)，占 76.6%。为研究不同形态的盘星系的内禀扁度分布特征，我们按星系形态指数 T 分成 14 个子样本，各子样本的星系数目见图 2.1。每个子样本含有足够多的星系，已符合 χ^2 检验的要求。

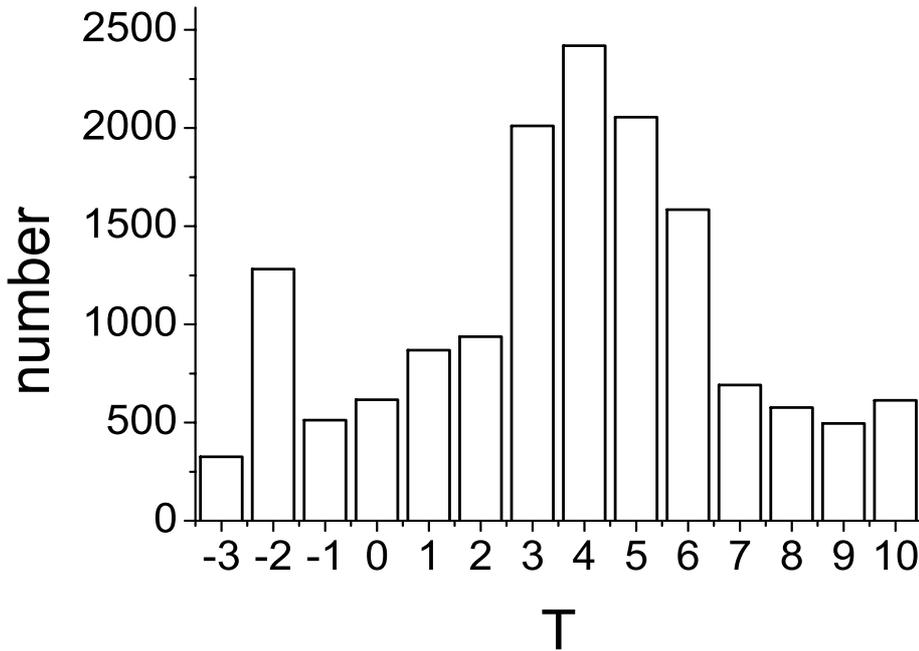


图 2.1 各种形态的盘星系数目分布图

为了确定每个子样本中的盘星系的内禀扁度中心值 \bar{q}_0 和弥散值 σ ，我们在区间 $[0.05, 0.50]$ 内取不同的 (\bar{q}_0, σ) 组合，搜索步长为 0.01，并用蒙特卡洛方法计算出每种 (\bar{q}_0, σ) 组合所对应的轴率分布的理论值，然后与该子样本的轴率分布进

行比较, 计算出这种 (\bar{q}_0, σ) 组合所对应 χ^2_ν 值。最后, 我们挑选出 χ^2_ν 取最小值时的 (\bar{q}_0, σ) 组合作为该子样本的内禀扁度中心值和弥散值。图 2.2 给出了对第 5 个子样本 Sa 进行拟合时, χ^2_ν 在参数空间 (\bar{q}_0, σ) 的分布图, 可以看出当 $\bar{q}_0=0.24$, $\sigma=0.07$ 时 χ^2_ν 取最小值。图 2.3 是该子样本的 χ^2_ν 最小时对应的 q_0 分布, 图 2.4 是此样本的轴率 q 的实际计数分布, 同时给出了 χ^2_ν 取最小值时的理论预言分布曲线。

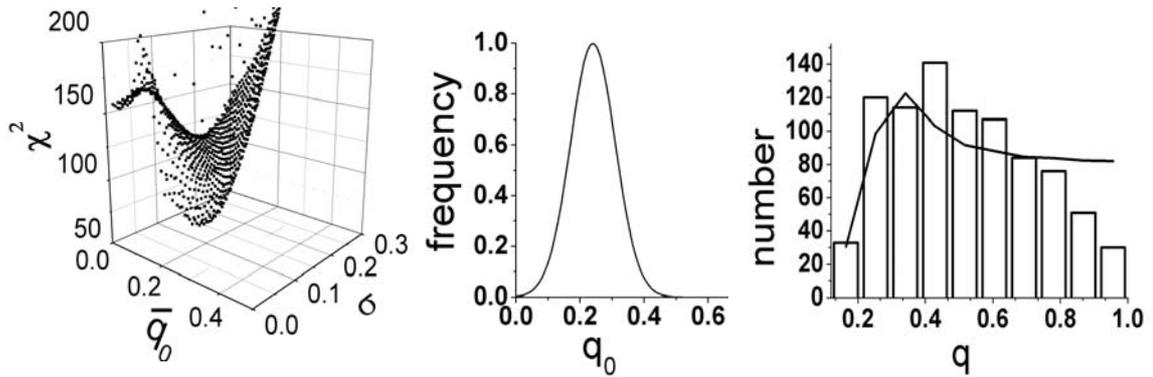


图 2.2 χ^2_ν 对 (\bar{q}_0, σ) 分布图 图 2.3 χ^2_ν 最小时 q_0 分布 图 2.4 q 分布的理论预言和实测比较

表 2.1 是对每个子样本的观测轴率分布得到的拟合结果, 其中第 6 列的分区数是为确保每个区间的星系数不少于 5 个而确定的。可以看出, 透镜星系 S0 ($-3 \leq T \leq 0.4$) 和不规则星系 Irr ($T \geq 9.5$) 具有较大的 \bar{q}_0 , 而且其弥散值也较大。与此相反, 旋涡星系 Sa-d ($0.5 \leq T \leq 8.4$) 的内禀扁度具有较小的 \bar{q}_0 , 而且其弥散值 σ 也较小。另外, 旋涡星系 Sm ($8.5 \leq T \leq 9.4$) 在形态上介于旋涡星系和不规则星系之间, 也具有较大的 \bar{q}_0 和 σ 值。图 2.5 给出了 $\log \bar{q}_0$ 对 T 的关系图, 可以看出, \bar{q}_0 随 T 的变化趋势可以分成两段: (1) 对于 $-3 \leq T \leq 7$ 的透镜星系和旋涡星系而言, \bar{q}_0 随着 T 的增大而减小, 即随着透镜星系向旋涡星系过渡, 其星系盘越来越扁, Scd 星系 ($T=7$) 的 \bar{q}_0 取最低值 0.09。(2) 对 $T \geq 7$ 的星系, 星系盘随 T 的增加而变厚。为此, 我们对 $\log \bar{q}_0 - T$ 关系进行了分段线性拟合 (见图中实线), 得出

$$\log(\bar{q}_0) = (-0.580 \pm 0.016) + (-0.067 \pm 0.004)T \quad (-3 \leq T \leq 7)$$

$$\log(\bar{q}_0) = -2.309 \pm 0.347 + (0.185 \pm 0.040)T \quad (T > 7)$$

为了便于比较, 我们在图 2.5 中用虚线给出了 Bottinelli^[7]及 Mazan^[14]的结果。

对形态相同的盘星系，Mazan 得到的 \bar{q}_0 比我们的要大一些，而 Bottinelli 得到的透镜星系 ($T < 1$) 的 \bar{q}_0 比我们的结果小一些，而他们给出的线性拟合和我们的第 5-8 个子样本（即 Sa-Sbc）的内禀扁度 \bar{q}_0 吻合得非常好，但与我们的晚期旋涡星系 (Sc-Scd) 子样本的估计值差别较大。对于形态不规则的盘星系 ($T > 7$)，Mazan 和 Bottinelli 都认为内禀扁度 \bar{q}_0 可粗略地取某一定值。而我们的计算结果表明，Sm 和 Irr 星系的 \bar{q}_0 近似相等 (≈ 0.3)，刚好介于他们的两种结果中间。而 Bottinelli 的结果恰近似于我们三个 $T > 7$ 的子样本的 \bar{q}_0 的平均值。

表 2.1 盘星系子样本的最佳 q_0 分布及其 χ^2 检验结果

子样本 编号	星系形态	T 范围	星系数	计算 χ^2_v 时 q 的取值范围	计算 χ^2_v 时 的分区数 n	χ^2_v 的 最小值	\bar{q}_0	σ
1	E-S0	[-3.0,-2.4]	326	[0.2,1.0]	6	19.82	0.48	0.13
2	S0	[-2.5,-1.6]	1281	[0.08,1.0]	9	79.34	0.34	0.16
3	S0	[-1.5,-0.6]	512	[0.1,1.0]	9	55.93	0.27	0.10
4	S0a	[-0.5,0.4]	616	[0.16,1.0]	10	62.11	0.23	0.05
5	Sa	[0.5,1.4]	868	[0.12,1.0]	10	73.5	0.24	0.07
6	Sab	[1.5,2.4]	937	[0.06,1.0]	9	145.3	0.20	0.04
7	Sb	[2.5,3.4]	2011	[0.08,1.0]	10	281.89	0.18	0.04
8	Sbc	[3.5,4.4]	2420	[0.0,1.0]	10	553.98	0.16	0.04
9	S?	[4.5,5.4]	2056	[0.0,1.0]	10	190.36	0.11	0.01
10	Sc	[5.5,6.4]	1584	[0.0,1.0]	10	765.86	0.10	0.01
11	Scd	[6.5,7.4]	692	[0.0,1.0]	10	83.76	0.09	0.01
12	Sd	[7.5,8.4]	577	[0.0,1.0]	10	39.04	0.15	0.09
13	Sm	[8.5,9.4]	495	[0.05,1.0]	8	18.66	0.29	0.16
14	Irr	[9.5,10]	613	[0.0,1.0]	10	29.09	0.3	0.16

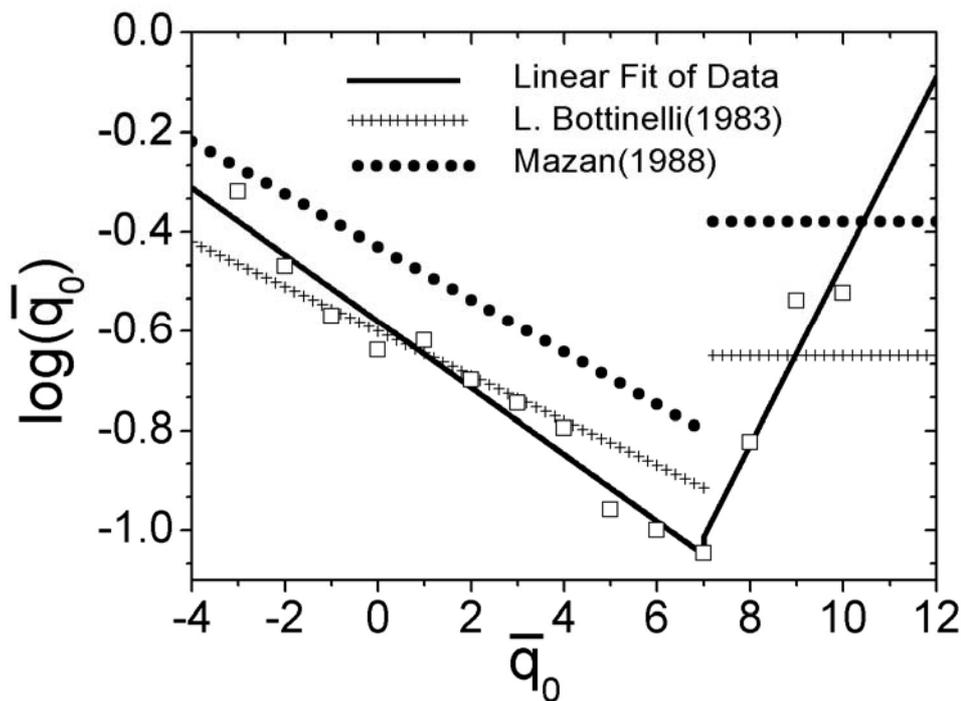


图 2.5 盘星系的内禀扁度 $\log \bar{q}_0$ 随形态指数 T 的变化曲线

我们可以利用文[7]的表 2.1 中所列的 16 颗星系的倾角观测数据（具有异常球状突起的 Sa 星系 NGC4594 被除去），对本文中得到的 \bar{q}_0 — T 关系式的正确性进行检验。这些星系的倾角除了 NGC6503 和 NGC7793 是用速度场方法^[15]测量的以外，其它 14 颗是通过恒星计数、旋臂图样分析、H I 等亮度图等多种方法得到的，并被看作是空间倾角标准。基于我们给出的 \bar{q}_0 — T 关系式，用这些星系的形态指数 T 可得到它们的内禀扁度 q_0 ，再用公式（1）计算它们的倾角。由于原表中星系形态 T 都是整值，不太精确，我们从 LEDA 数据库中重新查出的 T 取代，星系轴率 q 的观测值也来自 LEDA 数据库。检验结果见表 2，其中 i_s 是标准倾角， i_r 是我们通过得到的公式计算出的倾角。可以看出两组空间倾角之间的差别并不大，平均值为 $\langle i_r - i_s \rangle = 1.48 \pm 1.17$ 度，标准方差为 $\sigma(R,S) = 4.67$ 度。假设两种倾角的精度相同，则利用我们的 \bar{q}_0 — T 关系估计倾角的精度约为 3.3 度，这说明上面的 \bar{q}_0 — T 关系还是可信的。同时 LEDA 数据库中本身也提供了每个星系的倾角，图 2.6 给出了总样本用我们得出的公式所算得的倾角和 LEDA 数据库中提供的倾角对比图，横轴代表用我们得出的公式所算得

表 2.2 对 16 颗已知倾角的星系的统计检验

星系	T	$-\log(q)$	$i_S(^{\circ})$	$i_R(^{\circ})$	$i_R - i_S(^{\circ})$
LMC	9.1	0.07	63	57.3	-5.7
SMC	8.9	0.19	30	38.5	8.5
NGC224	3.0	0.48	13	16.9	3.9
NGC300	6.9	0.17	42	42.3	0.3
NGC598	6.0	0.22	35.5	36.6	1.1
NGC2841	3.0	0.32	25	27.1	2.1
NGC3031	2.4	0.29	30	29.2	-0.8
NGC3556	6.0	0.47	8	18.9	10.9
NGC4244	6.1	0.79	2	7.3	5.3
NGC5746	3.0	0.76	5	3.1	-1.9
NGC5907	5.4	0.93	3	1.6	-1.4
NGC6503	5.9	0.44	22.7	20.4	-2.3
NGC7331	3.9	0.39	15	22.7	7.7
NGC7640	5.3	0.71	12	9.1	-2.9
NGC7741	6.0	0.17	45	42.2	-2.8
NGC7793	7.4	0.2	37	38.7	1.7

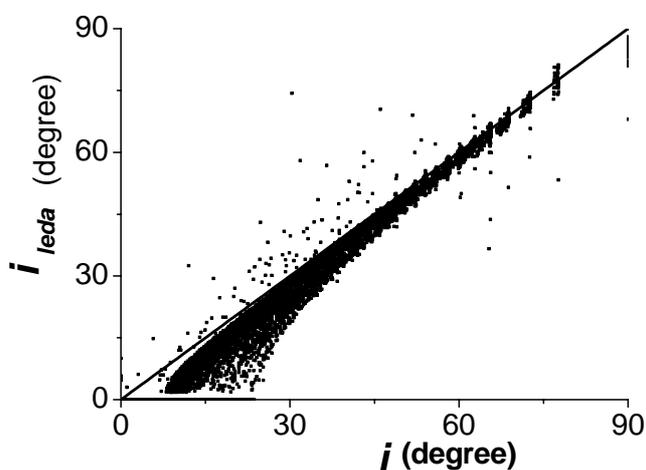


图 2.6

平均误差 20.7%，后者比前者误差稍大正是我们所预料的。我们的 i 值整体上比 LEDA 数据库中提供的倾角 i_{leda} 要大。从图 2.7 可以看出当倾角越小时，我们得到的倾角整体上比 LEDA 数据库中提供的倾角大得越多。从公式 $\cos^2 i = (1 - q^2)/(1 - q_0^2)$ 可以看

的倾角 i ，纵轴代表 LEDA 数据库中提供的倾角 i_{leda} 。实线是斜率为 1 的直线。图 2.7 是总样本 i 对 $i - i_{leda}$ 的分布图，计算表明对我们所选的整个样本（仅指有轴率数据的 14988 个）， $\bar{i} = 26.9^{\circ}$ ， $i - i_{leda}$ 的平均值是 4.125° ，平均误差 15.3%。对 $T \leq 7$ 的（共 13235 个）， $\bar{i} = 26.2^{\circ}$ ， $i - i_{leda}$ 的平均值是 3.764° ，平均误差 14.4%；对 $T \geq 7$ （共 1861 个），

$\bar{i} = 32.0^{\circ}$ ， $i - i_{leda}$ 的平均值是 6.632° ，

出，在 q_0 一定的情况下，轴率 q 越小，对应的倾角 i 越小。因此低倾角对应轴率小的侧向 (edge-on) 星系。我们知道，实际上很多星系有象银河系那样中间鼓起现象。当这样的星系侧向从而倾角很大时，测量时很容易把中间鼓起部分当作测轴率所需的短轴一部分，使测得的轴率比实际要大。因而利用 $\cos^2 i = (1 - q^2)/(1 - q_0^2)$ 算出的倾角比实际要大一些，而且倾角越小，这种误差越大。如果再考虑到这些，我们得到的倾角和 LEDA 数据库中提供的倾角提供的倾角符合的还是很好的，我们所得的 $\bar{q}_0 - T$ 关系是很可靠的。

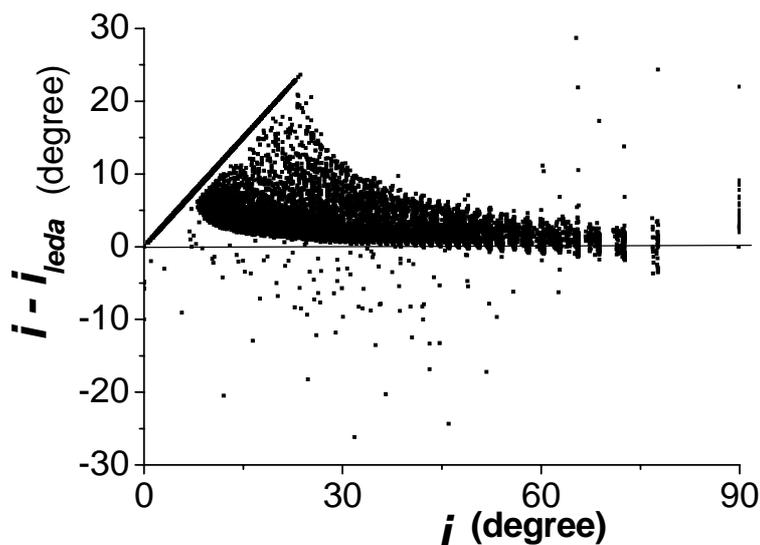


图 2.7

2.4 讨论

我们从最新的 LEDA 数据库中选取了 14,988 颗盘星系进行了内禀扁度研究。如此大的盘星系样本使我们有可能进行详细的形态分层研究。我们发现盘星系的内禀扁度与星系的形态密切相关，不同形态的盘星系具有不同的内禀扁度 q_0 分布，其中透镜星系和不规则星系具有较大的 q_0 ，旋涡星系的 q_0 较小，其中 Scd 星系的内禀扁度 q_0 最小。我们对内禀扁度中心值 \bar{q}_0 和星系形态指数 T 的相关性进行了线性拟合。

我们的分析方法在明显优于 Heidmann 等^[6]和 Bottinelli 等^[7]的寻找最扁的星系轴率的方法，因为具有相同形态的盘星系的内禀扁度 q_0 并不完全相同，而应该在某一定值附近取值，高斯分布能够较好地描述这种分布。Bottinelli 的方法侧重于关注 edge-on 星系的观测扁度，而大量的 edge-on 晚期旋涡星系（如 Scd 星系）有较突出

的核球突起，使星系盘成分的短半轴测量值偏大，致使他们定出的 Sc、Scd 和 Sd 星系的 q_0 值比我们的大（见图 2.5）。对于大部分 edge-on 透镜星系和不规则星系，由于其 q_0 值比晚期旋涡星系大些，核球突起并未影响星系轴率的测量，而 Bottinelli 等人只取最小轴率值作为内禀扁度，所以他们估计的 q_0 值比我们的要小。

Guthrie^[7]对 262 颗 edge-on 旋涡星系的核球突起进行了改正后，使用最大或然法得出旋涡星系的 $\log q_0$ 中心值和弥散值分别为 -0.95 和 0.12 ，相当于 $q_0 = 0.11 \pm 0.03$ 。我们发现其研究样本中晚期旋涡星系 ($4 \leq T \leq 7$) 居多，占了 71%，这些星系已经被包含在第 8-11 四个子样本中（见表 2.1），而这四个子样本的 $\overline{q_0}$ 的加权平均值正好与他们的结果相符。

我们注意到，每个子样本的观测轴率分布中 $q > 0.8$ 的 face-on 星系明显比理论计数少，部分原因可归结为样本的选择效应。本文所用的样本来自不断更新的 LEDA 数据库，所有盘星系的角直径都大于 1.0 arcmin ，此样本包含 edge-on 旋涡星系的概率比 face-on 的星系要大些，因为 edge-on 旋涡星系在长轴方向存在增亮效应，即对同一个盘星系而言，从盘边缘的方向更能反映出其真实大小。这种选择效应对透镜星系和不规则星系子样本中不太明显，但对扁平的晚期旋涡星系样本就更显著些。另外，样本包含的星系绝大部分是邻近的亮星系，所以本文给出的 $\overline{q_0} - T$ 关系不能代表高红移盘星系的内禀扁度性质。

[References]

- [1] Tully R.B., Fisher J.R. 1977, A&A 54, 661 (TF)
- [2] Flin, P., & Godlowski, W. 1986, MNRAS, 222, 525
- [3] Yuan, Q.R., Hu, F.X., Su, H.J., et al. 1997, AJ,
- [4] Hubble, E. 1926, ApJ, 64, 321
- [5] Holmberg, E. 1946, Medd. Lunds. Astron. Obs., Ser. 6, No. 117
- [6] Heidmann J., Heidmann N., de Vaucouleurs G. 1972, Mem. R. Astron. Soc. 75, 85
- [7] Bottinelli L., Gouguenheim L., Paturel G., de Vaucouleurs G. 1983, A&A 118, 4
- [8] de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A. 1964, Reference Catalogue of Bright Galaxies, Univ. Texas, Austin (RC1)

- [9] de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Corwin H.G. 1976, Second Reference
Catalogue of Bright Galaxies, Univ. Texas, Austin (RC2)
- [10] Sandage A., Freeman K.C., Stoks N.R. 1970, ApJ 160, 831
- [11] Van den Bergh S. 1977, Observatory 97, 81
- [12] Peter D. Noerdlinger, 1979, AJ 234, 802
- [13] Guthrie, B. N. G., 1992, A&AS 93, 255
- [14] Mazan, J. 1988, Rapport de stage de stage D.E.A., University of Paris VII.
- [15] Davoust & de Vaucouleurs, 1980

第三章. Virgo 团中盘星系旋转矢量方向分布

3.1 引言

超星系团成员星系的角动量分布研究对了解星系以及宇宙大尺度结构形成及演化具有重要意义。由于本超星系团最近,观测资料最丰富,研究者也最多。最近的研究如 Kashikawa&Okamura^[1],Hu et al^[2].(以下简称 HWSL)等。这些研究在统计星系的旋转矢量分布时,都既考虑了星系位置角 PA 也考虑了轴率 b/a ^[3]。在计算倾角 i (观测星系的视线与星系盘面法线之间的夹角)的时候,都是利用 Holmberg^[4]公式: $\cos^2 i = (q^2 - q_0^2)/(1 - q_0^2)$, 其中 $q = b/a$ 是星系轴率, q_0 是星系的内禀扁度, 并且取 $q_0 = 0.2$ 。但 Mazon^[5]研究认为星系内禀扁度 q_0 是与星系类型有关的, 其弥散不能忽略。

由于一般把 Virgo 团看作在本超星系团中心, 为此, 本文挑选了两个不同的 Virgo 团中星系样本, 统计 Virgo 团成员星系旋转矢量分布情况, 并和以前的相关结论进行对比。第一个星系样本是关于 Virgo 团旋涡星系的, 样本提供了 Virgo 团每个旋涡星系的倾角, 这也就一定程度上避免了用 Holmberg^[4]公式通过 q_0 得到倾角因 q_0 的不确定性可能带来的对结果的影响; 第二个星系样本中数据是关于整个 Virgo 团的, 每个星系倾角没有直接提供, 本文不是按通常的取法取 $q_0 = 0.2$, 而是根据前面第二章我们得到的 $q_0 - T$ 关系得到每个星系的 q_0 , 进而由 Holmberg^[4]公式得到每个星系的倾角。因此本文分成以下两部分。

3.2 Virgo 团中旋涡星系旋转矢量方向分布

3.2.1 样本数据

第一个样本数据取自 P.FouQUE^[6]表 2, 共有 178 个星系, 被称作完备的 Virgo 团旋涡星系星表 ($B_i^c \leq 16^m$), 每个星系的倾角数据都提供了。星表中每个星系的倾角是取不同方法计算的星系倾角的均值 (最多五种)。其中一种是利用 Holmberg^[4]公式: $\cos^2 i = (q^2 - q_0^2)/(1 - q_0^2)$, 并取

$$-\log q_0 = 0.43 + 0.053T \quad (-5 \leq T \leq 7)$$

$$-\log q_0 = 0.38 \quad (T \geq 8)$$

对 peculiar 和 amorphous 星系，取 $q_0 = 0.3$ ，计算得出。其余四种由 Grosbol^[7], Pierce and Tully^[8], Warmels^[9] and Guhathakurta et al.^[10]和 Danver^[11]用其它方法分别得出。

P.FouQUE 表 2 中未提供星系的位置角 PA，我们从三个来源得到。由于 LEDA 数据库容量大，且不断更新，我们认为它的数据较可靠。因此我们首先从 LEDA 数据库查得样本中星系的位置角 PA 数据。但仍有 22 个星系无相应的位置角 PA 数据，我们又从 A CATALOGUE OF THE VIRGO DISK GALAXIES^[12]查得 11 个样本星系，有 10 个 PA 数据，1 个无 PA 数据。最后我们从 The Catalogue of 310 Disk Galaxies in the Virgo Area^[13]查得 8 个，有两个有 PA 数据。这样我们从原样本中最终得到了 168 个有相应 PA 值的星系。为了与取 $q_0 = 0.2$ 得到的结果进行比较，我们也从 LEDA 数据库中获得了每个星系相应的轴率值。

图 3.1 是星系的轴率分布图，图 3.2 是星系的赤道坐标系的位置角分布图，图 3.3 横坐标代表样本中星系的倾角，纵坐标代表星系按 $q_0 = 0.2$ 所得的倾角，其中直线是经过原点的斜率是 1 的直线，图 3.4 是样本星系的按星系类型指数分布图。由于当 q 接近于 1 时，观测到的星系接近于圆形，这给星系盘面长轴的判断带来了很大困难，因此这时测的位置角误差较大。从图 3.1 可以看出，轴率 q 接近于 1 的并不多，因此，并不会对我们的结果带来大的影响。从图 3.3 可以看出，所有的点都在直线附近，这说明我们样本中的倾角与用 $q_0 = 0.2$ 计算得到的倾角一致性很好。

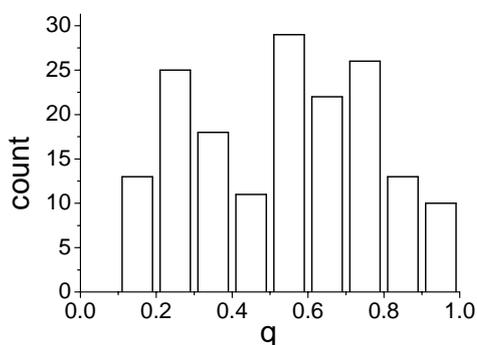


图 3.1

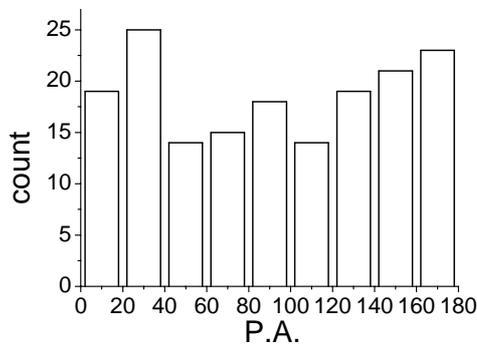


图 3.2

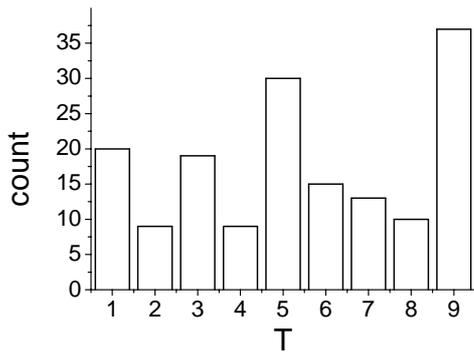


图 3.3

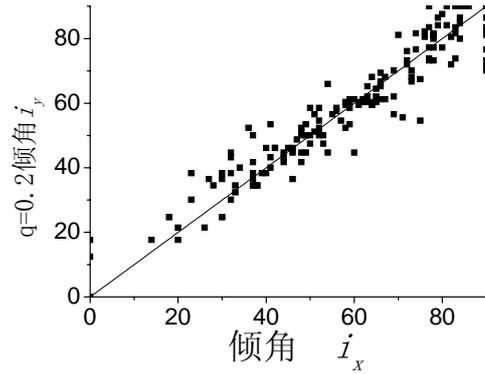


图 3.4

我们把这 168 个星系分成三个样本：包含所有星系的总样本(all),早期旋涡星系 Sa-b (星系类型指数 $1 \leq T \leq 4$), 晚期旋涡星系 Sc-m (星系类型指数 $5 \leq T \leq 9$)。

我们用两种方法对结果进行了统计, 即 Kolmogorow-Smirnov (K-S)^[14] 检验法和 χ^2 检验法。

3.2.2 统计结果

在应用 χ^2 检验时, 我们把样本按 θ 分成 9 份, 每个区间 10° , 自由度是 8。按 ϕ 分成 18 份, 每个区间 10° , 自由度是 17。对样本星系旋转矢量在整个空间的球面分布的统计, 我们把整个空间一半 (另一半是它的镜像) 分成 36 个立体角区间, 每个区间 $30^\circ \times 30^\circ$, 自由度是 35。

表 3.1 和表 3.2 分别是各样本 χ_v^2 检验和 (K-S) 检验结果, 表 3.3 是利用 K-S 检验法检验早期旋涡星系和晚期旋涡星系是否服从同样分布的结果。表 3.4-3.6 是相应于表 3.1-3.3 的利用 $q_0 = 0.2$ 计算倾角所得的结果。

从表 1 可以看出利用 χ_v^2 检验, 对总样本及各子样本 θ 分布 $P(> \chi_v^2)$ 都小于临界值 0.05。从表 3.2 可以看出利用 K-S 检验对总样本及早期旋涡星系 θ 分布 $P(D > d) < 0.05$, 因此我们可以得出 virgo 团旋涡星系旋转矢量方向 θ 分布是非各向同性分布的。对 ϕ 分布无论利用 χ_v^2 检验还是利用 K-S 检验我们都无法判断, 尤其对总样本和早期类型星系 $P(> \chi_v^2)$ 和 $P(D > d)$ 都接近于 1, 这说明总样本和

早期类型星系的 ϕ 分布趋向于各向同性分布。从表 3.1 和表 3.2 还可看出无论是 θ 分布还是 ϕ 分布得到的 P 值对早期类型星系和晚期类型星系有明显的不同, 这暗示早期类型星系和晚期类型星系可能服从不同的分布。为此我们利用 K-S 检验法对早期旋涡星系及晚期旋涡星系进行了检验, 其结果见表 3.3。从表 3.3 可以看出对早期旋涡星系和晚期旋涡星系 θ 分布倾向于满足不同的分布, 对此我们有 $1 - P = 1 - 0.0625 = 93.75\%$ 把握, 对 ϕ 分布我们无法判断。从表 3.1 星系旋涡矢量方向的面积分布可以看出, 对各样本我们都有 90% 以上的把握认为它们的旋涡矢量方向的面积分布是非各向同性的, 实际上这一结果主要是相应的 θ 分布倾向于非各向同性分布造成的。

从表 3.4-3.6 利用 $q_0 = 0.2$ 计算倾角所得的结果来看, 和我们上面的结论是一致的。事实上, 这正反映了我们前面图 3.3 所得的两种方法倾角一致性。

表格 3.1 θ, ϕ 及面积分布的 χ_v^2 检验

样本	星系数	θ		ϕ		Area	
		χ_v^2	$P(> \chi_v^2)$	χ_v^2	$P(> \chi_v^2)$	χ_v^2	$P(> \chi_v^2)$
all	168	3.3377	0.0008	0.5231	0.9436	1.3220	0.0964
Sa-b	57	3.0607	0.0019	0.3529	0.9932	1.3990	0.0588
Sc-m	105	2.3871	0.0143	0.9479	0.5157	1.5359	0.0222

表格 2.2 θ, ϕ 及面积分布的 K-S 检验

样本	星系数	θ		ϕ	
		D	$P(D > d)$	D	$P(D > d)$
all	168	0.0980	0.0032	0.0299	0.9255
Sa-b	57	0.1965	0.0003	0.0489	0.9484
Sc-m	105	0.0656	0.3273	0.0533	0.5891

表格 3.3 早期旋涡星系和晚期旋涡星系是否服从同样分布的 K-S 检验

Sab	Scm	θ		ϕ	
		D	$P(D > d)$	D	$P(D > d)$

57	105	0.1531	0.0625	0.0840	0.6749
----	-----	--------	--------	--------	--------

表格 3.4 取 $q_0 = 0.2$ 时, θ , ϕ 及面积分布的 χ_v^2 检验

样本	星系数	θ		ϕ		Area	
		χ_v^2	$P(> \chi_v^2)$	χ_v^2	$P(> \chi_v^2)$	χ_v^2	$P(> \chi_v^2)$
all	168	3.0932	0.0017	1.0399	0.4094	1.5675	0.0175
Sa-b	57	2.0864	0.0335	0.5573	0.9242	1.3849	0.0645
Sc-m	105	2.2105	0.0237	0.9580	0.5037	1.7049	0.0058

表格 3.5 取 $q_0 = 0.2$ 时, θ , ϕ 及面积分布的 K-S 检验

样本	星系数	θ		ϕ	
		D	$P(D > d)$	D	$P(D > d)$
all	168	0.1073	0.0009	0.0428	0.5689
Sa-b	57	0.1932	0.0004	0.0564	0.8615
Sc-m	105	0.0710	0.2406	0.0577	0.4863

表格 3.6 $q_0 = 0.2$, 早期旋涡星系和晚期旋涡星系是否服从同样分布的 K-S 检验

Sab	Scm	θ		ϕ	
		D	$P(D > d)$	D	$P(D > d)$
57	105	0.1564	0.0539	0.0942	0.5279

3.2.3 图形分析

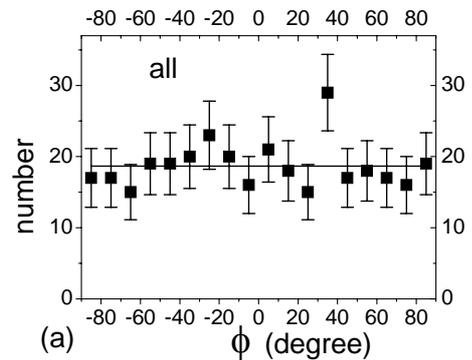
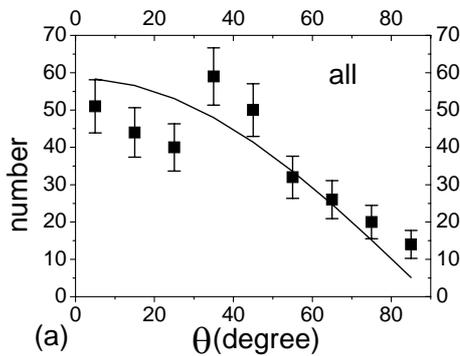
图 3.5 和图 3.6 分别是各样本的旋涡矢量方向 θ 和 ϕ 分布图, 实线代表相应的各向同性分布。带 $\pm \sigma$ 误差棒的方点表示相应区间样本星系数。从这些图我们可以看出各样本星系的 θ 和 ϕ 分布对各向同性分布的偏离情况。

从图 3.5-a 可以看出, 总样本的星系旋涡矢量方向 θ 分布, 在 $\theta = 40^\circ$ 和

$\theta = 80^\circ$ 分别有两处宽约 20° 的相应于各向同性分布的“鼓起” (1σ 以上), 即“双鼓”现象。在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 则有宽约 30° 的凹陷 (1σ 以上)。从分布图来看, 除了“鼓起”部分, 分布趋向于直线, 与对应的各向同性分布明显不同, 这与我们前面所得的统计结论是一致的。由于 $\theta = 0^\circ$ 相应于超星系盘面的方向, 因此“双鼓”现象表明 virgo 中旋涡星系的旋涡矢量方向倾向于平行和垂直于超星系盘面两个方向。

从图 3.5-b 和图 3.5-c 看出, 晚期类型星系有类似于总样本星系的“双鼓”现象, 但没有总样本星系的低角度时的“凹陷”现象。早期旋涡星系和晚期旋涡星系的旋涡矢量方向的 θ 分布是不同的, 早期旋涡星系在 $\theta = 0^\circ$ 处比相应的各向同性分布要低 2σ 以上, 而晚期旋涡星系则没有。另外早期旋涡星系在 $\theta = 60^\circ \sim 70^\circ$ 处有约 1σ 的晚期类型星系所没有的凸起。这与我们先前用 K-S 检验法对早期旋涡星系及晚期旋涡星系的旋涡矢量方向 θ 分布检验得出它们倾向于服从不同的分布的结论是一致的。

从图 3.6a 和图 3.6b 可以看出总样本及早期类型星系的星系旋涡矢量方向 ϕ 分布基本是各向同性分布的, 但对总样本星系, 在 $\phi = -30^\circ \sim -20^\circ$ 和 $\phi = 30^\circ \sim 40^\circ$ 处有 1σ 或 1σ 以上的凸起。从图 3.2c 可以看出, 与总样本类似, 不过, 在 $\phi = -30^\circ \sim -10^\circ$ 和 $\phi = 30^\circ \sim 40^\circ$ 处凸起更多, 在 $\phi = -30^\circ \sim -10^\circ$ 处凸起更宽。从图 3.2a 和图 3.2c 的 ϕ 分布图来看, 总的来说, 尽管在 $\phi = 0^\circ$ 附近的凸起不明显, 但分布仍有集中向 $\phi = 0^\circ$ 方向即 Virgo 团中心方向的趋向。



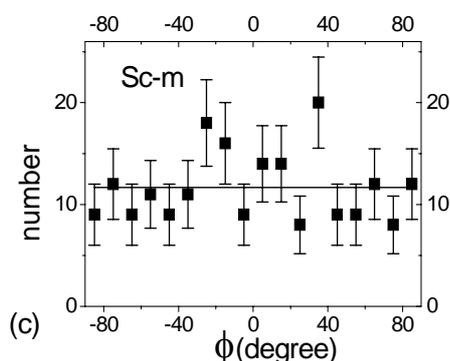
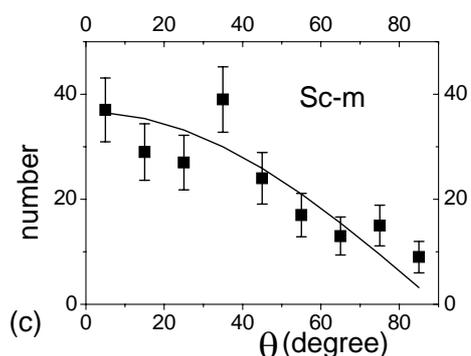
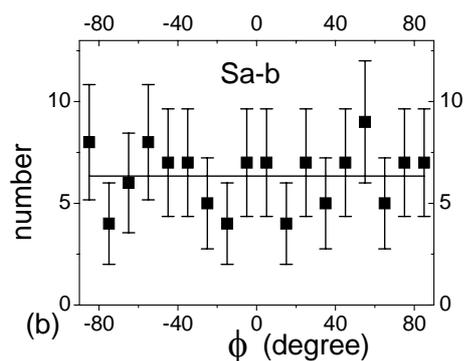
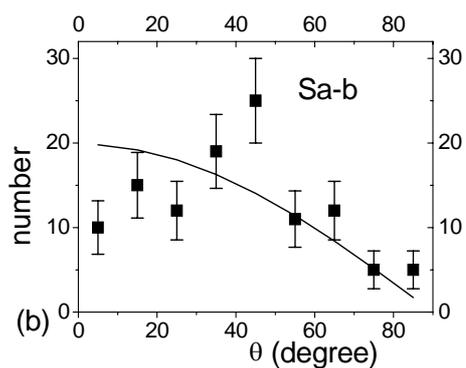


图 3.5

图 3.6

图 3.5 (a), (b) 和 (c) 分别是总样本及各子样本的 θ 分布图。实线代表各向同性分布，实际区间数量是带有 $\pm 1\sigma$ 误差棒的方点。 $\theta = 0$ 相应于旋涡矢量方向在超星系盘面上。

图 3.6 (a), (b) 和 (c) 分别是总样本及各子样本的 ϕ 分布图。实线代表各向同性分布，实际区间数量是带有 $\pm 1\sigma$ 误差棒的方点， $\phi = 0$ 相应旋涡矢量方向在指向 Virgo 团中心方向。

3.2.4 分析和结论

对于旋涡星系的旋涡矢量方向 θ 分布对各向同性分布所出现的“双鼓”现象，KO 认为这是所谓的|SGZ|现象：这两个“鼓起”相应于离超星系盘面的不同距离。超星系盘面附近的星系它们的旋涡矢量方向倾向于平行于盘面，而远离盘面的星系的旋涡矢量方向倾向于垂直于超星系盘面。HWSL 对 virgo 团星系旋涡矢量方向的统计得出对 S 和 S0 以及 S+S0 三个样本数据都得出“双鼓”现象：在 $30^\circ \sim 50^\circ$ 处的“低鼓”（约 $1 \sim 2\sigma$ ），在 $70^\circ \sim 80^\circ$ 处的“高鼓”（约 $1 \sim 2\sigma$ ）以及在 0° 附近不小于 3σ 的“凹陷”。G.W. Wu et al.^[15]对 Coma 团也得出了对 S 和

Irr 样本有“双鼓”现象。从图 3.5b 和图 3.5c 可以看出, Sa-b 星系旋涡矢量比 Sc-m 旋涡矢量更倾向于垂直于团平面, 而 Sa-b 和 Sc-m 星系离开团平面的距离(以 $|B - \bar{B}|$ 的平均值作为近似)分别为 2.14° 、 2.03° , 这也就证实了图 3.5a 的“双峰”现象的是所谓的|SGZ|现象。我们注意到星系团内星系空间分布可能与星系类型有关^{[16][3]}。因此,“双鼓”相应于离超星系盘面的不同距离可能是由于星系团内星系分布按星系类型分开而同时不同星系类型又有不同的旋涡矢量方向分布有关。如果认为星系旋涡矢量隐含原始星系团中物质的动力学信息,这可能表明星系按类型分层与星系和星系团形成的早期条件有关。因此,“双峰”现象有可能源于星系形成时的不同的旋涡矢量形成机制。

G. W. Wu et al^[15]对 Coma 团得出星系旋涡矢量方向 ϕ 分布在 $\pm 30^\circ$ 及 0° 处有“鼓起”,也与我们的结论一致,只不过比我们的要明显。HWSL 也得出了 virgo 团旋涡星系旋涡矢量方向倾向于指向 virgo 团中心。

我们得出了早期类型星系和晚期类型星系旋涡矢量方向分布是不同的,也即星系旋涡矢量方向分布可能与星系类型指数有关。这可能是由于 virgo 团中星系旋涡矢量方向分布沿哈勃类型构成连续的系列(HWSL)。Dressler^[16]发现星系团中星系按星系类型在大尺度空间上分层, Giovanelli et al.^[17]发表了旋涡类型星系本身就按星系形态在空间上分层。因此,这可能表明星系按类型分层与星系和星系团形成的早期条件有关。

关于星系和星系团的形成和演化的理论很多,其中主要有三种:“hierarchichal”模型^{[18][19]},”pancake”模型^{[20][21]},”primordial vorticity”理论^[22]。“hierarchichal”模型认为星系团成员星系的旋涡矢量方向分布是随机的,“pancake”模型则认为星系团成员星系的旋涡矢量方向分布应倾向于平行于星系团盘面,“primordial vorticity”理论认为星系团成员星系的旋涡矢量方向分布应倾向于垂直于星系团盘面。我们的结果与上述三种理论均不符。我们也得出早期旋涡星系和晚期旋涡星系的分布可能是不同的,这说明星系团成员星系的旋涡矢量方向分布可能与星系类型有密切关系,HWSL 和 G. X. Wu(1997)^[15]也得到了类似结论。因此不同类型星系可能有不同的起源,从而实际星系团成员星系的旋涡矢量方向分布可能是多种理论的复合结果,或这需要更新的理论模型去解释。当然这也可能与样本极限星等不够深有关,以及我们这里只考虑了旋涡星系有

关，我们期待着更深更完备的星系样本的进一步验证。

我们注意到，把所有 Virgo 团旋涡星系内禀扁度 q_0 都看作 0.2，利用 Holmberg(1946)^[4]公式： $\sin^2 i = (q^2 - q_0^2)/(1 - q_0^2)$ 得到倾角，从而得到 Virgo 团旋涡星系旋涡矢量方向分布，得到的结果和用 P.FouQUE(1990)表 2 所提供倾角统计得到的结果是一致的。我们的结论也与 HWSL 得到的结论基本一致。这说明在统计 Virgo 团旋涡星系旋涡矢量方向分布时， q_0 取 0.2 并不影响最终结论。

综上利用 P.FouQUE(1990)^[6]得到的带有星系倾角数据的 Virgo 团旋涡星系完备样本，我们分析了 Virgo 团旋涡星系角动量方向分布。用超星系坐标系中的位置角 θ 和方位角 ϕ 表示星系角动量的方向。得到如下结论：

(1) Virgo 团旋涡星系旋涡矢量 θ 分布，明显是非各向同性的，这无论从其和各向同性分布的 χ^2 检验结果还是 K-S 检验结果还是分布图对比中都可以明显看出。Virgo 团旋涡星系旋涡矢量 θ 分布在平行和垂直于超星系盘面方向上都有过剩，这表明 Virgo 团旋涡星系旋涡矢量方向分布倾向于平行和垂直于超星系盘面两个方向上。

(2) 对 Virgo 团旋涡星系旋涡矢量 ϕ 分布，我们无法排除各向同性的可能性。但有集中向 Virgo 团中心的倾向。

(3) 所有 Virgo 团旋涡星系内禀扁度 q_0 都看作 0.2 与直接用倾角得到的结论一致性说明在统计超星系旋涡矢量分布时使用 $q_0 = 0.2$ 和 Holmberg(1946)^[4]公式计算倾角并不影响最终结论。

(4) 早期类型星系和晚期类型星系旋涡矢量方向分布是不同的，暗示不同类型星系可能有不同的大尺度起源。

(5) Virgo 团旋涡星系旋涡矢量方向的面积分布表明 Virgo 团旋涡星系旋涡矢量方向在空间分布上是非各向同性分布的。

3.3 Virgo 团中盘星系旋转矢量方向分布

3.3.1 样本数据

利用前面所得的 $q_0 - T$ 的关系，对 A CATALOGUE OF THE VIRGO DISK GALAXIES^[1]中的数据进行处理。这一星表收录了 Virgo 团中盘星系达 340 个星系，是迄今为止编录 Virgo 团星系最多也最新的一个。

A CATALOGUE OF THE VIRGO DISK GALAXIES^[12]中样本数据位置角 PA 和盘星系主次轴直径都是利用 APM (the Automated Plate Measuring System) 测出的,样本完备到 $B^1 \sim 18^m$ (对 Im 成员可达 20^m), 成员星系径向 3K 微波背景辐射速率 v_{3k} 上限取 3000km/s。相比较而言在此之前 UGC(Uppsala General Catalogue of Galaxies)所提供的位置角则是人工测量的。由于机器测量减少了人工测量所带来的偶然误差,我们认为机器测量结果更可靠。因而对样本中数据我们首选 APM 测量的 PA 值,共 301 个,在 UGC 中又查得 32 个,另外,我们又从 LEDA 数据库又查得 5 个,这样我们最终有 PA 值的星系数是 338 个。对于星系的观测轴率我们也采用同样的原则获得。至于星系类形指数 T,我们从 LEDA 数据库中获得。利用前面所得的 $q_0 - T$ 关系,即

$$\log(\bar{q}_0) = (-0.580 \pm 0.016) + (-0.067 \pm 0.004)T \quad (-3 \leq T \leq 7)$$

$$\log(\bar{q}_0) = -2.309 \pm 0.347 + (0.185 \pm 0.040)T \quad (T > 7)$$

并利用利用 Holmberg (1946)^[4]公式: $\cos^2 i = (q^2 - q_0^2)/(1 - q_0^2)$, 我们可得每个星系的 i 。

我们把这 338 个星系分成一个总样本和五个子样本: 包含所有星系的总样本(all), 透镜星系 S0 ($-3.4 \leq T \leq 0.4$), 早期旋涡星系 Sa-bc ($0.5 \leq T \leq 4.4$), 晚期旋涡星系 Sc-m ($4.5 \leq T \leq 9.4$), 以及 E+S0 ($T \leq 0.4$) 和 S+Irr ($T \geq 0.5$)。样本星系对星系类型 T、轴率 q 以及位置角 P.A. 的分布如下图。

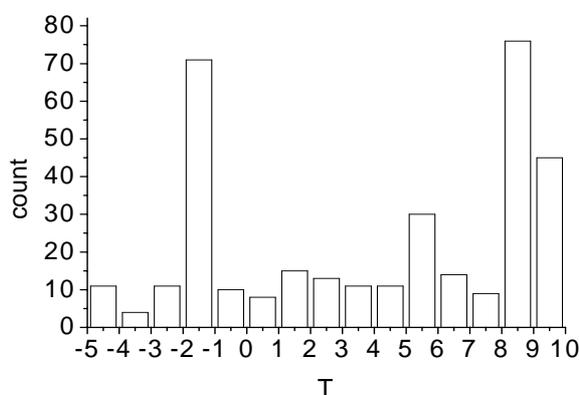


图 3.7 总样本星系对星系类型 T 的分布

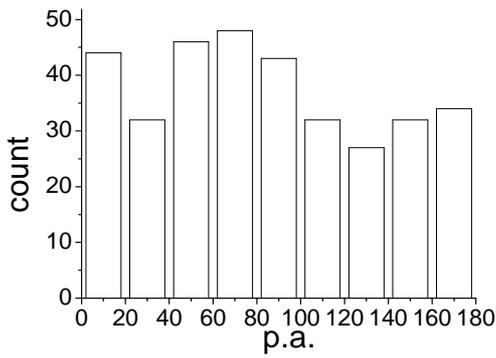


图 3.8 总样本星系的位置角 P.A 分布

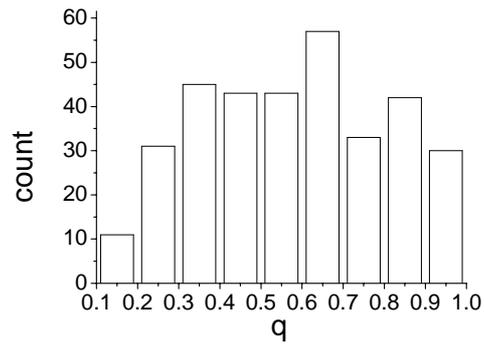


图 3.9 总样本星系的轴率分布

3.3.2 统计结果

我们使用了前面所述的 χ^2 检验法对总样本以及各子样本星系旋转矢量方向分布进行了统计，结果如下。

I θ 分布

在应用 χ^2 检验时，我们把样本按 θ 分成 9 份，每个区间 10° ，自由度是 8。

表 3.7 是总样本以及各子样本星系的 χ^2 检验结果。

从表 3.7 可以看出，对总样本 all 星系旋涡矢量 θ 分布我们有 $1-0.1278=87.22\%$ 的自信认为是非均匀分布的。对 S0 星系我们有 92.53% 的把握认为其 θ 分布是非均匀的。对 E+S0 星系旋涡矢量是明显非均匀分布的。我们也可看出对各子样本，随着星系类型指数的增大，其 θ 分布的 $P(> \chi^2_c)$ 值越大，这说明随着星系类型指数的增大，星系旋涡矢量 θ 分布有趋向于各向同性分布的趋势。从表 3.7 我们也可看出，透镜星系、早期旋涡星系和晚期旋涡星系的 θ 分布各向同性水平明显不同。为此，我们用 K-S 检验法检验了透镜星系和旋涡星系以及早期旋涡星系和晚期旋涡星系的 θ 分布是否服从同一分布。从表 3.8 和表 3.9 可以看出，透镜星系和旋涡星系的 θ 分布，以及早期旋涡星系和晚期旋涡星系的 θ 分布明显服从不同的分布。

图 3.10 是总样本及各子样本的星系 θ 分布以及相应的各向同性分布。其中带 $\pm \sigma$ 误差棒的方点表示相应角度区间内实际星系数，曲线表示各向同性分布。从这些图我们可以看出各样本的星系 θ 分布对各向同性分布的偏离情况。

从图 3.10 (a) 可以看出, Virgo 团星系旋涡矢量 θ 分布在 $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 25^\circ$ 处有 1σ 水平的峰。由于 $\theta = 0^\circ$ 相应于星系轴平行于星系团盘面方向, Virgo 团星系旋涡矢量倾向于平行于星系团盘面。因此从图 3.10 (b) 可以看出, 透镜星系 θ 分布在 0° 附近比起各向同性分布有约 1.5σ 凸起的峰。在 60° 附近有宽约 20° 凹下去的约 $1 \sim 1.5\sigma$ 的谷。因此总体而言, 透镜星系更倾向与小 θ 分布。因此透镜星系轴倾向于平行于星系团盘面。从图 3.10 (c) 可以看出, 早期旋涡星系在 0° 附近比起相应的各向同性分布有约 2σ 的凹陷, 在 25° 、 45° 和 75° 附近有约 1σ 的峰。从图 3.10 (d) 可以看出晚期旋涡星系在 0° 附近和 55° 附近各有一个凸起的峰, 在 35° 处有凹下约 1.5σ 的谷。可以看出早期旋涡星系和晚期旋涡星系的 θ 分布明现不同, 这与我们前面用 K-S 检验法得到的结果是一致的。从图 3.10 (e) 可以看出旋涡星系 θ 分布在 25° 和 55° 附近各有一个峰, 由于旋涡星系中晚期类型星系占多数, 因次, 旋涡星系 θ 分布和晚期类型星系 θ 分布图比较相似。从透镜星系旋涡矢量 θ 分布图图 3.10 (e) 和 E+S0 星系 θ 分布图图 3.10 (f) 的对比中可以看出, E 星系 θ 分布比透镜星系更倾向于较小的 θ 角。

II ϕ 分布

在应用 χ^2 检验时, 在应用 χ^2 检验时按 ϕ 分成 18 份, 每个区间 10° , 自由度是 17。

从表 3.7 可以看出, 对总样本星系旋涡矢量方向 ϕ 分布明显是非各向同性分布的。对各子样本星系, 除了早期类型星系和 S+Irr 样本星系, 其它样本星系的旋涡矢量方向 ϕ 分布明显是非各向同性分布的。即便对 S+Irr 样本星系我们也有 $1 - 0.1365 = 86.35\%$ 自信认为其星系的旋涡矢量方向 ϕ 分布是非各向同性分布的。从表 3.8 和表 3.9 可以看出对早期旋涡星系和晚期旋涡星系以及透镜星系的旋涡矢量方向 ϕ 分布我们无法判断是否服从不同的分布。

图 3.11 (a)-(g) 是总样本及各子样本星系的旋涡矢量方向 ϕ 分布图, 其中带 $\pm\sigma$ 误差棒的方点表示相应区间星系数, 实线表示对应样本星系的各向同性分布。

从图 3.11 (a) 可以看出, 总样本星系的旋涡矢量方向 ϕ 分布在 -40° 和 -15° 处相对于有 $+1\sigma$ 的凸起, 在 55° 处有 2σ 的凸起, 而在 0° 附近有明显的宽约 20° 的凹陷 (在 2σ 水平), 在 $\pm 80^\circ$ 处各有宽 20° 的 1σ 水平的凹陷。而 $\phi = 0^\circ$ 相应

于星系旋涡矢量方向指向 Virgo 团中心方向，由此可见，Virgo 团中星系总体上旋涡矢量方向在指向和垂直于 Virgo 团中心方向上都缺乏，即倾向于指向与 Virgo 团中心方向上成 45° 角方向。从图 3.11 (e) 可以看出，Virgo 团中旋涡星系的旋涡矢量 ϕ 分布 $\pm 90^\circ$ 处明显有宽 20° 的 1.5σ 以上的凹陷，从总体上 Virgo 团中旋涡星系的旋涡矢量 ϕ 分布倾向于指向 Virgo 团中心方向。我们也从图 3.11 (c) 和图 3.11 (d) 看出，早期旋涡星系和晚期旋涡星系的分布是不同的，这从表 3.8 的 K-S 检验结果也可看出早期旋涡星系和晚期旋涡星系有 70% 以上可能是服从不同的分布，相比较而言，早期旋涡星系在 $\phi = 0^\circ$ 处有宽达 70° 的凹陷，而晚期旋涡星系在 $\pm 90^\circ$ 处有 2σ 及 2σ 以上的凹陷。因此晚期旋涡星系旋涡矢量方向倾向于指向 Virgo 团中心方向。而早期旋涡星系旋涡矢量方向倾向于指向垂直于 Virgo 团中心方向。从图 3.11 (b) 和图 3.11 (e) 可以看出，透镜星系和旋涡星系的旋涡矢量 ϕ 分布也是不同的，旋涡星系的旋涡矢量 ϕ 分布在 $\pm 90^\circ$ 处比透镜星系有明显的凹陷，因而比透镜星系更倾向于指向 Virgo 团中心方向。图 3.11 (b)、(c) 和 (d) 我们也可看出，早期类型星系旋涡矢量 ϕ 分布似乎介于透镜旋涡星系和晚期旋涡星系分布之间。这说明星系旋涡矢量 ϕ 分布可能与星系类型指数之间可能存在关联性。

表 3.7。 旋涡矢量分布的 χ_v^2 检验

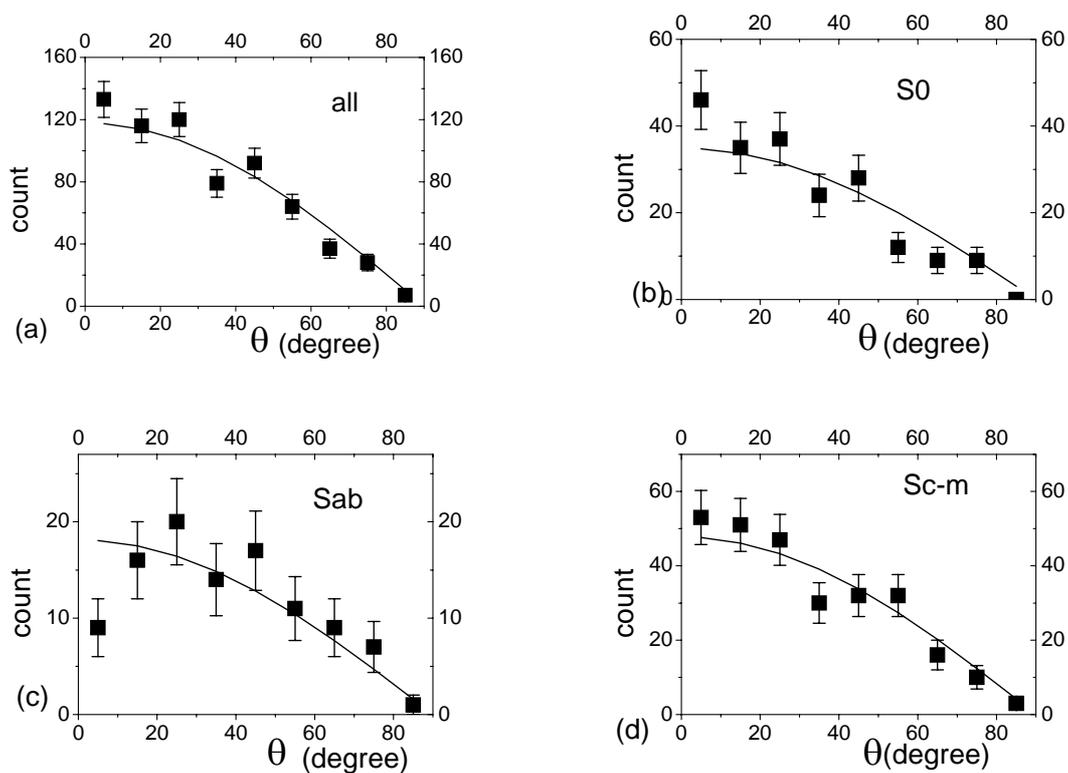
样本	星系数	θ		ϕ		Area	
		χ_v^2	$P(> \chi_v^2)$	χ_v^2	$P(> \chi_v^2)$	χ_v^2	$P(> \chi_v^2)$
all	338	1. 5704	0. 1278	1. 7362	0. 0301	1. 2286	0. 1659
S0	100	1. 7854	0. 0747	2. 0953	0. 0052	1. 2829	0. 1219
Sa-bc	52	1. 0600	0. 3880	1. 1312	0. 3154	1. 0237	0. 4293
Sc-m	137	0. 7610	0. 6374	1. 8205	0. 0203	0. 9081	0. 6242
Sa-m	189	0. 5965	0. 7816	1. 8936	0. 0142	0. 8062	0. 7849
E+S0	112	2. 1513	0. 0280	2. 1576	0. 0037	1. 2049	0. 1886
S+Irr	226	0. 6179	0. 7636	1. 3769	0. 1365	0. 6925	0. 9141

表格 3.8 透镜星系和旋涡星系是否服从同样分布的 K-S 检验

S0	Sa-m	θ		ϕ	
		D	$P(D > d)$	D	$P(D > d)$
100	189	0.1279	0. 0277	0. 0442	0. 9607

表格 3.9 早期旋涡星系和晚期旋涡星系是否服从同样分布的 K-S 检验

Sa-bc	Sc-m	θ		ϕ	
		D	$P(D > d)$	D	$P(D > d)$
57	105	0.1630	0. 0363	0. 1140	0. 2813



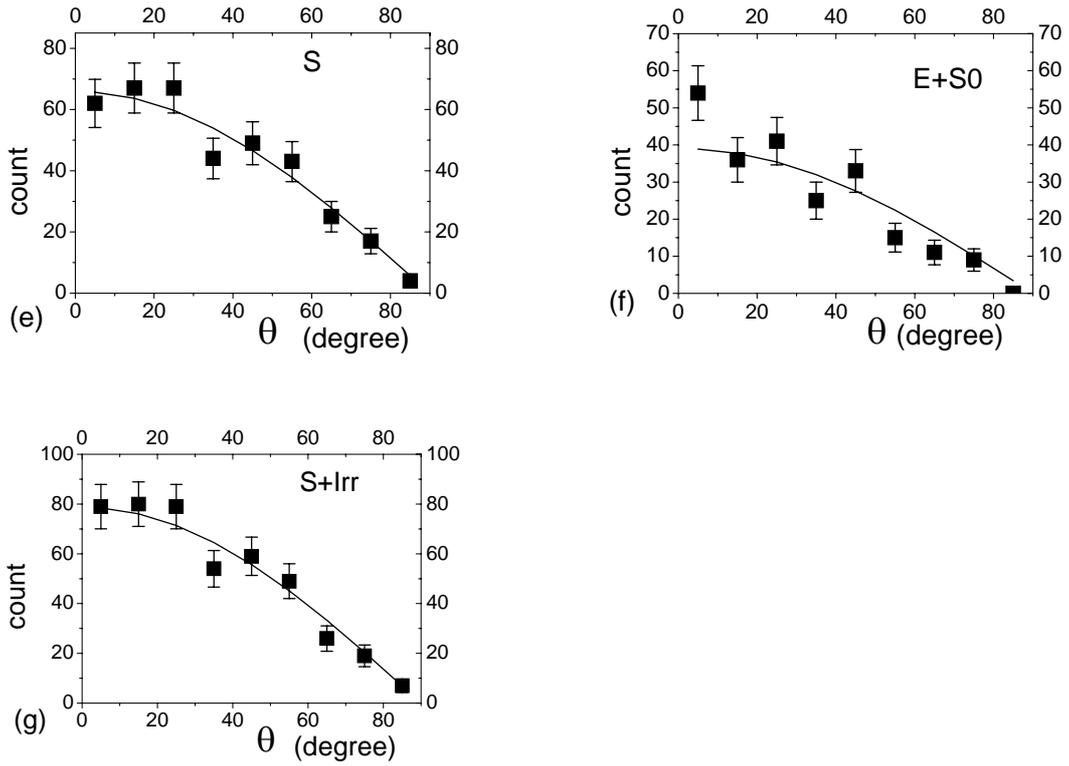
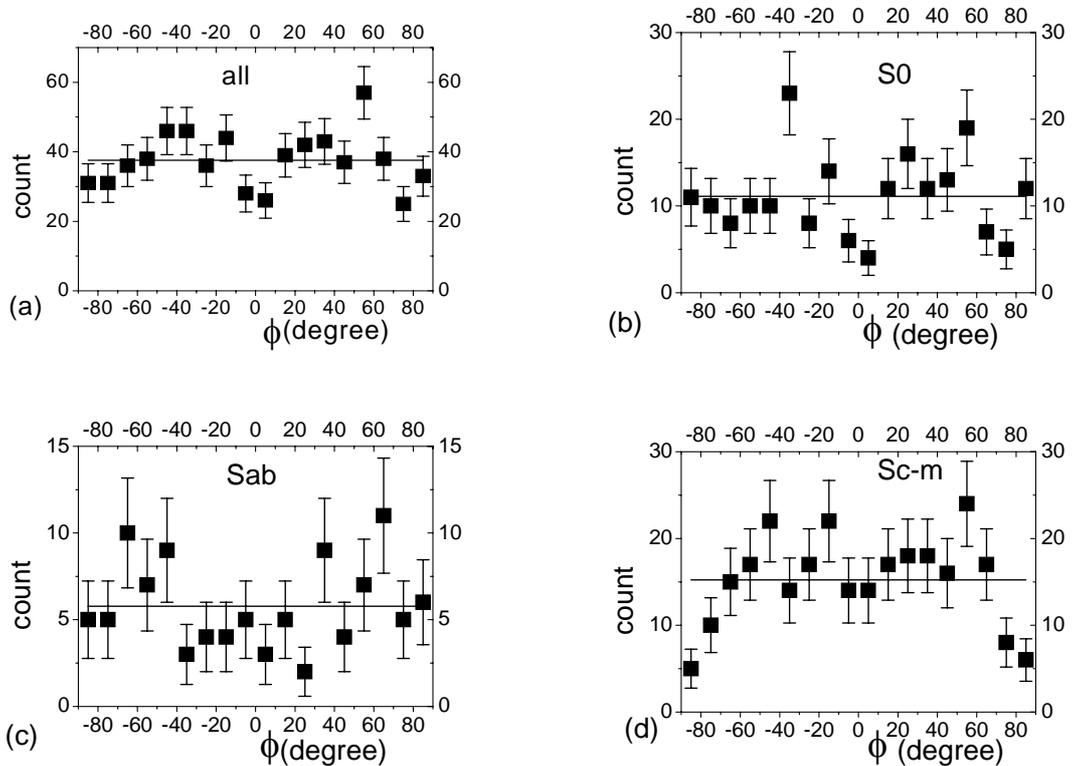


图 3.10

图 3.10 (a) -(g)分别是 总样本及各子样本的 θ 分布图。实线代表各向同性分布，实际区间数量是带有 $\pm 1\sigma$ 误差棒的方点。 $\theta = 0$ 相应于角动量方向在超星系盘面上。



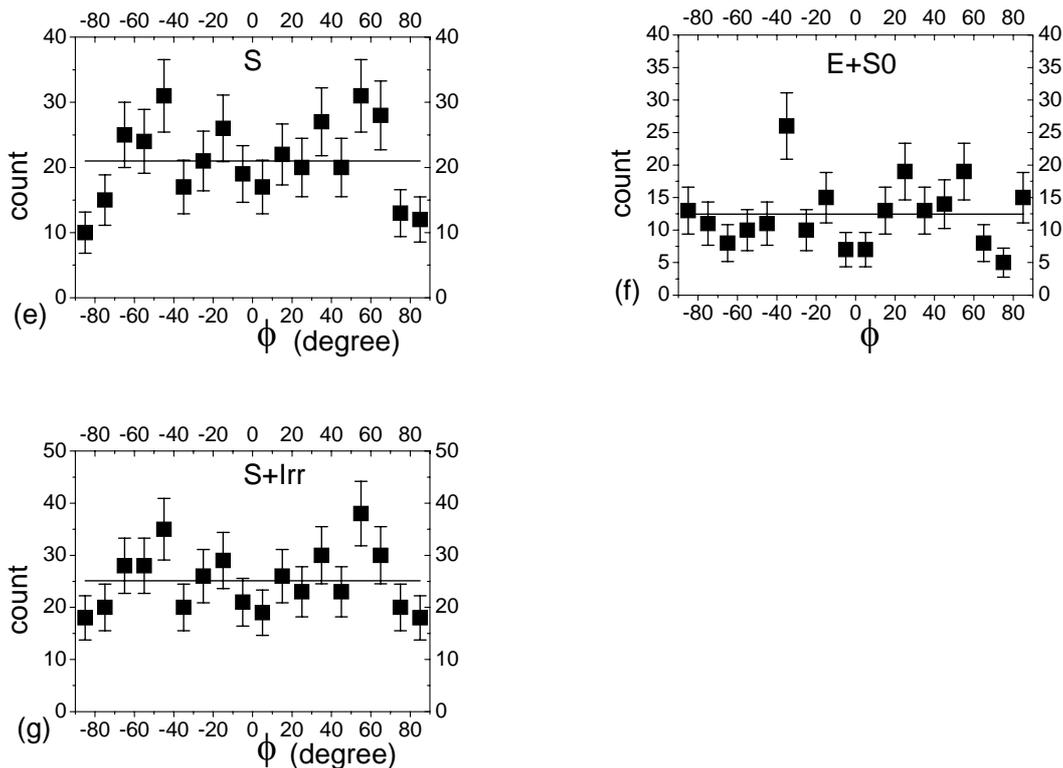


图 3.11

图 3.11 (a) - (g) 分别是总样本及各子样本的 ϕ 分布图。实线代表各向同性分布，实际区间数量是带有 $\pm 1\sigma$ 误差棒的方点， $\phi = 0$ 相应于角动量方向在指向 Virgo 团中心方向。

III 面积分布

在应用 χ^2 检验时，对样本角动量矢量在整个空间的球面分布的统计，我们把整个空间一半(另一半是它的镜像)分成 36 个立体角区间，每个区间 $30^\circ \times 30^\circ$ ，自由度是 35。

从表 3.7 可以看出对总样本，透镜星系和 E+S0 星系我们都有 80% 以上的自信它们的旋涡矢量方向倾向于非各向同性分布的。我们也可看出，从 E+S0 星系到 S+Irr 星系，随着星系类型指数的上升， $P(> \chi_v^2)$ 值越来越大，也即暗示着星系旋涡矢量方向随着随着星系类型指数的上升趋向各向同性分布。这也反映了星系旋涡矢量方向与星系类型指数之间可能存在关联性。

表 3.10 是空间半个球面的各个样本的旋转矢量分布情况。从表 3.10 可以看出，Virgo 团中星系总体上旋涡星系矢量方向在所选半球面上 $-15^\circ \leq \theta \leq +15^\circ$ 及 $-60^\circ \leq \phi \leq -30^\circ$ 和 $-15^\circ \leq \theta \leq +75^\circ$ 及 $30^\circ \leq \phi \leq 60^\circ$ 两个区域相对于各向同性分

布有 1σ 或 1σ 以上的过剩, 这一方向与前面 θ 分布所得 θ 分布 Virgo 团中星系总体上旋涡星系矢量方向请倾向于平行于团盘面方向以及 ϕ 分布中所得 Virgo 团中星系总体上旋涡星系矢量方向请倾向于指向与 Virgo 团中心方向成 45° 角方向的结论是一致的。对旋涡星系 S 在 $-15^\circ \leq \theta \leq +45^\circ$ 及 $30^\circ \leq \phi \leq 60^\circ$ 区域相对于各向同性分布有 1σ 或 1σ 以上的过剩, 对透镜星系 S0 在 $-45^\circ \leq \theta \leq -15^\circ$ 及 $-60^\circ \leq \phi \leq -30^\circ$ 和 $-15^\circ \leq \theta \leq +75^\circ$ 及 $30^\circ \leq \phi \leq 60^\circ$ 处有两个区域相对于各向同性分布有 1σ 或 1σ 以上的过剩。

表格 3.10

θ	ϕ						各相同性分布
	$-90^\circ \sim -60^\circ$	$-60^\circ \sim -30^\circ$	$-30^\circ \sim 0^\circ$	$0^\circ \sim +30^\circ$	$+30^\circ \sim +60^\circ$	$+60^\circ \sim +90^\circ$	
All							
$-75^\circ \sim -45^\circ$	9-	16	17	13	12	7-	14.58014
$-45^\circ \sim -15^\circ$	21	30	27	23	25	20-	25.25354
$-15^\circ \sim +15^\circ$	26	45++	28	30	42++	22-	29.16028
$+15^\circ \sim +45^\circ$	29	24	21	18-	37++	26	25.25354
$+45^\circ \sim +75^\circ$	11	12	12	18	19+	18	14.58014
$-90^\circ \sim -75^\circ$ $+75^\circ \sim +90^\circ$	2	3	3	5	2-	3	3.83902
S							
$-75^\circ \sim -45^\circ$	5-	9	10	8	9	5-	8.1528
$-45^\circ \sim -15^\circ$	12	17	17	11	14	10-	14.12106
$-15^\circ \sim +15^\circ$	12-	20	20	17	22+	9-	16.3056
$+15^\circ \sim +45^\circ$	13	15	9-	9-	22++	16	14.12106
$+45^\circ \sim +75^\circ$	7	10	8	11	10	11	8.1528
$-90^\circ \sim -75^\circ$ $+75^\circ \sim +90^\circ$	1	1	2	3	1	2	2.14667
S0							
$-75^\circ \sim -45^\circ$	3	4	5	3	2-	2-	4.31365
$-45^\circ \sim -15^\circ$	5	11+	7	7	7	6	7.47146
$-15^\circ \sim +15^\circ$	8	20	5-	8	16++	6	8.6273
$+15^\circ \sim +45^\circ$	10	7	8	7	12+	6	7.47146
$+45^\circ \sim +75^\circ$	2-	1-	2-	5	7+	4	4.31365
$-90^\circ \sim -75^\circ$ $+75^\circ \sim +90^\circ$	1	0-	1	2	0-	0-	1.13581

表中+号表示相对于各向同性分布有 1σ 的过剩，++表示相对于各向同性分布有 2σ 的过剩，以此类推。表中-号表示相对于各向同性分布有 1σ 的不足，--表示相对于各向同性分布有 2σ 的不足，以此类推。

3.3.3 结论

通过以上有关 Virgo 团中星系总样本及各子样本星系的旋涡矢量方向分布是否各向同性分布 χ^2 检验以及分布图统计分析，用 θ 表示星系角动量方向与超星系坐标系统 X 轴和 Y 轴所在平面间的夹角，用 ϕ 表示星系角动量矢量在 X-Y 平面上的投影和 X 轴之间的夹角，我们得到如下结论：

1. Virgo 团中盘星系旋涡矢量方向倾向于平行于团平面。
2. Virgo 团中盘星系旋涡矢量方向在团平面上的投影倾向于指向与 Virgo 团中心方向成 45° 角的方向。
3. Virgo 团中盘星系旋涡矢量方向与团盘面夹角分布对透镜星系和旋涡星系、早期类型旋涡星系和晚期类型旋涡星系完全不同，早期类型旋涡星系旋涡矢量方向与团盘面夹角分布介于透镜星系和旋涡星系之间，透镜星系、早期类型旋涡星系和晚期类型旋涡星系旋涡矢量方向 ϕ 角分布图的不同，各样本星系旋涡矢量方向 θ 和 ϕ 角分布随着星系类型的增大倾向于各向同性分布，所有这些都说明星系旋涡矢量方向分布是与星系类型指数是相关的，可能星系旋涡矢量方向分布随星系类型指数增大存在连续的序列。
4. Virgo 团中盘星系旋涡矢量方向分布是非各相同性的，这无论从其 θ 角分布、 ϕ 角分布的 χ^2 检验结果还是图形分析中，还是旋涡矢量方向的面积分布都可以看出。

[References]

- [1] Kashikawa N., Okamura S., 1992, PASJ 44, 493(K0).
- [2] Hu, F. X., Wu, G. X., Su, H. J., & Liu, Y.Z. 1995, A&A, 302, 45(HWSL).
- [3] Flin, P., & Godlowski, W. 1986, MNRAS, 222, 525(FG).
- [4] Holmberg, E. 1946, Medd.Lunds.Astron.Obs., Ser. 6, No. 117.
- [5] Mazan, J. 1988, Rapport de stage de stage D.E.A., University of Paris VII.
- [6] Fouque, P., Bottinelli, L., Gouguenheim, L., & Paturel, G. 1990, ApJ, 349, 1.

- [7] Grosbol, P. J., 1985, *Astr, Ap, Suppl.*, 60, 261.
- [8] Pierce, M. J., and Tully, R. B. 1988, *Ap. J.*, 330, 579.
- [9] Warmels, R. H. 1988, *Astr, Ap, Suppl.*, 72,19.
- [10] Guhathakurta, P., van Gorkom, J. H., Kotanyi, C. G., and Balkowski, C. 1988, *A.J.*, 96, 851.
- [11] Danver, C.-G. 1942, *Annals Obs. Lund*, No. 10.
- [12] Yuan, Q. R., Hu, F. X., Su, H. J., Wu, G. X., &He, X. T.. 1996, *Ap&SS*, 239, 71
- [13] Hu F.X., Wu G.X., Su H.J.,1993, *Publications of Purple Mountain Observatory*, 12, 65
- [14] Von Mises R., *Mathematical Theory of Probability and Statistics*, Chapter IX (C0 and IX (E), New York: Academic Press, 1964
- [15] Wu G.X., Hu F.X., Su H.J., &Liu Y. Z., 1997, *AcApS*, 17, 345
- [16] Dressler A., 1980, *ApJ* 236, 351
- [17] Giovanelli R., Haynes M. P., Chincarini G. L., 1986, *ApJ* 300, 77
- [18] Peebles P.J.E., 1969, *ApJ* 155, 393
- [19] Peebles P.J.E.,1974, *ApJ* 189, L51
- [20] Zeldovich Ya.B., 1978, in: Longair M.S., Einasto J. (eds.) *The Large Scale Structure of the Universe*, Proc. IAU Symp. No. 79. Reidel, Dordrecht, P. 409
- [21] Doroshkevich A.G., Shandaxin S.F., 1978, *NMRAS* 184, 643
- [22] Ozenoy L.M., 1978, in: Long M.S., Einasto J. (eds.) *The Large Scale Structure of the Universe*, Proc. IAU Symp. No. 79. Reidel, Dordrecht, p, 427

第四章. 本超星系团中场星系旋转矢量方向的分布

4.1 引言

由于 Virgo 团中星系分布密度大，星系的旋转矢量受周围星系的影响也较多，为了更好的原始星系的旋转矢量的分布情况，本文主要研究本超星系团内的场星系，所谓场星系就是那些相对比较孤立，周围星系较少，受星系团中心及其它星系影响比较小的星系。这些星系更能反应星系及星系团的原始性质。我们的样本取自北天亮星系星表，且只选其中的场星系，共 220 个，具体标准见参考文献[1]。我们把总样本分成四子样本：透镜星系 S_0 ，早期旋涡星系 $Sab-c$ ，晚期旋涡星系 $Sc-m$ ，整个旋涡星系 $Sa-m$ 。

4.2 研究方法

我们定义 (θ, φ) 来表示星系旋转矢量的方向， θ 是本超星系团盘面和旋转矢量的夹角， φ 是旋转矢量在星系团盘面上的投影和本超星系团本地坐标系 X 轴方向的夹角（近似指向 Virgo 团中心）。星系的具体推导见参考文献[3]和[4]。

通常在这一领域人们用 χ^2 检验法统计星系旋转矢量方向分布，但是 χ^2 检验法不足之处是要对数据样本分区，这样每个区内样本数据信息就丧失了，分区的多寡对结果有时有很大的影响。为此我们采用无需分区的 Kolmogorow-Smirnov (K-S) (文献[5]) 检验法统计本超星系团内星系旋转矢量方向分布情况，我们也将对已经用 χ^2 检验法获得的结果进行验证。

假定观测样本 $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 的累积分布函数是 $S_n(x)$ ，理论分布函数是 $P(x)$ ，我们能得到统计量 $d(= \text{MAX}\{|S_n(x) - P(x)|\})$ 。设 $L(x) = 1 - 2 \sum_{j=1}^{\infty} (-1)^{j-1} e^{-2j^2 x^2}$ ，有 $\alpha = P\{D > d\} = 1 - L(\sqrt{nd})$ ， $\alpha = P\{D > d\}$ 是偏离超过 d 的概率。显然，当 d 越小，从而 α 越大时，理论和观测符合的越好。通常我设定阈值 $\alpha = P\{D > d\} = 0.05$ ，若 $\alpha < 0.05$ ，我们认为理论和观测相差太大，二者不服从同一分布。

我们假定理论上本超星系团内星系旋转矢量方向在空间上分布是各向同性的， θ 和 φ 的理论累积分布函数是

$$P(\theta) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta} r^2 \cos \theta d\theta d\varphi / \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} r^2 \cos \theta d\theta d\varphi = \sin \theta \quad (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2})$$

$$P(\varphi) = \frac{1}{2} + \frac{\varphi}{\pi} \quad (-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2})$$

我们将用 K-S 检验法检验所选样本星系的旋转矢量方向分布，以检验本超星系团内场星系旋转矢量方向在空间上分布是否各向同性，并和用 χ^2 检验法得到的结果（参见文献[2]）进行比较。此外，K-S 检验法也能用来比较两种样本是否服从同一分布。

4.3 统计结果

我们用 K-S 检验法统计了总样本及子样本,结果如表 4.1。从表 4.1 可以看出，不管是总样本还是子样本，对 φ 分布，得到的 $P(D > d)$ 都远小于阈值 0.05。我们有超过 99% 的

表 4.1, K-S 检验法统计结果

样本	星系数	θ		φ	
		d_1	$P(D > d_1)$	d_2	$P(D > d_2)$
总样本	220	0.058	0.105	0.163	0.0000
S0	41	0.175	0.014	0.244	0.0001
Sab - c	84	0.045	0.490	0.145	0.0000
Sc - m	90	0.048	0.830	0.169	0.0001
Sa - m	174	0.076	0.248	0.133	0.0036

自信认为不管是本超星系团内的透镜星系还是旋涡星系，它们的 φ 分布都是非均匀的。对 θ 分布，除了透镜星系的 $P(D > d)$ 小于阈值 0.05，其它都超过阈值 0.05。对透镜星系，我们有 98.6% (1-0.014) 的自信认为其 θ 分布是非均匀的，对旋涡星系的 θ 分布我们不能排除是均匀的。这些结论与 χ^2 检验法所得结果是一致的，这说明 χ^2 检验法的结果是可信的，所采用的分区方法并没影响最终结论。同时我们也应看到，上述 K-S 检验的结果比 χ^2 检验法的结果更显著。

我们也用 K-S 检验法对 S0 和 Sab - c 星系的旋转矢量方向是否是服从同一分布进行了检验，结果如表 2。从表 4.2 可以看出，我们有 96.8% (1-0.032) 的自信认为它们的 θ 分布明显不是同一分布，而它们的 φ 分布无法判断，不能排除它们服从同一分布的可能性。

表 4.2. S0 和 Sab - c 星系旋转矢量方向是否是服从同一分布的 K-S 检验

样本 1	样本 2	θ		φ	
S0	Sab - c	d_1	$P(D > d_1)$	d_2	$P(D > d_2)$

41	84	0.194	0.032	0.087	0.799
----	----	-------	-------	-------	-------

4.4 星系内禀扁度 q_0 的影响

计算星系的本地坐标系坐标 (θ, φ) ，要用到视线和星系盘面夹角即倾角 i ， i 通常用公式 $i = \arcsin(b/a)$ 计算得到，这里 b/a 是星系的轴率， q_0 是星系的内禀扁度。通常认为 q_0 服从一维正态分布，弥散很小的高斯分布，要求不高时一般就认为 q_0 服从一维正态分布。我们在前面统计中是取 $q_0 = 0.7$ ，没有考虑弥散。我们将对 q_0 的值作微小的变动，看是否会影响我们的结论。图 4.1 和图 4.2 是总样本及各子样本分别对 θ 和 φ 得到的概率 $P\{D > d\}$ 随 q_0 变化的关系图。从图 1 可以看出，对样本 $Sc-m$ 的 φ 分布， q_0 越大， $P\{D > d\}$ 也越大，也即样本的 φ 分布越均匀，但对各个样本的 φ 分布来说，当 $q_0 = 0.7$ 时，其 $P\{D > d\}$ 都小于 0.05。从图 2 来看，样本 $Sc-m$ 和 $Sa-m$ 的 θ 分布的 $P\{D > d\}$ 也随着 q_0 的增大而增大，对样本 $Sab-c$ 来说则相反，对样本 $S0$ 来说，当 $q_0 = 0.7$ 时，其 θ 分布的概率 $P\{D > d\}$ 也小于 0.05。总的说来， q_0 的微小变动不影响我们的结论。

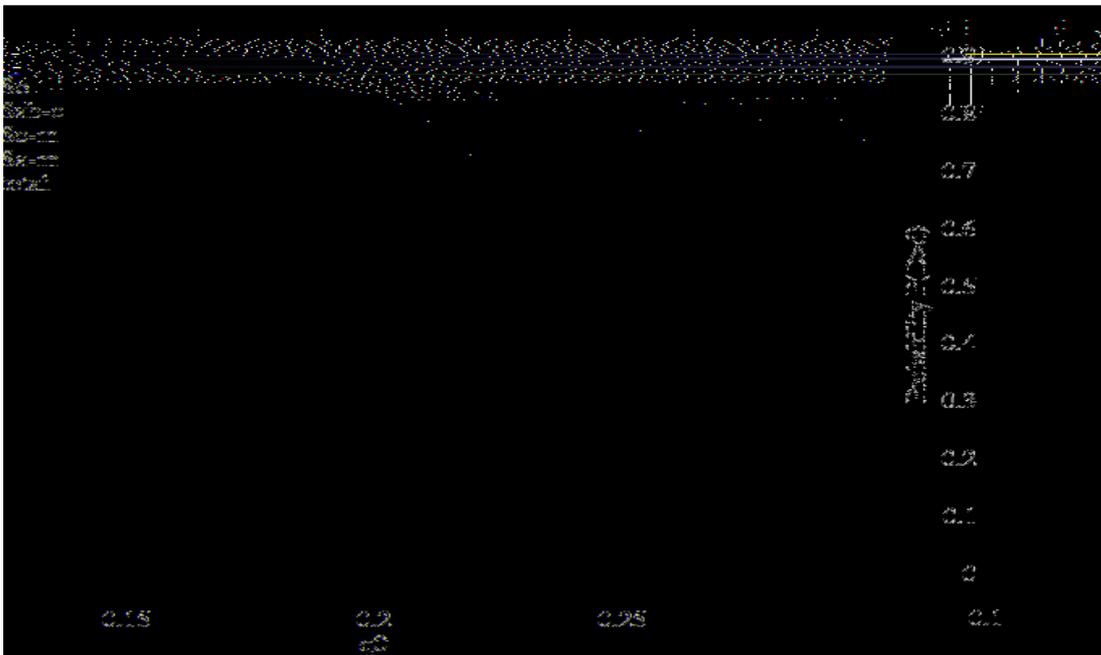


图 4.1. 星系旋转矢量方向 θ 分布 K-S 统计概率 $P(D > d)$ 对内禀扁度 q_0 的分布图，图中不同类型的曲线对应不同的样本。

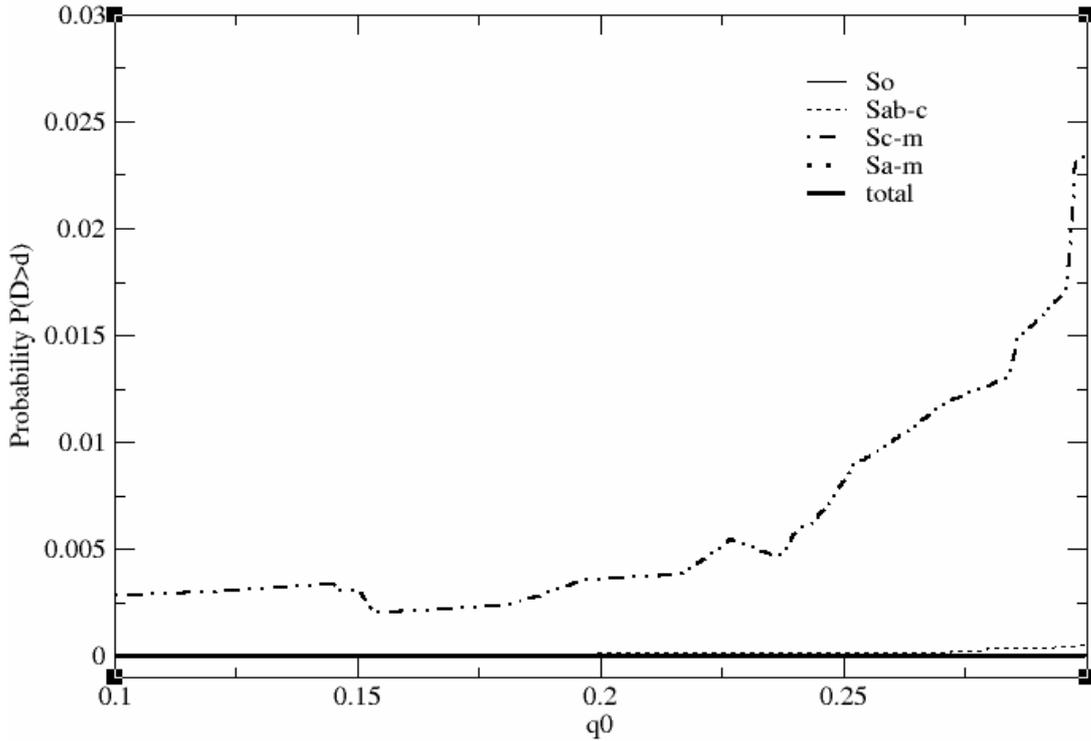


图 4.2.星系旋转矢量方向 φ 分布 K-S 统计概率 $P(D>d)$ 对内禀扁度 q_0 的分布图，图中不同类型的曲线对应不同的样本。

4.5 讨论和结论

我们用 K-S 检验法对本超星系团中场星系的旋转矢量方向分布进行了重新检验，得出结论如下：（1）本超星系团中场星系的旋转矢量方向分布是跟星系类型有关的，对透镜星系而言我们有 95% 以上的自信认为其旋转矢量的方向分布明显是非均匀的（包括 θ 和 φ 分布）。透镜星系的旋转矢量方向倾向于平行于本超星系团平面，这与"pancake"模型的结论是一致的。然而对于旋涡星系来说，虽然其旋转矢量 φ 方向分布是以非均匀为特征的，但它们的 θ 分布却是倾向于均匀的，这一点上支持"Bottom-Up"模型。（2）我们运用 K-S 检验法统计了透镜星系和早期旋涡星系样本，发现它们的旋转矢量方向并不服从同一分布函数。这表明透镜星系和旋涡星系的旋转矢量方向内在本质是不同的，因而这两类星系可能是通过不同的物理过程获得角动量的。（3）K-S 检验法和 χ^2 检验法的结果比较表明：在用来比较某一分布对理论分布偏离的显著性方面，K-S 方法更胜一筹。K-S 检验也证明了前面 χ^2 检验所获的结论是基本正确的。（3）内禀扁度 $q_0 = 0.2$

的微小偏离并不影响最终结论。

[参考文献]

- [1] Yuan Q R, Hu F X, Su H J, *et al.* Orientation of the field galaxies in the Local Supercluster [J]. AJ, 1997, 114: 1308.
- [2] Hu F X, Yuan Q R, Su H J, *et al.* The orientation of the spin vectors of bright field galaxies in the Local Supercluster and its implications [J]. ApJ, 1998, 495: 179.
- [3] Kashikawa N, Okamura S. Spatial orientation of spin vectors of galaxies in the Local Supercluster [J]. PASJ, 1992, 44: 493.
- [4] Flin P, Godlowski W. The orientation of galaxies in the Local Supercluster [J]. MNRAS, 1986, 222: 525
- [5] Von Mises R., Mathematical Theory of Probability and Statistics, Chapter IX (C0 and IX (E), New York: Academic Press, 1964

致谢

本文的研究工作是在袁启荣老师的悉心指导下完成的。先生渊博的学识、敏锐的洞察力、深邃的物理思想和严谨求实的研究作风给作者留下了深刻的印象，并将会给作者今后的研究工作带来深远的影响。本文的完成，凝聚了他大量的心血，在此表示由衷的感谢。

在本文研究工作期间，得到了黄克谅教授、李晓卿教授、平加仑教授、张航老师、陆建隆老师等的大力支持和帮助，在此表示由衷的感谢。