Università degli Studi di Padova
Facoltà di Scienze MM.FF.NN.
Dipartimento di Astronomia

Dottorato di Ricerca in Astronomia (XIII Ciclo)

Nuclear Mass Concentrations in Galaxies

Coordinatore: Ch.mo Prof. Cesare Chiosi
Supervisore: Ch.mo Prof. Francesco Bertola

Dottorando: Michele Cappellari

31 dicembre 2000

A mia moglie Giulia

Contents

Chapter 1

Introduction and Summary

1.1 Introduction

Starting from 1994, the availability of *Hubble Space Telescope* (HST) aberration-corrected observations turned out—once combined with proper dynamical modeling—to be so successful in studying supermassive Black Holes (BH) in galaxy nuclei, as to move the observers' main interest from proving their pure existence to construct a reliable "BH demography".

For instance, it was discovered that the BH mass correlates, although with large scatter, with some global properties of galaxies, first of all their luminosity (Kormendy & Richstone 1995; Magorrian et al. 1998), thus showing that the study of BH formation processes is strictly related to that of the formation of galaxies themselves.

The recent discovery of a new and considerably more accurate correlation between the BH mass and the central stellar velocity dispersion of the host galaxy $M_\bullet - \sigma$ (Ferrarese & Merritt 2000; Gebhardt et al. 2000) has given strong support to the above idea. It was shown, in particular, that the BH mass provides a record of the specific kind of process that formed the host galaxy. This is to say that, for a given galaxy bulge mass, the BH seems to be more massive when the host galaxy shows evidence of past strongly dissipative processes. As a consequence, by understanding how BH properties are related to those of their host galaxies, we may expect to learn much about the formation and evolution of both.

1.2 Thesis Outline

In this thesis I describe and discuss different techniques that can be used to detect BH in galaxy nuclei and to estimate their mass. Moreover, for a number of galaxies observed with HST, I analyze in detail the properties of their central regions, with the aim of identifying dynamical and/or photometric signatures of the presence of nuclear BHs as well of the process that led to their own formation in the context of the formation of the host galaxy itself.

Chapter 2: I make use of spectroscopic and photometric HST observations to investigate the nature of an ultraviolet (UV) flare we previously discovered in the nucleus of the normal elliptical galaxy NGC 4552. These observations give strong support to our hypothesis that this phenomenon has been produced by an accretion event onto the nuclear BH in this galaxy.

Chapter 3: I study by means of HST the gas kinematics in the bulge of the spiral galaxy NGC 2681. This object has a low central stellar dispersion and a correspondingly low BH mass has to be expected. The upper limit to the BH mass I determine for this object is consistent with the predictions from the $M_\bullet - \sigma$ relation, indeed. In addition, the absence of color gradients and spectral shape variations within this galaxy central regions ($R \lesssim 10''$), combined with the very steep photometric profile, suggests that the nucleus of this object formed through a rapid dissipative collapse.

Chapter 4: I construct a model of the expected bidimensional appearance of nuclear emission lines, as observed in ground-based long-slit spectra, as a function of the central BH mass. In particular, I show that some of the observed lines—apparently consisting of two kinematically distinct components—can actually be explained as due to the presence of a thin gaseous disk, rotating in the combined potential of the stellar potential and the nuclear BH. In doing so, I notice that this kind of study can be very useful to select good candidates for further HST observations intended to derive accurate BH mass estimates in spiral galaxies.

Chapter 5: I analyze high S/N spectroscopic observations, along five different slit positions, of the elliptical galaxy IC 1459, the prototype galaxy with a kinematically decoupled core. I present results based on self-consistent three-integral axisymmetric models of the stellar kinematics, obtained with Schwarzschild's numerical orbit superposition method. To fit the observed surface brightness an axisymmetric Multi Gaussian Expansion (MGE) parametrization for the three-dimensional stellar luminosity density has been adopted. The analysis of the internal dynamics of this object indicates that the observed counterrotation is produced by stars lying essentially in a thin disk and having a mass $\approx 1\%$ of the galaxy total mass. The intrinsic shape I derive for the decoupled core strongly favors one of the competing hypotheses for the formation of the nucleus of this galaxy, namely the external acquisition of counterrotating gas, which subsequently settled on a thin disk that later turned into stars. During the acquisition process, the gas could have contributed to the BH growth, an occurrence confirmed by the estimated BH mass, which turns out to be of the same order of magnitude as the counterrotating core.

Chapter 6: I develop an efficient, accurate and robust new algorithm, for the determination of the MGE parametrization starting from galaxy images. The MGE method is currently the one that can better reproduce the density distribution of real galaxies, i.e. composed of multiple photometric components. The new algorithm presented in this chapter makes the MGE method more generally and easily applicable to dynamical studies of galaxies. Here I apply this algorithm to the MGE fitting of a galaxy sample with HST photometry, which will be used in subsequent work.

Chapter 7: I present spectroscopic and photometric observations, from the ground and with HST, of a new kinematically decoupled core, that seems to rotate orthogonally to the disk, in the bulge of the spiral galaxy NGC 4698. I discuss some possible hypotheses for the formation of this object.

Appendix: I include here two papers not related to the main subject of this work (dealing with the study of the ultraviolet stellar components in galaxies) I have published while working on this thesis.

1.3 Introduzione

A partire dal 1994, la disponibilità di osservazioni prive di aberrazione dell'*Hubble Space Telescope* (HST)—opportunamente combinate con adeguati modelli dinamici—ha dato un impulso tanto rilevante allo studio dei buchi neri supermassicci, da orientare l'interesse degli osservatori dalla pura e semplice scoperta di singoli buchi neri nei nuclei galattici ad uno studio sistematico di carattere "demografico".

Si é capito quindi che la massa dei buchi neri é correlata, seppure non strettamente, con alcune proprietá globali delle galassie, prima fra tutte la luminositá (Kormendy & Richstone 1995; Magorrian et al. 1998). Queste osservazioni hanno fatto quindi intuire come lo studio dei fenomeni legati alla formazione dei buchi neri sia intimamente legato a quello della formazione delle stesse galassie.

La recente scoperta di una nuova correlazione, notevolmente piú accurata delle precedenti, tra la massa dei buchi neri e la dispersione di velocitá centrale della galassia ospite $M_\bullet - \sigma$ (Ferrarese & Merritt 2000; Gebhardt et al. 2000) ha ulteriormente rafforzato questa idea, mostrando come la massa dei buchi neri conservi memoria dello specifico tipo di processo che ha formato la galassia ospite. A paritá di massa della galassia, il BH sembra ad es. essere piú massiccio se si trova in un oggetto che mostra evidenza di passati processi fortemente dissipativi. Comprendendo come le proprietá dei buchi neri sono legate a quelle delle galassie ospiti, si puó dunque sperare di capire di piú sulla formazione ed evoluzione di entrambi.

1.4 Schema della tesi

In questa tesi sono illustrate e discusse diverse tecniche utili a rilevare la presenza di buchi neri nei nuclei delle galassie e a stimarne la massa. Passo poi ad analizzare le proprietà delle regioni nucleari di singole galassie, mettendo in luce le caratteristiche dinamiche e/o fotometriche che rivelano la presenza di buchi neri e che consentono di risalire al processo che ha portato alla loro formazione, nel quadro del processo di formazione della stessa galassia ospite.

Capitolo 2: Ho utilizzato osservazioni spettroscopiche e fotometriche con HST, per capire la natura di un *flare* ultravioletto (UV) da noi scoperto nel nucleo della galassia ellittica normale NGC 4552. Tali osservazioni rafforzano l'ipotesi che tale fenomeno sia dovuto ad un evento di acquisizione di materiale da parte del buco nero centrale in questa galassia.

Capitolo 3: Ho studiato con HST la cinematica del gas nel bulge della spirale NGC 2681 che, presentando una bassa dispersione di velocità stellare centrale, dovrebbe ospitare un buco nero di piccola massa. Il limite superiore alla massa del buco nero da me derivata é in effetti consistente con quanto predetto dalla relazione $M_\bullet - \sigma$. L'assenza di variazioni sia nel colore che nello spettro delle regioni centrali ($R \lesssim 10''$) di questa galassia, nonché il ripido profilo fotometrico fanno pensare che il nucleo di tale oggetto si sia formato durante un rapido collasso dissipativo.

Capitolo 4: Ho costruito un modello in grado di predire l'aspetto osservato delle righe di emissione in uno spettro bidimensionale ottenuto da terra al variare della massa del buco nero centrale. In particolare ho mostrato come le righe osservate in alcuni oggetti, che sembrano formate da due componenti cinematicamente distinte, possano in realtá essere spiegate come dovute alla presenza di un disco di gas sottile, rotante nel potenziale combinato delle stelle e del buco nero centrale. Ho messo in evidenza infine come tale tipo di studio sia molto utile a selezionare buoni candidati per ulteriori osservazioni HST, al fine di determinare accuratamente la massa dei buchi neri in galassie a spirale.

Capitolo 5: Ho analizzato spettri ad alto S/N in cinque angoli di posizione distinti della ellittica IC 1459, che rappresenta il prototipo di galassia con core cinematicamente disaccoppiato. Per questa galassia ho costruito modelli dinamici assisimmetrici del tutto generali—basati sul metodo di sovrapposizione di orbite di Schwarzschild—servendomi del potenziale ottenuto a partire dalla fotometria HST col metodo descritto nel capitolo 6. Lo studio della dinamica interna di questo oggetto indica che il core controrotante osservato é prodotto da stelle che formano praticamente un disco sottile, di massa pari a $\approx 1\%$ della massa totale della galassia. La forma intrinseca dedotta per il core rafforza una delle ipotesi in competizione circa la formazione del nucleo di questo oggetto, ovvero che la controrotazione sia dovuta ad acquisizione di gas, che successivamente si é depositata su un disco sottile ed ha quindi formato stelle. Durante l'acquisizione il gas puó aver contribuito a far crescere il buco nero centrale, che infatti risulta avere una massa dello stesso ordine di grandezza del core controrotante.

Capitolo 6: Ho sviluppato un nuovo algoritmo, molto efficiente, accurato e robusto, per la determinazione della parametrizzazione *Multi Gaussian Expansion* (MGE), a partire dall'immagine di una galassia. Il metodo MGE é attualmente quello in grado di meglio descrivere la distribuzione di densitá di galassie reali, composte da diverse componenti fotometriche. Il nuovo algoritmo, presentato in questo capitolo, rende quindi il metodo MGE piú generalmente e facilmente applicabile a studi dinamici di galassie. Ho applicato questo algoritmo al fit MGE di un campione di galassie con fotometria HST, che sará utilizzato in un lavoro seguente.

Capitolo 7: Presento osservazioni spettroscopiche e fotometriche, da terra a con HST, di un nuovo core dinamicamente disaccoppiato, che sembra ruotare ortogonalmente al disco, nel bulge della galassia a spirale NGC 4698. Discuto alcune possibili ipotesi per la formazione di questo oggetto.

Appendice: Riporto due lavori che ho pubblicato durante questo lavoro di tesi, anche se non direttamente legati alla tematica principale in quanto incentrati sullo studio delle popolazioni stellari delle galassie nell'ultravioletto.

Bibliography

Ferrarese, L. & Merritt, D. 2000, ApJ, 539, L9

Gebhardt, K., et al. 2000, ApJ, 539, L13

Kormendy, J. & Richstone, D. 1995, ARA&A, 33, 581

Magorrian, J., et al. 1998, AJ, 115, 2285