Astrophysical Analogies:

From Quasars to Pulsars

Podobnosti v astrofyzice:

Od kvazarů k pulzarům

This volume contains study materials in English and Czech. The text was prepared in the framework of lecture notes on astrophysics at the Astronomical Institute, Charles University Prague. Supplementary information, colour illustrations and updates are available on the *World Wide Web.*

Tento spis obsahuje studijní materiály v anglickém a českém jazyce. Text vznikl na Astronomickém ústavu Univerzity Karlovy v Praze, a to v rámci přípravy poznámek k přednáškám z astrofyziky. Doplňující informace, barevné ilustrace a novinky jsou dostupné pomocí *World-Wide-Web.*

Language is only the instrument of science, and words are but signs of ideas.

Samuel Johnson

Preface

Laymen interested in astronomy are, quite naturally, fascinated by unimaginably huge scales of time and the distances which can be found on each step of this science discipline. But professional astronomers also are so attracted by their research that they devote most of their time and thoughts to studies of cosmic phenomena. After a more careful look one quickly realizes that "large" and "small" have only a relative meaning in astronomy. Extremely distant, dense, or fast-moving objects may appear rather unusual from the viewpoint of our everyday limited experience but this does not exclude their possible existence. On the contrary, the non-existence of certain theoreticaly predicted objects or phenomena would be even more puzzling. But we wish to stress still another, more subtle mystery which one meets when properties of seemingly different and unrelated objects are explored in greater detail. It is scaling. An appropriate change of the scale by many orders of magnitude can bring us from one type of object to another. This fact has been extensively investigated in the cosmological context of the large-scale structure of the Universe which is created by thousands of galaxies.

Our present text is focused on several selected astrophysical topics. Similarities and differences among powerful active galactic nuclei, as for example quasars, are discussed. Later, these extragalac-

Předmluva

Nezasvěcení zájemci o astronomii bývají, vcelku pochopitelně, unešeni nepředstavitelně obrovskými škálami času a délek, s nimiž se lze v tomto vědním oboru setkat na každém kroku. Avšak i profesionální astronomové jsou svým bádáním natolik zaujati, že většinu svého času a myšlenek věnují studiu vesmírných dějů. Při pozornějším pohledu si rychle uvědomíme, že „velké“ a „malé“ mají v astronomii pouze relativní význam. Nesmírně vzdálené, husté nebo rychle se pohybující objekty se mohou zdát značně neobvyklými z hlediska naší každodenní, omezené zkušenosti, avšak to nijak nevylučuje jejich možnou existenci. Ukazuje se, že naopak nepřítomnost určitých teoreticky předpovězených objektů či jevů by znamenala mnohem větší záhadu. Chceme však zdůraznit ještě jinou, jemnější pozoruhodnost, na niž narážíme při podrobnějším zkoumání zdánlivě odlišných a spolu nesouvisejících objektů. Jde o škálování. Vhodná změna měřítka o mnoho řádů nás může přivést od jednoho druhu objektů k docela jinému. Tato skutečnost se rozsáhle rozebírá v kosmologických souvislostech velkorozměrové struktury vesmíru, již tvoří tisíce galaxií.

V našem textu se zaměříme na několik vybraných oblastí astrofyziky. Probereme podobnosti a odlišnosti mezi mohutnými aktivními galaktickými objekty, jakými jsou například kvazary. V daltic objects are contrasted to objects on much smaller stellar scales, e.g. pulsars, with which they share some properties. Our subject belongs by tradition to the sphere of high-energy astrophysics but we wish to emphasize the importance of exploration within the context of all available evidence. It has been realized during recent decades of astrophysical research that neglect of information from some wavebands often causes dangerously misleading conclusions about the object under investigation. The traditional division according to characteristic energy or wavelength is not always useful and meaningful. In other words, fictitious boundaries of high- and low-energy astronomy are often rather smooth. Even those objects and effects which belong to the domain of high energy by their nature must also be studied at low energy if our understanding is to be as complete as possible. In this context, analogies between emission-line spectra of active galactic nuclei and gaseous nebulae in the Galaxy are particularly evident, indicating that physical processes in these otherwise distinct objects are related.

The text starts by discussing active galactic nuclei. The authors support the opinion that observational evidence is primary in astrophysics, as in other branches of physics. Relevant observational facts are thus discussed in the introductory part. Subsequent sections are devoted to more theoretical considerations, in particular the accretion process (Part II) and its applications at different scales, magnetohydrodynamic effects and various electromagnetic processes with particles (Part III). The remarkable phenomenon of cosmic jets is the subject of Part IV.

ším porovnáme tyto extragalaktické zdroje s objekty na mnohem menších, hvězdných škálách, např. pulzary, jež s nimi sdílejí některé společné vlastnosti. Naše téma se tradičně řadí do astrofyziky vysokých energií, ale my bychom si přáli zdůraznit význam výzkumu ve společném kontextu všech dostupných údajů. Jedním z výsledků posledních desetiletí astrofyzikálního výzkumu je poznání, jak nebezpečně zavádějící závěry mohou o studovaném objektu vzniknout, když se nedbá na informace z některého oboru vlnových délek. Tradiční rozdělování podle charakteristické energie nebo vlnové délky není vždy užitečné a smysluplné. Vyjádřeno jinými slovy, pomyslné hranice, vymezující astronomii vysokých energií od astronomie nízkých energií, bývají mnohdy velice nezřetelné, a i ty objekty a jevy, jež svou podstatou náleží do vysokoenergetického oboru, je třeba studovat též v oblasti nízkých energií, má-li být naše porozumění co nejúplnější. V této souvislosti je obzvlášť patrná podobnost emisních spekter aktivních galaktických jader a plynných mlhovin uvnitř Galaxie, svědčící o příbuzných fyzikálních podmínkách v těchto jinak zcela rozličných objektech.

Předložený text začíná diskuzí o aktivních galaktických jádrech. Autoři zastávají názor, že poznatky z pozorování jsou základem astrofyziky, tak jako je tomu i v ostatních částech fyziky. Z toho důvodu je příslušným pozorovacím skutečnostem věnována úvodní část. Následující části se věnují teoretičtějším úvahám, jmenovitě akrečnímu procesu (Část II) a jeho aplikacím na rozličných škálách, magnetohydrodynamickým jevům a různým elektromagnetickým částicovým procesům (Část III). Pozoruhodné kosmické výtrysky jsou námětem Části IV.

These notes have been based on lectures for undergraduate students of astronomy and astrophysics at the Astronomical Institute of Charles University Prague. The level of explanations stands in between elementary physics textbooks and more advanced treatments on specialized astrophysical topics. We would like to help our readers accomplish a step to this higher level of professional articles and communications. Basic processes which involve high energy particles in the cosmic environment are described and explained. Applications to both extragalactic, presumably very distant and massive cosmic sources, and to stellar-mass objects in the Galaxy are discussed. The aim of these lectures is to provide an introduction to the subject rather than a complete treatment of the problem. Knowledge of the introductory physics courses at the university level is our only assumption.

Základem těchto skript byly přednášky, určené studentům astronomie a astrofyziky na Astronomickém ústavu Univerzity Karlovy v Praze. Úroveň výkladu jsme zvolili na pomezí základních učebnic fyziky a pokročilejších pojednání na úzce zaměřená astrofyzikální témata. Chtěli bychom našim čtenářům usnadnit krok k této vyšší úrovni odborných článků a sdělení. Ve skriptech jsou popsány a vysvětleny nejdůležitější procesy ovlivňující vysokoenergetické částice v kosmickém prostředí. Zkoumané procesy se uplatňují jak v extragalaktických, patrně nesmírně vzdálených a hmotných kosmických zdrojích, tak i v některých objektech se stelárními hmotnostmi uvnitř Galaxie. Cílem přednášek je úvod do tématu, nikoli jeho vyčerpávající přehled. Jediným naším předpokladem je znalost úvodního kursu fyziky na univerzitní úrovni.

Numerous important topics have not been included in the text and the interested reader is referred to the relevant literature. We have supplemented the contents with references to more specialized topics, and the bibliography which is recommended for further reading. However, this text is not a review article and we have not intended to give a complete list of literature. Instead only selected contributions that make location of other works easier are presented. Besides these, some older discovery works with particular relevance for the history are also mentioned.

Četná, byť důležitá témata nejsou v textu uvedena a čtenář s hlubším zájmem o studovanou problematiku by se měl obrátit na příslušnou literaturu. Obsah jsme doplnili citacemi prací na specializované náměty a bibliografií doporučené literatury. Tento text však nemá být přehledovým článkem, a neměli jsme proto v úmyslu sestavit úplný seznam literatury. Namísto toho uvádíme pouze vybrané příspěvky, které usnadňují vyhledání dalších prací. Kromě nich jsou zmíněny též některé starší objevitelské práce, které jsou obzvláště zajímavé z historického hlediska.

Researchers in this field use a lot of specialized terminology and acronyms which are uncommon in other areas of physics and for which no translation to

Odborníci používají v tomto oboru specializované názvosloví a zkratky, které nejsou obvyklé v ostatních oblastech fyziky a pro něž nebyl dosud zaveden rovnothe Czech language has been adopted. For this reason, the English and the Czech versions of the text are both presented and an enthusiast can learn physics and the relevant terminology simultaneously. Textual parts of the two versions are assumed to express equivalent ideas though they need not always be completely identical from the grammatical viewpoint. Should we force the language the text would be unacceptably rigid and unnatural. Nevertheless, it is the language of mathematics which appears common to all. The reader will surely appreciate, as the author did, that the uniform look of all formulae accompanies the entire volume!

The author acknowledges support during work on this text from the Grant Agency of Charles University in Prague (ref. 229/1996) and from Wenner-Gren Center Foundation in Göteborg.

cenný překlad do českého jazyka. Z tohoto důvodu uvádíme text v české i anglické podobě, takže se zájemce může poučit o fyzice i patřičné terminologii zároveň. Textová část má v obou verzích vyjadřovat stejné myšlenky, i když z gramatického hlediska nemusí být tyto dvě formy vždy zcela přesně totožné. Text by byl nepřijatelně tuhý a nepřirozený, kdybychom se snažili jazyk znásilňovat. Nicméně, jazyk matematiky je právě tím, jenž se jeví všem společný. Čtenáři nepochybně ocení, tak jako to ocenil i autor, že pouze jediná podoba veškerých vzorců doprovází celý tento spis!

Autor děkuje Grantové agentuře Univerzity Karlovy v Praze (ref. 229/1996) and Wennerově-Grenově nadaci v Göteborgu za podporu během práce na tomto textu.

Contents/Obsah

* Asterisk identifies chapters that can be skipped on the first reading. These chapters discuss supplementary topics and they can thus be studied later.

* Hvězdička označuje kapitoly, které lze při prvním čtení vynechat. V těchto kapitolách se diskutují rozšiřující témata, a lze je proto studovat později.