

Ministerstvo kultury ČSR

HVĚZDNÝ VESMÍR

díl I. a II.

Autoři:

Ing. Marcel Grün
Prof. Oldřich Hlad
Prac. fyz. Petr Sojka

Výtvarník:

Božena Šimková

Vyrobil:

KRÁTKÝ FILM PRAHA
Diafilm 1976

Filmové laboratoře Barrandov

I. ÚVOD

Dvojdílný diafilm "Hvězdný vesmír I a II", podobně jako diafilm Ing. Grüna "Sluneční soustava" (1975) je určen zejména hvězdárnám, planetáriím, astronomickým kroužkům a lektorům Socialistické akademie, ale též kulturním domům a střediskům.

K jeho vydání došlo z více důvodů - má plnit více funkcí:

1. Diafilm obsahuje 70 převážně barevných obrazů, vyrobených z pečlivě vybraných, mnohdy širšímu okruhu lektorů nedostupných materiálů. Spolu s diafilmem "Sluneční soustava" se dostává do rukou lektorů 110 obrazů. Zkušený přednášející není nucen použít celý diafilm s textem. Diapás může být rozstříhán a lektor (či učitel) může použít jen ty diapozitivy, které v přednášce (vyučovací hodině) potřebuje.

2. Již po mnoho let volají zejména vedoucí astronomických kroužků, ale i učitelé po textech - jakési učebnici pro astronomické kroužky. Ta dosud nevyšla a ještě asi dlouho nevyjde. Tento soubor s texty ji má - i když jistě jen částečně - nahradit.

3. V neposlední řadě je možno diafilmy i s textem použít klasickým způsobem - číst k obrazům texty, či text přehrát na pásku a promítat k němu obrázky (třeba automaticky, jako to umožňuje diaprojektor Aspektomat s adaptérem na diapásky).

Autoři.

Praha, listopad 1976.

II. TEXTY K OBRAZŮM

Labut
Obraz 1 - 5 - Mlhovina NGC 7000 - Severní Amerika;
Plejády; kulová hvězdokupa M 13; pla-
netární mlhovina M 57; NGC 4565 ve
Vlasy Bereniky *kyra*

Malý výběr celé řady nejruznějších objektů, které oko ozbrojené dalekohledem může spatřit na obloze. Přes zdánlivou rozdílnost mají jedno společné: představují různé druhy hmoty, s níž se setkáváme v Galaxii a celém vesmíru. Takových útvarů nalezneme na obloze desítky, ba i stovky. Mlhoviny, které se vyskytují v celé naší Galaxii, tvoří jakousi zásobárnu hmoty, z níž potom vznikají hvězdy. Ty ovšem nevznikají samostatně, nýbrž po celých skupinách, ve kterých se v době svého hvězdného mládí zdržují. Příklady těchto objektů jsou například tzv. asociace anebo i otevřené hvězdokupy, z nichž nejznámější jsou právě Plejády (obr. 2).

V další části diafilmu si ukážeme, že existují ještě jiné druhy rozlehlých skupin hvězd - hvězdokup, tzv. hvězdokupy kulové. Od hvězdokup otevřených se liší prakticky všemi svými vlastnostmi - stářím, rozměry, počtem hvězd a zejména polohou v Galaxii. Jedno mají oba typy hvězdokup společné: skládají se z hvězd, které vznikly, trvají, přičemž vydávají nejruznější druhy elektromagnetického záření, a posléze zanikají. Během svého vývoje se mění, zmenšují, zvětšují, dochází ke změnám povrchové teploty, mění se jejich jasnost. V jednom stádiu vývoje mohou hvězdy kolem sebe vytvořit i podobnou kulovou slupku rozžhavených plynů, jako je zachycena na obr. 4. V tomto úvodu se nebudeme podrobněji zabývat jednotlivými objekty z úvodní série čtyř obrázků, protože na ně přijde řada později.

Musíme si však říci něco o jejich umístění v Galaxii. Nejprve Galaxie samotná - obří útvar, složený z desítek až stovek miliard hvězd. Kromě hvězd obsahují galaxie i všechny typy útvarů z první čtveřice obrázků: mlhoviny svítící i temné, prachové, plynné. Nalezneme v nich otevřené i kulové hvězdokupy, pozůstatky po zániku hvězd - planetární mlhoviny. V poslední části diafilmu si ukážeme, že tvary galaxií mohou být nejrůznější. Pro naše potřeby jsme vybrali jednu typickou galaxii - NGC 4565 ze souhvězdí Vlasu Bereniky (obr. 5), která se k nám natačí bokem. Na této fotografii je velmi dobře patrný tmavý pás hmoty ve formě prachových a plynových mlhovin, který leží v rovině rovníku galaxie. Vidíme tedy, že mlhoviny se v galaxii soustřeďují v rovině jejího rovníku. Hvězdy v hvězdokupách otevřených se mohou nacházet v oblastech, které nejsou od roviny galaktického rovníku příliš vzdáleny. Ostatní hvězdy, které se vyskytují jednotlivě, vyplňují celý prostor galaxie, který má tvar obrovského disku s vystouplým jádrem uprostřed.

Obraz 6 - Řez galaxií

Na grafu vidíme řez galaxií, která je ve stejné poloze, jako byla na předchozím obrázku galaxie NGC 4565. O umístění mlhovin v rovině galaktického rovníku jsme již mluvili. Mlhovinu nám zde představuje objekt NGC 7000 - Severní Amerika. Rovněž tak jsme si již umístili otevřenou hvězdokupu Plejády a planetární mlhovinu M 57. Dosud jsme však nemluvili o tom, kde jsou v galaxii umístěny kulové hvězdokupy - bylo to způsobeno tím, že na předchozí fotografii se žádná nezachytila. Ve skutečnosti totiž kulové hvězdokupy vyplňují celý prostor kolem galaxie. Na

grafu je máme znázorněny žlutými kolečky. Můžeme tedy říci, že každý objekt v galaxii má své poměrně přesně vymezené místo.

Podle typu objektů potom hovoříme o tzv. plochém, přechodném, diskovém nebo kulovém podsystému v naší Galaxii. Do plochého podsystému patří všechny mlhoviny, ať temné či svítící. V přechodném podsystému se nalézají otevřené hvězdokupy. Diskový podsystém je tvořen hvězdami (naše Slunce je také jednou zcela obyčejnou hvězdou ze zhruba 150 miliard hvězd v naší Galaxii). Prostor, který zaujímá naše Galaxie, vyplňují potom objekty kulového podsystému - kulové hvězdokupy.

Na grafu si ještě povšimněte jedné věci - vyznačené polohy Slunce. Leží poměrně daleko od středu Galaxie, v okrajových částech, jejichž vzdálenost činí asi 30 tisíc světelných let od středu Galaxie. Všimněte si tedy, že našemu Slunci a tím méně ani naší Zemi není přiřknuta žádná výjimečná role v Galaxii, natož pak ve vesmíru.

Obraz 7 - Mléčná dráha v souhvězdí Kentaura

Pouhým okem vidíme na severní obloze asi 3 000 hvězd. Všechny tyto hvězdy pochopitelně náleží do naší Galaxie. Na letní obloze potom nalezneme velmi nápadný stříbritý pás Mléčné dráhy. Teprve po vynálezu dalekohledu se zjistilo, že Mléčná dráha je tvořena nesmírným množstvím velmi slabých hvězd, jejichž světlo se slévá a vytváří dojem celistvého pásu. Podstata Mléčné dráhy však nebyla dlouho známa. Ve skutečnosti jde o jev způsobovaný právě polohou Slunce v naší Galaxii. Na minulém obrázku jsme viděli, že naše Slunce leží v okrajových částech disku Galaxie. Pohlédneme-li tedy kolmo k rovině disku, uvidíme hvězd poměrně málo, zato při pohledu

přímo v rovině disku bude hvězd mnohem více a tím právě vzniká dojem Mléčné dráhy. Musíme si ovšem uvědomit, že i toto nesmírné množství hvězd jsou hvězdy z relativně blízkého okolí, a že: ke středu naší Galaxie dohlédnout nemůžeme. Vadí nám v tom zejména rozsáhlé mlhoviny, rozprostírající se v rovině Galaxie a absorbující světlo objektů v galaktickém centru. Teprve v poslední době se za pomoci radiových vln podařilo proniknout až do těsné blízkosti galaktického jádra.

Obrazy 8, 9, 10 - Srovnání velikostí hvězd

Při pohledu na oblohu vidíme některé hvězdy jasné, některé slabé. Tento údaj nám však neříká nic o skutečných průměrech hvězdy. Změřit skutečný průměr hvězdy je nepředstavitelně obtížné. I největšími dalekohledy se hvězdy pozorují jen jako bezrozměrné body. Teprve v poslední době se podařilo vyfotografovat kotouček obří hvězdy Betelgeuze v souhvězdí Oriona. Průměr obrázku hvězdy činil pouze 0,05". Veškeré naše znalosti o průměrech hvězd byly tedy získány jinými cestami, neboť atmosféra jen výjimečně dovoluje pozorovat plošné podrobnosti objektů, jejichž průměr je menší než 1".

Nejpřesnější způsob, jímž se dá měřit průměr hvězd, jsou tzv. zákrytové proměnné hvězdy - dvojice hvězd, které obíhají kolem sebe v tak orientované rovině, že se při oběhu vzájemně zakrývají. Jejich rychlost na dráze můžeme přímo zjistit ze spektra pomocí Dopplerova jevu. Z doby trvání vzájemného zákrytu a známé rychlosti pak přímo určíme rozměry hvězdy. Rozměry ostatních hvězd lze pak určit na základě analogických vlastností, které zjišťujeme například studiem spektra.

Série tří obrázků uvádí srovnání velikostí hvězd - od největší známé hvězdy ϵ Aurigae přes obří hvězdu Rigel ze souhvězdí Oriona až ke Slunci, které mezi hvězdami je svojí velikostí spíše trpaslíkem. Vždyt například průměr ϵ Aurigae je 3 000krát větší než průměr Slunce. Ve sluneční soustavě by sahala až za dráhu Saturna. Naprostá většina hvězd v Galaxii má ovšem rozměry podobné našemu Slunci, najdou se však i hvězdy podstatně menší - Barnardova Šipka - hvězda s největším vlastním pohybem, nebo Sirius B - průvodce nejjasnější hvězdy zimní oblohy. Nejmenší známá hvězda (viz obr. 25) má průměr dokonce jen 1700 km.

Obraz 11 - Hertzsprungův - Russelův diagram

V prvních desetiletích tohoto století vzrůstá objem prací, které se zabývají hvězdnou statistikou - vztahy mezi spektrem, jasností, průměrem a hmotou hvězdy. Pro tyto účely je ovšem nutné zavést jinou jasnost hvězdy než tu, kterou vidíme při pouhém pohledu na oblohu. Tam jsou různé jasnosti hvězd zkresleny jejich rozdílnou vzdáleností. Jasnost hvězdy, tak jak ji pozorujeme na obloze, je udávána v jednotkách zvaných magnituda. Velikost těchto jednotek byla zvolena takovým způsobem, že hvězda o 5^m jasnější je právě stokrát jasnější než hvězda druhá. Poměr jasností na rozdíl jedné magnitudy je tedy 2,51. Vzájemný vztah mezi magnitudou a jasností hvězdy je dán tímto vztahem:

$$m_1 = m_2 + 2,5 \log \frac{J_2}{J_1} ,$$

kde $m_{1,2}$ jsou magnitudy hvězd,

$J_{1,2}$ - jasnosti hvězd.

Tento vztah však neuvazuje rozdíl v jasnostech, způsobený různou vzdáleností hvězd od nás. Proto byla zavedena tzv. absolutní magnituda (značka M), která udává jasnost hvězdy, jak by se nám jevila, kdyby byla umístěna ve vzdálenosti 10 parseků. Vztah mezi zdánlivou a absolutní magnitudou je

$$M = m + 5 - 5 \log r,$$

kde r = vzdálenost hvězdy od nás.

Při studiu závislosti absolutní magnitudy hvězd na jejich spektru se zjistilo, že hvězdy plochu uvažovaného grafu nevyplňují celou, ale že se soustřeďují do několika oblastí. Z levého horního do pravého dolního rohu se táhnou hvězdy v tzv. hlavní posloupnosti. Od ní se potom v různých místech odštěpují větve obrů a větví veleobrů. V levém dolním rohu je pak malá oblast vyplněná zvláštním typem hvězd - bílými trpaslíky. Hvězdy v různých částech H-R diagramu se liší svými fyzikálními charakteristikami a - což je pro nás důležité - i svým stářím. Jak se mění poloha hvězdy v H-R diagramu v závislosti na jejím stáří, si ukážeme později na obr. 17. Uvedme si ještě, že naše Slunce se nalézá na hlavní posloupnosti, v její spodní části; v místech, která odpovídají jeho absolutní jasnosti $+4,74^M$.

Obraz 12 - Planckův zákon

S rozvojem kvantové mechaniky se zkoumalo záření nejen hvězd, ale všech zářících těles. Zjistilo se, že záření hvězd lze s poměrně malou chybou popsat Planckovým zákonem, který popisuje záření tzv. černého tělesa. Z křivek, které jsou na grafu vyznačeny

pro různé teploty zářícího tělesa (jsou získány výpočtem podle uvedeného vzorce), je vidět, že s rostoucí teplotou se jednak absolutně zvyšuje množství energie vyzařované tělesem (např. hvězdou), jednak se maximum vyzařené energie posouvá stále do kratších vlnových délek. Pro naše Slunce, jehož povrchová teplota je o něco méně než 6 000 K (viz červená křivka), leží maximum vydávané energie v oblasti 550 nm. Pro hvězdy s vyšší povrchovou teplotou bude toto maximum ležet v oblasti kratších vlnových délek (modrá část spektra) a naopak. Vidíme zde tedy i souhlas s H-R diagramem, který vznikl z pozorování, kde v levé části máme modré hvězdy, což odpovídá vysokým teplotám a tedy i vysoké svítivosti. Vpravo dole jsou pak hvězdy červené s nízkou povrchovou teplotou a tedy i nepatrnou svítivostí.

Planckův zákon popisuje dokonale záření černého tělesa. Při jeho použití u hvězd se dopouštíme určitého zjednodušení, když nebereme v úvahu vliv absorpčních a emisních čar ve spektru. Tyto čáry ve spektrech hvězd nebo jiných zdrojů vznikají pohlcováním světelných kvant po přesně určených vlnových délkách elektrony kroužícími kolem atomových jader. Pro tyto odchylky není křivka rozdělení energie ve spektru hvězdy plynulá, jak by odpovídalo Planckovu zákonu, ale jsou na ní různé nerovnosti způsobené popsáním jevem. O hvězdách proto mluvíme jako o tzv. šedém tělese.

Obraz 13 - Mlhovina Laguna - NGC 6523

U grafu, znázorňujícího řez Galaxií, jsme uváděli, že v rovině galaktického rovníku jsou koncentrována rozsáhlá mračna plynových a prachoplynových mlhovin. V blízkosti mnohých mlhovin jsou jasné, žhavé hvězdy, jejichž ultrafialové záření excituje atomy plynu, které potom

září v oblasti viditelného světla. Vyzařuje-li hvězda záření s dostatečně malou vlnovou délkou, může toto záření plyn ionizovat.

Protože mlhoviny se skládají zejména z vodíku (i když jsou zastoupeny ostatní prvky), hovoříme potom o oblastech neutrálního vodíku - H I, a o oblastech ionizovaného vodíku - H II. Atomy ionizovaného vodíku (a jiných plynů) mají vyšší kinetickou energii, a jelikož tlak plynu je určen kinetickou energií atomů, panuje v H II oblastech vyšší tlak, než v oblastech H I.

Je nutné si ovšem uvědomit, že v oblastech, kde hustota dosahuje asi $10 - 10\,000$ atomů/cm³, jsou tlaky plynu z pozemského hlediska zanedbatelně malé. Přesto díky rozdílu tlaků jsou H I oblasti stlačovány oblastmi H II. Jakmile hustota plynu v uvažované oblasti přestoupí kritickou hranici a je-li k dispozici dostatečně velká hmota plynu, začne se plyn v H I oblastech samovolně smršťovat vlastní gravitací. Pro hustotu 10 atomů/cm³ je kritická hmota $10\,000$ hmot slunečních, kdežto při hustotě $10\,000$ atomů/cm³ je to již pouze 15 hmot slunečních. Z těchto samovolně se smršťujících oblaků plynu vznikají potom zárodky hvězd.

Fotografie zachycuje mlhovinu zvanou Laguna se skupinou žhavých modrých hvězd v jejím nitru. Velmi dobře jsou patrná rozhraní mezi H I a H II oblastmi, v nichž ionizaci způsobilo krátkovlnné ultrafialové záření hvězd v nitru mlhoviny.

Obraz 14 - Mlhovina M20 - Trifid

Handwritten signature

V některých mlhovinách dostoupilo gravitační smršťování hustých oblaků plynu tak daleko, že na fotografiích jsou tyto oblasti viditelné jako malé

tmavé kulové útvary. Na fotografii mlhoviny Trifid jsou 3 tyto útvary (zvané globule) označeny šipkami. Rozměry každého z těchto útvarů jsou mnohokrát větší, než rozměry sluneční soustavy. Mnohdy může průměr globule dosáhnout až 1 světelného roku. Při gravitačním smršťování plynu v globuli se plyn zahřívá - smršťování je totiž adiabatické. Při tomto smršťování může teplota v nitru globule dosáhnout až několika miliónů stupňů. Celá globule potom začíná zářit vlastním zářením - zejména v infračervené oblasti.

Jakmile globule dostoupí zhruba tohoto stadia, můžeme již hovořit o vzniku tzv. protohvězdy - poměrně kompaktního tělesa, nalézajícího se uvnitř dosud velmi rozsáhlé prachoplynové mlhoviny. Teplota v nitru protohvězdy je však dosud příliš malá, aby se zapálily termonukleární reakce. Protohvězda tedy stále září pouze na úkor své vlastní gravitační energie - tedy díky svému smršťování.

Obraz 15 - η Carinae

Objekt, který je nazýván η Carinae, je v přechodném stadiu mezi protohvězdou a hvězdou normální. Jakmile totiž dalším smršťováním protohvězdy stoupne teplota v jejím nitru asi na 4 - 5 miliónů Kelvinů, zapalují se první termonukleární reakce. Jako palivo slouží lehké prvky deuterium, lithium a bor. Těchto prvků je ovšem v mlhovině obsaženo velmi málo, proto i jejich obsah v protohvězdě je nepatrný. Jaderné reakce, založené na jejich hoření, trvají jen dobu poměrně krátkou. Přesto je to doba ve vývoji hvězdy velmi důležitá. Vlivem záření, které vychází z nitra protohvězdy k jejímu povrchu, nastává v určitých oblastech rovnováha mezi přitažlivou silou působící dovnitř a tlakem záření působícím ven. Pro vnitřní vrstvy proto-

hvězdy to tedy znamená přerušení období gravitační kontrakce a období relativního klidu. Vnější vrstvy v místech, kam již nedosáhne záření v dostatečné intenzitě, zatím pokračují v gravitační kontrakci a zvyšují hustotu hmoty v centrálních oblastech mlhoviny. V okamžiku vynoření lehkých prvků jaderné reakce končí, tlak záření klesne a opět nastává gravitační kontrakce. Díky zvýšené hustotě hmoty v centru mlhoviny probíhá i zvyšování teploty poměrně rychle a během několika desítek tisíc let naroste teplota v centrálních oblastech až na 10 - 12 milionů Kelvinů. V tomto okamžiku nastávají vhodné podmínky pro zapálení základní termonukleární reakce - přeměnu vodíku na helium.

Obraz 16 - Mlhovina M 42

mlhva mlhovina ORI

O tom, že jev popsáný v textu k předcházejícím dvěma obrazům skutečně probíhá, se můžeme přesvědčit pozorováním velké mlhoviny v Orionu M 42. Tato rozsáhlá prachoplynová mlhovina má totiž ve svém centru čtveřici žhavých hvězd zvanou Trapez. Na této čtveřici je pozoruhodná vzájemná konfigurace hvězd. Vlivem gravitačních sil se totiž hvězdy v této konfiguraci nemohou dlouho udržet a během astronomicky velmi krátké doby - zhruba 100 milionů let - se musí rozběhnout do okolního prostoru. Skutečnost, že hvězdy dosud v této konfiguraci pozorujeme, je důkazem toho, že se jedná o objekty mladší než 100 milionů let. Porovnáme-li tuto dobu se skutečnou dobou života hvězd, která činí 1 až 10 miliard let (někdy i více), vidíme, že máme před sebou čerstvě vzniklé hvězdy. Kromě této čtveřice je uvnitř mlhoviny ještě celá řada objektů podobných globulím. V r. 1975 se navíc při infračervených měřeních objevila trojice objektů o teplotě zhruba 700 -

1000 °C, které tam před dvěma roky nebyly - s největší pravděpodobností se jedná o protohvězdy v okamžiku hoření prvotní termonukleární reakce. Můžeme tedy Velkou mlhovinu v Orionu označit za místo, kde se i v současnosti rodí hvězdy.

Obraz 17 - Graf vývoje hvězdy

Na tomto grafu jsou shrnuty všechny údaje, které jsme si pověděli u předchozích snímků. Základem grafu je H - R diagram, na jehož svislé ose jsou nanášeny absolutní magnitudy a na ose vodorovné spektrální třídy, což je ekvivalentní povrchovým teplotám hvězdy. V grafu je vyznačena hlavní posloupnost, na níž jsou soustředěny všechny hvězdy, v jejichž nitru probíhá normální jaderná reakce přeměny vodíku na helium. Kromě této posloupnosti jsou znázorněny též posloupnosti obrů a veleobrů, jakož i skupina bílých trpaslíků. Sledujme nyní vývoj hvězdy a s ním související změnu polohy hvězdy v H - R diagramu.

Ve fázi označené gravitační kontrakce se hvězda pohybuje vodorovným směrem zprava doleva; znamená to tedy, že celkové množství vyzařené energie zůstává konstantní, protože přírůstek jednotky plochy protohvězdy je vyrovnáván snižováním rozměrů.

V okamžiku zapálení termonukleárních reakcí přeměny vodíku na helium hvězda dosedá na hlavní posloupnost (místo, kam se dostane, je určeno její hmotou - čím vyšší hmotu, tím více vlevo nahoře se hvězda umístí), kde stráví většinu svého života bez většího pohybu. Pro naše Slunce je doba pohybu na hlavní posloupnosti asi 9 miliard let. Pro hvězdu 10x hmotnější bude tato doba kratší - zhruba 800 milionů let. Poloha hvězdy na H-R diagramu se začne měnit teprve tehdy, když se vyčerpá

zásoba vodíku v jádře hvězdy, kde probíhají termokleární reakce (viz obr. 22). Tehdy se průměr hvězdy začíná zvětšovat - hvězda se dostává na posloupnost obrů a (postupem doby) veleobrů. Na těchto místech se ovšem udrží dobu velmi krátkou (ve srovnání se svým dosavadním životem) a po vyčerpání zásob jaderného paliva se přesouvá do oblasti bílých trpaslíků vlevo dole.

Obrazy 18, 19 a 20 - Slunce, sluneční korona, sluneční protuberance

Vývoj hvězdy, který jsme nyní popsali, můžeme ve skutečnosti sledovat pouze za pomoci výpočtů na elektronickém počítači. Celá doba lidské civilizace totiž nestačí k tomu, abychom byli schopni zachytit některé změny ve vývoji hvězd (s výjimkou úkazů jako jsou novy apod.).

Detailnímu zkoumání můžeme navíc podrobit pouze jednu hvězdu - naše Slunce. U něho lze studovat detaily povrchu, vlastnosti sluneční atmosféry, tzv. korony, sledovat magnetické pole Slunce a měřit proudy částic, které k nám od Slunce směřují. Ani u Slunce však nemůžeme přímo sledovat jeho nitro a jsme odkázáni pouze na výpočty.

Na povrchu Slunce jsou nejnápadnějšími útvary rozsáhlé tmavé skvrny - chladnější místa na slunečním povrchu - fotosféře. Teplota povrchu Slunce je asi 5 700 Kelvinů, kdežto teplota skvrn pouze 4 200 K. Velikost a počet skvrn se mění s časem - hovoříme o tzv. jedenáctileté periodě sluneční činnosti (obr. 18).

S intenzitou sluneční činnosti souvisí i tvar sluneční atmosféry - korony. Na Zemi lze koronu sledovat pouze ve vzácných okamžicích úplného slunečního

zatmění, jinak je její slabý jas přezářen rozptýleným světlem oblohy. Teprve v poslední době lze koronu studovat bez omezení atmosféry z umělých družic.

Jedním z nejmonumentálnějších útvarů sluneční činnosti jsou protuberance, rozsáhlé výtrysky žhavého vodíku, sahající často až výše několika set tisíc kilometrů. Plyn v protuberancích je ovšem nesmírně zředěn, takže celkové množství hmoty v nich je nepatrné. Podle některých měření se zdá, že protuberance existují i u jiných hvězd.

Obraz 21 - Protuberance fotografovaná ve Skylabu

Sluneční protuberance bylo možno zpočátku pozorovat pouze při úplném slunečním zatmění. Teprve v roce 1930 se francouzskému astronomovi Bernardu Lyotovi podařilo sestavit přístroj zvaný koronograf, který odstíní záření slunečního disku a umožnil pozorovat protuberance přes filtr propouštějící pouze tu část spektra, v níž září rozžhavený vodík (spektrální čára H_{α}). I zde však byli astronomové omezeni na místa s velmi čistým ovzduším.

Dalekohled s H_{α} filtrem umístěný na oběžné dráze kolem Země, není omezován rozptylem světla v ovzduší a umožňuje pozorovat současně sluneční fotosféru i protuberance. Tato fotografie byla pořízena jedním ze šesti dalekohledů určených pro pozorování Slunce, umístěných na orbitální stanici Skylab. Na oběžné dráze nejsme navíc odkázáni na jedinou spektrální čáru, ale můžeme pozorovat současně i ve více vlnových délkách - např. v modré oblasti spektra, která je ze Země zcela nepřístupná pozorování.

Obraz 22 - Průběh jaderných reakcí v nitru hvězdy

Po malém odbočení k nejlépe prozkoumané hvězdě - Slunci - se vracíme zpět k vývoji hvězdy. Graf zachycuje průběh jaderných reakcí v závislosti na čase (vodorovná osa) a ukazuje, v kterých oblastech hvězdy kdy která jaderná reakce probíhá. Na grafu je zároveň uveden poloměr hvězdy.

Svislá linka v levé části grafu značí okamžik dosednutí hvězdy na hlavní posloupnost - zapálení přeměny vodíku na helium. Této reakce se účastní asi 10 % hmoty hvězdy v jejím nitru. Průměr hvězdy se v této době nemění. Po vyhoření vodíku se nitro hvězdy vlastní gravitací smrští (byla porušena rovnováha mezi gravitací a tlakem záření), čímž v nitru hvězdy opět vzroste teplota a vytvoří se podmínky vhodné pro zapálení reakcí, ve kterých se popel předchozí reakce - helium - přeměňuje na těžší prvky - uhlík, dusík, kyslík. Protože v jádře hvězdy stoupla teplota, posunuly se podmínky vhodné pro hoření vodíku do svrchních slupek, kde vodík dosud nevyhořel. Tímto okamžikem probíhají v nitru hvězdy dvě jaderné reakce současně - produkce a tedy i tlak záření silně stouply. Zvýšeným tlakem záření jsou povrchové vrstvy hvězdy doslova odfukovány, hvězda prudce zvyšuje svůj průměr (na H-R diagramu se posouvá mezi obry).

Hoření helia probíhá za vyšší teploty a tedy i mnohem rychleji než hoření vodíku (teplota v jádře dosahuje asi 100 milionů stupňů), a proto vydrží jen kratší dobu. Po vyhoření helia nastává opět gravitační smršťování jádra a má-li hvězda dostatečnou hmotnost, stoupá teplota v jádře natolik, že se může zapálit uhlíkové jádro - pozůstatek hoření helia.

Hoření vodíku a helia se již popsaným mechanismem posouvá do vrchnějších slupek hvězdy, hvězda proto ještě zvětšuje svůj průměr (na H-R diagramu posun mezi veleobry).

Hoření uhlíku probíhá za ještě vyšších teplot (asi 1 miliarda stupňů), a proto i u nejhmotnějších hvězd trvá jenom několik milionů let. Ani ty nejhmotnější hvězdy nemají hmotu tak velikou, aby po dohoření uhlíku v jádře mohly gravitační kontrakcí dále zvýšit teplotu a pokračovat v jaderných reakcích (navíc při tvorbě prvků těžších než železo se již energie neuvolňuje, nýbrž spotřebovává). Proto po vyhoření uhlíku klesá produkce energie v nitru hvězdy, klesá tedy i tlak záření a váha vrchních vrstev získává převahu. Celá hvězda se začíná gravitačně hroutit (posun do levé dolní oblasti H-R diagramu), přičemž se hroucením uvolní ohromné množství energie, které je schopno větší či menší část hmoty hvězdy rozptýlit do prostoru ve formě mlhoviny.

Záleží pouze na hmotě hvězdy, jaký bude její definitivní konec, zda skončí jako bílý trpaslík, neutronová hvězda nebo černá díra. Jako bílý trpaslík skončí všechny hvězdy, jejichž hmotu je menší než 1,4 hmot Slunce (u nich ani nedojde k hoření uhlíku v jádře). Hvězdy s hmotou 1,4 - 2,25 hmot Slunce skončí jako neutronové hvězdy. A konečně hvězdy těžší než 2,25 hmoty sluneční skončí svůj život jako černá díra.

Obrazy 23 a 24 - Mlhovina M 1 - Krabí, mlhovina
NGC 6853 Dumbell

Byle

Tyto dva objekty jsou mlhoviny vzniklé při zániku hvězdy. Mlhovina Dumbell vznikla zánikem hvězdy s nižší hmotností (do 1,4 hmoty Slunce), kdy energie uvolněná při závěrečném gravitačním hroucení je malá

a množství hmoty rozptýlené do prostoru je pouze zlomkem hmoty hvězdy - méně než 1 %. Mlhovina se po svém vzniku rozpíná rychlostí kolem 5 000 km/s. Podobným objektem je mlhovina M 57 (obr. 4), kde je na fotografii patrná i centrální hvězda.

Krabí mlhovina M 1 je příkladem objektu, který znamenal zničení valné části hvězdy (asi 60 % hmoty). V r. 1054 pozorovali v tomto místě oblohy čínští hvězdáři výbuch supernovy - projev chromného množství energie, která se uvolnila při kolapsu hvězdy s hmotou asi 2 hmoty sluneční. Pozůstatkem této hvězdy je nyní tzv. neutronová hvězda, která byla poměrně nedávno opticky identifikována a ztotožněna s pulsarem v této mlhovině.

Obraz 25 - Tabulka "hvězdné extrémů"

Na závěr stručného přehledu vývoje hvězd uvedeme rozpětí fyzikálních charakteristik hvězd. Zatímco hmoty hvězd se mění poměrně málo - nejhmotnější hvězda má hmotu 90 hmot slunečních, nejlehčí hvězdy mají hmotu pouze několik setin hmot slunečních - mění se průměry a svítivosti hvězd v mnohem širších mezích.

Hvězda s největším známým průměrem ϵ Aurigae má průměr více než 3 000 x větší proti průměru našeho Slunce. Nejmenší známá hvězda - bílý trpaslík - má průměr 1 700 km. Neutronové hvězdy, které ovšem nebyly pozorovány, musí mít průměry ještě menší.

Ve stejně širokém rozmezí se mění i svítivost hvězd. Jelikož svítivost hvězdy závisí na třetí mocnině její hmoty, je z toho zřejmé, že nejsvítivější hvězdy vystačí se svojí zásobou energie velmi krátce.

Obraz 26 - Dráhy hvězd v galaxii a její rotace

Na závěr části věnované jednotlivým hvězdám se zabývejme jejich zařazením do systému galaxie. Již z počátku jsme uváděli, že hvězdy vyplňují tzv. diskový podsystém. Při svém pohybu v galaxii obíhají kolem jejího centra po eliptických drahách. Hvězdy mladé nedávno vzniklé obíhají po drahách kruhových - po drahách, po nichž obíhal původní plynný oblak, ze kterého tato hvězda vznikla. Postupem doby se však hvězdy v galaxii vzájemně gravitačně ovlivňují a výsledkem je, že čím je hvězda starší, tím výstřednější je její eliptická dráha. Příklad dráhy mladé a staré hvězdy je vkreslen do fotografie. Zajímavé je sledovat rotační rychlosti hvězd v závislosti na vzdálenosti od středu galaxie. Centrální oblasti galaxie jsou vyplněny hvězdami homogenně a jádro galaxie tedy rotuje jako tuhé těleso - úhlová rychlost $\vec{\omega}$ je konstantní a dráhová rychlost \vec{v} roste lineárně s poloměrem. Teprve ve větších vzdálenostech od jádra se začíná uplatňovat keplerovská rotace - dráhová rychlost klesá s odmocninou převrácené hodnoty vzdálenosti a úhlová rychlost klesá s mocninou $r^{-3/2}$.

Průběhy úhlové a dráhové rychlosti v závislosti na vzdálenosti od středu galaxie jsou vkresleny do fotografie typické spirální galaxie M 100, která je v mnohém podobná naší Galaxii.

Slunce obíhá kolem středu naší Galaxie rychlostí 250 km/s, 1 oběh trvá asi 220 milionů let.

Obraz 27 - Otevřená hvězdokupa χ_1 a h v Perseu

Poznání, že žijeme u Slunce, které je jednou ze sta miliard hvězd naší Galaxie - soustavy Mléčné dráhy, rozšířilo naše znalosti o struktuře vesmíru a dovolilo

nám poznat, kde žijeme.

Studium jednotlivých objektů tohoto systému hvězd, mlhovin a hvězdokup dovoluje nahlédnout do vývoje těchto jednotlivých útvarů i do vývoje Galaxie a jiných galaxií jako celku.

Otevřené hvězdokupy obsahují mladé hvězdy spektrálních typů O a B, staré jen několik milionů až několik desítek milionů let. Patří tedy mezi nejmladší útvary naší Galaxie. Stejně tak, jako ostatní mladé útvary, jsou otevřené hvězdokupy součástí plochého podsystemu. Leží blízko hlavní roviny Mléčné dráhy (Galaxie), neboť se za svého života nestačily vzdálit od této roviny.

Obraz 28 - Otevřená hvězdokupa χ a h v Perseu

Hvězdokupa χ je mladší (méně než 10 milionů let) a od nás vzdálenější (8 000 světelných let), hvězdokupa označená h je starší o miliony let a je o něco blíže (1000 světelných let). Obě hvězdokupy vlastně k sobě nepatří a vidíme je ze Země v jakémsi zákrytu. Za dobrých podmínek jsou viditelné i pouhým okem.

Na snímku je velmi dobře vidět rané modrobílé hvězdy. V otevřených hvězdokupách jich je obsaženo několik desítek až několik set. Průměr hvězdokup je řádově několik desítek let: u Plejád, u χ , i u h v Perseu 60 - 100 světelných let. V Plejádách je 150 hvězd, v obou hvězdokupách v Perseu v každé přes. 300.

Obraz 29 - Otevřená hvězdokupa M 46 s planetární mlhovinou NGC 2438

Otevřená hvězdokupa je objekt velmi mladý a obsahuje hvězdy staré pouze několik milionů let.

Jak je možné, že jedna z těchto hvězd dospěla do pozdních stadií svého vývoje a že se kolem ní vytvořila tzv. planetární mlhovina? - Je to krásný důkaz toho, že rychlost, s jakou se hvězda vyvíjí, neboli jak rychle žije, závisí na hmotnosti. Čím větší množství látky je ve hvězdě, tím rychleji žije. Tak se stalo, že hvězda o mimořádně velké hmotnosti dospěla do krize ve velmi nízkém věku.

Hvězdkupa M 46 obsahuje 100 hvězd, její průměr činí asi 60 světelných let a leží ve vzdálenosti 6 000 světelných let od nás. Planetární mlhovina má průměr o něco větší nežli jednu obloukovou minutu a je jedenácté hvězdné velikosti.

Obráz 30 - Kulová hvězdokupa M 3 v Honicích psech

Zcela odlišnými útvary nežli otevřené hvězdokupy jsou kulové hvězdokupy. Liší se polohou v Galaxii, ale hlavně typem, stářím a počtem hvězd.

Kulové hvězdokupy patří do kulového podsystemu. Jestliže bychom si objem hvězdných podsystemů představili jako plochý kotouč ementálu, pak kulové hvězdokupy vyplňují prostor celého skleněného zvonu, který ementál kryje. Jsou nejvzdálenějšími objekty jak od středu Galaxie, tak od nás. Kulová hvězdokupa M 3 patří mezi nejvzdálenější hvězdokupy. Světlo od ní k nám letí 34 000 let.

Ve hvězdokupách jsou hvězdy v pozdním stadiu vývoje, což svědčí, že jsou staré desítky miliard let. Většina hvězd je spektrálních typů F, G o povrchových teplotách až 8 tisíc stupňů.

Hvězdkupy - hraniční útvary naší Galaxie - jsou nejstaršími mimořádně dobře poznanými útvary vesmíru.

Obraz 31 - Kulová hvězdokupa NGC 5897 ve Vahách

Tato hvězdokupa je od nás vzdálena o celý poloměr Galaxie. Přesto je dobře viditelná. Má průměr téměř 150 světelných let.

Kulové hvězdokupy na rozdíl od otevřených obsahují desetitisíce až statisíce hvězd. Vzhled hvězdokupy na snímku závisí na dalekohledu a hlavně na expoziční době. Chceme-li zachytit i hvězdy na okraji hvězdokupy, je nutná další expozice a střední části hvězdokupy se přeexponují. Naopak při krátké expozici i velmi bohatá hvězdokupa vypadá chudě.

Obraz 32 - Kulová hvězdokupa Omega v Kentauru

Tato hvězdokupa je nejkrásnější kulovou hvězdokupou. Obyvatelé žijící v jižních šířkách ji snadno spatří pouhým okem jako jasný mlhavý obláček. Je poměrně blízká - 16 600 světelných let a rozsáhlá. Její průměr přesahuje 300 světelných let. Průměr hvězdokupy je 75x větší než vzdálenost Slunce od nám nejbližší hvězdy Proxima Centauri. Největší hvězdokupy obsahují několik set tisíc až několik milionů hvězd.

Obraz 33 - Kulová hvězdokupa M 13 v Herkulu

Toto je nejkrásnější kulová hvězdokupa severní oblohy. Za dobrého počasí a mimo město je viditelná pouhým okem v jedné třetině vzdálenosti od hvězdy éta ke hvězdě dzéta v Herkulu. Má průměr přes 70 světelných let. Ve středním dalekohledu se jeví jako mlhavý obláček. Teprve fotografie, která světlo kumuluje, rozliší zdánlivou mlhovinu v jednotlivé hvězdy. Kvalitní velké dalekohledy rozliší ve hvězdokupě jednotlivé hvězdy.

Pohyb hvězd v kulových hvězdokupách se děje velmi složitým způsobem. Připomeneme, že dokonale je řešen problém pohybu dvou těles a problém pohybu tří těles jen pro zvláštní případy. A ve hvězdokupě jsou statisíce hvězd!

Velmi zajímavý by byl pohled na oblohu od některé hvězdy a hvězdokupy. I kdybychom žili v okrajových oblastech hvězdokupy, viděli bychom okem desetkrát více hvězd, než vidíme ze Země, tedy asi 50 000.

Uvnitř hvězdokupy by i za noci bylo takové světlo, jako u nás za soumraku.

Obraz 34 - 31 kulových hvězdokup

Snímek zachycuje tři desítky a jednu hvězdokupu položených ve směru galaktického centra. Zdůrazněme, že kulové hvězdokupy vyplňují celý vnitřek koule o průměru větším než průměr Galaxie a nikoli jen povrch této koule.

Dnes je známo na 120 kulových hvězdokup, jejich počet v Galaxii bude asi dvojnásobný.

Obraz 35 - Obří hvězdokupa NGC 1846 ve Velkém Magellanově mráčku

Kulové hvězdokupy jsou i v jiných Galaxiích. Tato má svůj domov v satelitní nepravidelné galaxii, v tzv. Velkém Magellanově mráčku (souhvězdí Dorado na jižní obloze). Hvězdokupa obsahuje téměř 10 milionů hvězd a její průměr dosahuje téměř 500 světelných let. Proto je i na vzdálenost 160 000 světelných let dobře pozorovatelná.

Kulové hvězdokupy obsahují velké množství proměnných hvězd, a to zejména pulsujících hvězd a mezí

nimi dominují hvězdy typu RR Lyrae. Jejich změny jasnosti jsou velmi pravidelné s periodou kratší jednoho dne. Jejich spektrální třída je A a F. Tyto hvězdy jsou v té části svého vývoje, kdy přecházejí od rudých k bílým obrům. Jejich absolutní jasnost je rovna nule. Lze jich úspěšně použít pro určování vzdálenosti kulových hvězdokup i dalších objektů vzdáleného vesmíru podobným způsobem jako Cefeidy.

Později, při vyprávění o galaxiích, poznáme, že v těch vzdálenostech, kde již nejsou galaxiích vidět ani jednotlivé obří pulsující hvězdy, poslouží podobným způsobem kulové hvězdokupy.

Největší kulové hvězdokupy jsou pozorovatelné i u galaxií vzdálených 50 milionů světelných let.

Naše fotografie ukazuje snímky téže hvězdokupy, pořízené na desky s různou citlivostí barev - vlevo je pohled v modrém světle, vpravo ve žlutém.

* * * *

DÍL II.

Obráz 36 - Spirální struktura z radiových měření

Jednotlivé hvězdy a mezihvězdná hmota (plyn a prach) zakrývají vzdálenější ramena Mléčné dráhy a zejména střed galaxie, který leží za hustými mračny Štřelce. Protože jasné Mléčné dráhy, neboli galaxie mají jasně spirální strukturu, předpokládala se tato struktura i u naší Galaxie. K potvrzení tohoto předpokladu došlo až po druhé světové válce. Jako téměř vždy v astronomii i v tomto případě k tomu došlo s dalším technickým pokrokem. Mezihvězdnou hmotou prochází snáze než viditelné světlo infračervené záření a zejména radiové vlny. Byl to právě nový obor - radioastronomie, který umožnil rozluštit záhadu spirální struktury naší Galaxie. Pomohlo radiové záření mezihvězdného vodíku na vlně 21 cm. Již na rozhraní čtyřicátých a padesátých let tohoto století bylo prokázáno, že v Galaxii jsou nejméně tři spirální ramena. V době novější byl tento výsledek potvrzen a došlo k dalšímu průzkumu oblastí kolem jádra naší Galaxie. Naše Galaxie patří mezi normální velké spirály. Je velmi podobná Galaxii M 31 v Andromedě.

Obráz 37 - Orientace v Galaxii

Jsme spjati se Zemí a hlavní orientace, kterou si uvědomujeme, je dána směrem tíže. V ní kromě hlavní složky - přitažlivosti zemské - je skryta i mnohem nepatrnější složka vyvolaná rotací Země.

Pro nás je důležitý směr nahoru a dolů. Vůči tomuto směru vztahujeme vše. Tak nám snadno uniknou směry, které jsou pro naše zařazení důležité, směr ke Slunci a pak směr ke středu Galaxie a naše poloha v ní.

Náš obrázek není vlastně ničím jiným, než plánem města v přílohách tlusté knihy o městě - od historie až po výhledové plány.

Základní orientaci nám nabízí obloha sama v podobě Mléčné dráhy. Ta je jakýmsi zhmotněním galaktického rovníku, který leží v hlavní rovině Galaxie. Díváme-li se za jasné letní noci na oblohu, vidíme asi tři tisíce jednotlivých hvězd z blízkého okolí (průměr asi 2.000 světelných let). A Mléčnou dráhu - spojené světlo hvězd ležících v rovině Galaxie.

Střed Galaxie je za mračny v souhvězdí Střelce. Opačný směr je ve směru souhvězdí Býka. Severní pól nalezneme ve Vlase Bereniky, jižní v Sochaři. Kolmo k těmto směrům leží směr Labut - Plachty.

Obrázek 38 - Mléčná dráha

Lidé ji pozorovali od pradávna. Počátkem 17. století v ní dalekohledem Galileo Galilei pozoroval jednotlivé hvězdy a téměř o dvě století po něm se pokusil Herschel o statistický výzkum. Ten ovšem mohl skutečně začít o století později, v době, kdy byly známy vzdálenosti mnohých hvězd a kdy přístroje a nové technické možnosti (fotografie, spektroskopie) umožnily pracovat s velkými soubory dat.

Mléčná dráha obepíná oblohu prakticky po hlavní kružnici. Je to důsledkem toho, že Slunce leží jen nepatrně nad hlavní rovinou Galaxie. V Mléčné dráze a poblíž ní jsou rozloženy jasné hvězdy, zářící i temné mlhoviny, otevřené hvězdokupy a vůbec všechny útvary plochých podsystémů.

Počet hvězd, které lze v Mléčné dráze spatřit, je závislý na dalekohledu. Čím světelnější daleko-

hled (a čím větší jeho průměr), tím krásnější je pohled na Mléčnou dráhu.

Při pohledu na sluneční soustavu pozorujeme v Mléčné dráze v průmětu spojené světlo hvězd mnoha spirálních ramen. Jasně hvězdy jsou z toho, ve kterém leží i naše Slunce, či ze sousedních. Hvězdy Orionu leží v sousedním rameni. Hovoříme o rameni Orionu. Podobně o vzdálenějším rameni Perseá a Býka.

Obraz 39 - Velké Magellanovo mračno

Pouhým okem můžeme na obloze spatřit tři vzdálené hvězdné systémy, pro které se od počátku 50. let začalo důsledně užívat označení galaxie. Dvě z nich jsou na jižní obloze - Magellanova mračna - a byla popsána Evropanům poprvé Pigafettem v cestopisech z Magellanových výprav počátkem 16. století. Dalekohledem zachytíme světlo i daleko slabších objektů. Na ploše měsíčního disku nalezneme průměrně 400 galaxií do 20^m; místy jejich počet stoupá na desítky tisíc. Celkový počet galaxií ve vesmíru odhadujeme dnes na řádově miliardy.

O galaktické podstatě Mračen jsme se přesvědčili teprve v tomto století. Protože jsou nejbližšími objekty tohoto druhu, umožnila právě jejich detailní pozorování počátek systematického výzkumu i vzdálených galaxií - Magellanova mračna se stala klíčem k bráně do extragalaktického vesmíru.

První katalogy, obsahující ovšem vedle galaxií i další objekty, jsou Messierův (1781) se 107 objekty, z nichž 25 bylo galaktického typu, a Herschelův General Catalogue (GC z r. 1864) s více než 5 000 útvary. R. 1884 Dreyer vydal New General Catalogue (NGC) se 7 840 objekty, k nimž ve dvou doplňcích IC přibýlo dalších 5 360 objektů. V minulých letech Voroncev-Veljaminov

a Archipová vydali katalog, obsahují 23 600 galaxií do 15^m.

Velké Magellanovo mračno v souhvězdí Mečouna (Doradus) patří mezi nepravidelné galaxie. Obsahuje 2 nebo více miliard hvězd, má na obloze jasnost 0,1^m a svítivost dosahuje - 18,4^M. Jeho průměr je zhruba 50 000 sv. r. a leží ve vzdálenosti 160 000 sv. r. Nacházíme zde řadu zajímavých objektů - máme zkatalogizováno přes 800 cefeid, odhadujeme přítomnost několika tisíc hvězdokup, některé kulové hvězdokupy - např. NGC 1866 obsahují převážně modré žhavé hvězdy. V nepravidelné hvězdokupě NGC 1910 je veleobří hvězda S Doradus o průměru 400 sv. r., což je zřejmě rekordmanka ve velikostech. Fascinující je i objekt 30 Doradus (též NGC 2070, Tarantula), gigantická mlhovina o průměru 200 sv. r., podobná M 42 v Orionu. Kdyby se nacházela Tarantula na jejím místě, zabírala by plochu celého souhvězdí na obloze a pozemská tělesa jí osvětlená by vrhala stín!

Obraz 40 - Malé Magellanovo mračno

Tato galaxie tvoří s Velkým Magellanovým mračnem dvojitý systém se vzájemným silným gravitačním působením. Středů obou galaxií jsou od sebe vzdáleny 60 000 sv. r. (21^o) a lze mezi nimi pozorovat koronu ze slabších hvězd i most atomů neutrálního vodíku. Obě jsou pod gravitačním vlivem naší Galaxie a mezi všemi třemi hvězdnými ostrovy existují proudy mezihvězdného plynu.

Malé Magellanovo mračno je nepravidelná galaxie v souhvězdí Tukana, ležící ve vzdálenosti téměř 190 000 sv. r. Má průměr 14 000 sv. r. a její hmotnost odhadujeme na několik set až miliardu hvězd. Na obloze má jasnost 2,4^m a její svítivost je - 16,3^M. Také zde

se vyskytuje množství periodicky proměnných (kolem tisíce) a stovky hvězdokup.

Vzdálenosti galaxií určujeme několika způsoby. Pro blízké objekty je nejvýhodnější porovnávat tělesa, jejichž svítivost známe. Právě studiem proměnných hvězd typu δ Cephei se podařilo r. 1912 odhadnout poprvé vzdálenost Magellanových mráčen. Cefeidy slouží do vzdálenosti 13 - 20 milionů sv. r. Dalšími vhodnými útvary jsou novy (max. svítivosti kolem -9^M) nebo kulové hvězdokupy (-8^M). Vzdálenější galaxie než 80 milionů sv. r. nemůžeme již rozložit na jednotlivé hvězdy - tam je nutno použít analogie s blízkými galaxiemi příslušného typu, jejichž rozměry nebo svítivosti jsme stanovili předchozími metodami. Konečně u nejvzdálenějších objektů jsme odkázáni jen na poměrně nepřesný rudý posuv (viz obr. 60).

Obraz 41 - Velká spirální galaxie v Andromedě M 31
(NGC 224)

Jedna z blízkých galaxií, svou strukturou podobná naší. Po vynálezu dalekohledu ji poprvé pozoroval r. 1612 Simon Marius, ale její hvězdy poprvé rozložil teprve Hubble r. 1923. Snímky s delší expozicí ukazují, že má průměr asi 4° na obloze, tj. osmkrát více než úplněk Měsíce. Vykazuje zřetelně spirální strukturu (třída Sb - viz obr. 44), má průměr asi 130 000 sv. r. a když se na obloze jeví jako objekt $3,5^m$, patří mezi nejsvítivější galaxie v okolí ($-21,8^M$). Teprve r. 1952 byla určena nynější hodnota její vzdálenosti, asi 2,2 milionu sv. r. (podle cefeid, nov a supernov). Obsahuje 300 miliard hvězd s hmotností Slunce.

Také studium této blízké galaxie významně přispělo k poznání vzdálenějších. Právě zde lze dobře studovat

rotaci jednotlivých částí disku a poprvé se podařilo rozložit na hvězdy husté galaktické jádro (rychle rotuje a má průměr asi 300 sv. r.). Ve vzdálenosti 20 - 80 tisíc sv. r. od centra bylo registrováno mnoho asociací velmi mladých hvězd.

M 31 má čtyři malé galaktické průvodce, obdoby Magellanových mračen. Jsou to všechno eliptické galaxie. Vzdálenější NGC 147 a NGC 185 leží asi 450 000 sv. r. od mateřské galaxie ve vzájemné vzdálenosti 75 000 sv. r. První je asi stokrát slabší než M 31; druhá je sice menší, avšak kompaktnější. Bližší dvojice má označení NGC 205 a M 32 - první je pozoruhodná tím, že se vzájemně prolíná s M 31 a obsahuje větší podíl modré hvězdy (podobně jako NGC 185); druhá se podobá spíše obrovské kulové hvězdokupě se čtyřmi miliardami hvězd.

Obraz 42 - Galaxie NGC 7331 v souhvězdí Pegasa

Spirální galaxie třídy Sb, která se velmi podobá naší Galaxii. Žlutočervené zabarvení centrálních oblastí svědčí o hojné přítomnosti hvězd II. populace (tedy rudých obrů, hvězd G, K, proměnných RR, Lyr), které v naší Galaxii tvoří kulový podsystem. Protože u většiny galaxií nemůžeme rozlišit jednotlivé hvězdy, jsme odkázáni pouze na registrování integrálního toku záření. Podle převládajícího typu hvězd lze pak jednotlivé galaxie třídit.

Obraz 43 - Galaxie M 64 (NGC 4826) v souhvězdí Vlasy Bereniky

Tato galaxie je naopak útvaru, v němž převládají modré hvězdy. Žhavé hvězdy ve spirálních ramenech patří do I. populace a nasvědčují, že v galaxii

jsou poměrně mladé hvězdy. Nejčetněji jsou zastoupeny spektrální třídy O, B, F, G. Galaxie NGC 4826 je třídy Sb, na obloze má 8^m a leží ve vzdálenosti asi 10 milionů sv. r.

Obraz 44 - Klasifikace galaxií

R. 1925 předložil E. Hubble návrh na třídění galaxií, která se po řadě modifikací udržela dodnes. Základní rozdělení obsahuje tři typy galaxií podle vzhledu - spirální S, eliptické E a nepravidelné Ir. Řada eliptických galaxií začíná u třídy E0 (kulový tvar) a postupuje od E 1 do E 7. Hodnota čísla se určuje ze vztahu $10 \frac{a-b}{a}$, kde a, b jsou poloosy elipsovitého průmětu galaxie. Spirální galaxie se dělí na normální, u nichž spirála vychází přímo z jádra (S) a dále s příčkou, u nichž je jádro protato příčkou (SB). V každé třídě existují tři podtřídy a, b, c podle zmenšující se jasnosti a rozměrů jádra. Přechodným typem mezi E a S jsou galaxie S0, které Hubble pouze předpověděl a které byly objeveny dodatečně. Výrazem pekuliární galaxie označujeme takové, které jednoznačně nepřísluší k žádné z výše uvedených tříd.

Hubbleovo třídění nemá vývojový charakter. Detailní výzkum prokázal, že eliptické galaxie jsou tvořeny objekty zejména II. populace, která i v naší galaxii tvoří kulový podsystém. Je zde poměrně málo mezihvězdné hmoty pro vznik nových hvězd. Naopak ve spirálních galaxiích jsou zejména v ramenech hvězdy I. populace a množství mezihvězdné hmoty, jak tomu nasvědčují rádiová pozorování. Mezi takové typy galaxií patří i naše. Nejvíce zásob hmoty dosud nezformované do hvězdných systémů obsahují nepravidelné galaxie, které schéma nezahrnuje (vzpomeneme třeba mlhoviny Tarantula z Velkého Magellanova mračka).

Obraz 45 - Typy galaxií (příklady)

Obrázek představí šest typických galaxií v celé jejich kráse, tak jak byly zachyceny velkými reflektory na Mt. Palomaru a Lickově observatoři.

- E 0 - obří galaxie M 87 v souhvězdí Panny (viz obr. 52).
- E 4 - trpasličí galaxie NGC 147 v souhvězdí Kasiopeje. Obsahuje převážně hvězdy II. populace, poměrně málo svítivé.
- E 6 - menší průvodce M 31, eliptická galaxie NGC 205 v červeném světle. Obsahuje především hvězdy II. populace.
- Sa - galaxie NGC 7217 v souhvězdí Pegasa má jasně viditelné jádro, spirály symetrické a velmi slabé.
- Sb - galaxie NGC 3031 v souhvězdí Velké Medvědice, je průvodcem galaxie M 82 a spolu s dalšími sedmi galaxiemi tvoří kupu.
- Sc - galaxie M 33 (NGC 598) v souhvězdí Trojúhelníku je nejvzdálenějším členem místní skupiny galaxií.

Obraz 46 - Galaxie M 51 v souhvězdí Honicích Psů
(tzv. Vírová, NGC 5194)

Typická spirální galaxie Sc, kterou pozorujeme ve směru kolmém na její rovinu. Objevil ji r. 1773 Messier a r. 1845 se stala první galaxií, u níž Rosse zjistil spirální charakter (teprve r. 1888 se podobné zjištění podařilo Robertsovi u M 31). Leží ve vzdálenosti asi 14 milionů sv. r. a na obloze se jeví jako

objekt 8^m. Spirála, vycházející z centrálního jádra, přechází do satelitní trpasličí galaxie NGC 5195. Ačkoliv se soudilo, že NGC 5195 je galaxie nepravidelná, zdá se nyní, že jde o spirálu s příčkou.

Dvojice galaxií ve vzájemné interakci není nic neobvyklého ve vesmíru - patří sem i soustava naší Galaxie a Magellanových mračen a zejména 355 takových dvojic z katalogu Voroncova-Veljaminova. Radiový průzkum ukázal, že ramena spirály jsou prostoupena množstvím neutrálního vodíku a další mezihvězdnou hmotou.

Obraz 47 - Galaxie NGC 253 v souhvězdí Sochaře

Je to jedna z velmi svítivých a také jasných galaxií, typický představitel typu Sc. Leží ve vzdálenosti 8 milionů sv. r. a má průměr asi 45 000 sv. r. Jeví se jako objekt 8^m, avšak její svítivost je - 20,3^M. Stejně třídy je i známá spirální galaxie M 33 (NGC 598) v souhvězdí Trojúhelníku.

Obraz 48 - Galaxie M 104 (NGC 4594) v souhvězdí Panny (zv. Sombrero)

Spirální galaxie třídy Sa ve vzdálenosti asi 38 milionů sv. r. od nás. Byla objevena r. 1781 a má jasnost 8,7^m. Jde o pravděpodobně nejhmotnější galaxii - je ještě desetkrát hmotnější než naše Galaxie. Zřetelně je patrná koncentrace tmavého mezihvězdného prachu a plynu v okolí základní roviny. "Sombrero" patří do kupy galaxií v souhvězdí Panny.

Obraz 49 - Galaxie NGC 1300 v souhvězdí Eridana

Velmi známá spirální galaxie třídy SB, mající rozsáhlé jádro s příčkou. Pro pozorovatele na Zemi se jeví poměrně slabá (11^m).

Mechanismus vzniku ani vývoje spirál v galaxiích dosud nebyl uspokojivě vysvětlen. Na počítači lze napodobit spirální vývoj galaxie za zjednošujících podmínek, avšak nepodařilo se simulovat vznik příčky v jádru. Zřejmým dodavatelem hmoty do spirál je jádro soustavy, avšak nevíme, jak se do centra galaxií vrací hmota zpět.

Obraz 50 - Galaxie M 82 v souhvězdí Velké Medvědice
(NGC 3034)

Nepravidelná galaxie ve vzdálenosti 10 milionů sv. r., u níž probíhají mimořádně prudké vývojové změny. Z nitra vytryskává mohutný tok hmoty ve formě gigantického výbuchu. Do pohybu se dala tolik látky, že by z ní šlo "udělat" pět až šest milionů Sluncí. Energie, která se uvolnila, představuje výbuch deseti milionů supernov!

Galaxie M 82 má zploštěný tvar a na snímcích v červeném a žlutém světle je vidět výběžky a vlákna tmavé i světlé hmoty, vyvržené do vzdálenosti až 14 000 sv. r. od jádra. Částice, především vodíku, se pohybují rychlostí více než tisíc km/s a z toho lze usoudit na vznik výbuchu před 1,5 až 3 miliony let.

Modré zbarvení v okrajových částech galaxie nasvědčuje přítomnosti mladých žhavých hvězd. Galaxie M 82 je současně zdrojem intenzivního radiového záření 3C-231 (třetí katalog radiových zdrojů z Cambridge).

Obraz 51 - Galaxie NGC 5128 v souhvězdí Kentaura

Pekuliární galaxie třídy E0, vzdálená od nás asi 16 milionů sv. r. Jeví se jako objekt 7,2^m. Má neobvyklý pás tmavé mezihvězdné hmoty, která v tomto typu galaxií nebývá. Spolu se zdrojem Cyg A patří k prvním radiovým galaxiím, objeveným v polovině 40. let a počátkem 50. let ztotožněným s optickými objekty. Radiové záření vydávají všechny galaxie, avšak jen u některých je radiový tok srovnatelný (nebo dokonce převyšující) s tokem energie v optickém oboru. Např. obyčejná galaxie M 51 vydává o tři řády nižší energetický tok než radiová galaxie Cen A.

Většina radiových galaxií patří mezi dvojité systémy. U NGC 5128 došlo zřejmě před několika sty miliony let k výbuchu, který vyvrhnul vodík a další hmotu až do vzdálenosti 130 000 sv. r. Severnější z obou zdrojů radiového záření se téměř ztotožňuje s optickou galaxií, radiový zdroj je však značně větších rozměrů (průměr 2,3 milionu sv. r.). Radiové záření přichází zřejmě od relativistických elektronů, brzděných v magnetických polích.

Obraz 52 - Galaxie M 87 (NGC 4486) v souhvězdí Panny

Tato veleobří eliptická galaxie třídy E0 ve vzdálenosti kolem 40 milionů sv. r. bývá někdy nazývána "galaxie s výtryskem", neboť při krátké expozici v modré barvě pětimetrovým reflektorem na Mt. Palomaru ukazuje dlouhý výběžek, sahající z malého jádra do vzdálenosti až 3 000 sv. r. Trojice zhuštění tohoto výběžku jsou mimořádně silnými zdroji radiového záření (Vir A). Protože se pohybují směrem od galaxie rychlostí 900 km/s, vznikly zřejmě výbuchem.

V optickém oboru má tento gigant zdánlivou hvězdnou velikost 9,2^m.

Na předchozích třech obrázcích jsme viděli tři příklady radiových galaxií - každá z nich měla nějakou "zvláštnost". Obvykle jde o mimořádnou aktivitu galaktických jader (minulou nebo současnou). Toto zjištění patří mezi nejdůležitější objevy počátku šedesátých let.

Obraz 53 - Galaxie M 100 s průvodci

Klasy Berny

Nejčastějšími průvodci obřích galaxií jsou trpasličí eliptické galaxie s poměrně malou svítivostí ($M = -16$ až -9). Takové systémy malých galaxií nacházíme v blízkosti M 81, galaxie ve Fornaxu a jinde. Na obr. je označeno šipkou šest z mnoha eliptických průvodců obří spirální galaxie M 100 (NGC 4321) třídy Sbc. Leží ve vzdálenosti asi 50 milionů sv. r. a patří mezi nejsvítivější v kupě galaxií Virgo I. Podařilo se rozložit část této galaxie na hvězdy - nejjasnější neproměnná hvězda má jasnost 20,8^m.

Obraz 54 - Stephanův "kvintet"

Galaxie nejsou v prostoru osamocené, i když je dělí obrovské vzdálenosti. Podobně jako hvězdy nacházíme obvykle ve vícenásobných soustavách, je i většina z katalogizovaných galaxií vícenásobná. Jsou to galaxie spojené dlouhými mosty z mezihvězdné hmoty nebo galaxie ve vzájemných kolizích, často se vzájemně propustují.

V těsné blízkosti naší Galaxie jsou dvě trpasličí galaxie - Magellanova mračna. Sousedka M 31 v Andromedě má čtyři malé eliptické průvodce.

Zajímavou skupinou je tzv. Stephanův kvintet (NGC 7317, 7318a, 7318b, 7319, 7320) - pětice galaxií v souhvězdí Pegasa. Soudilo se, že galaxie patří do téže dynamicky nestabilní skupiny. R. 1975 se podařilo prokázat, že poslední z výše jmenovaných galaxií do skupiny nepatří. Stephanův kvartet je tedy stabilní kupou vzdálenou asi 150 milionů sv. r.

Obraz 55 - Seyfertovy galaxie

V současné době je známo více než sedmdesát zvláštních galaxií, které mají malá, ale velmi jasná jádra. Poprvé se jimi zabýval r. 1943 C. K. Seyfert a proto dostaly jeho jméno.

Spektra jader těchto galaxií svědčí o vysokém stupni ionizace, emisní čáry svědčí o turbulentních pohybech hmoty rychlostmi několika tisíc kilometrů za sekundu. Řada Seyfertových galaxií je intenzivním zdrojem radiového záření. Spektrografie s velkým rozlišením ukázala, že jádra jsou složena nejspíše z oddělených oblaků hmoty, vzájemně se vůči sobě rychle pohybujícími. Tyto bouřlivé jevy jsou považovány za příčinu radiového záření.

Většina Seyfertových galaxií vykazuje spirální strukturu a jejich absolutní jasnosti se pohybují v intervalu -18 až -22^M . U jedné takové galaxie byl změřen průměr jádra na zhruba 12 sv. r. a jeho hmotnost byla odhadnuta na několik miliard hvězd. Seyfertovy galaxie tvoří zřejmě přechodový článek mezi normálními galaxiemi a kvasary.

Na snímku je Seyfertova galaxie M 77 (NGC 1068) v souhvězdí Velryby, fotografovaná pětimetrovým reflektorem na Mt. Palomaru.

Obraz 56 - Houf galaxií

Dovolíme-li si klást počátky astronomie do doby před 5 000 léty, pak člověk zkoumá jiné hvězdné ostrovy - galaxie pouze 1 % celkové doby, co se věnuje pohledům do vesmíru. Výzkum galaxií v pravém slova smyslu začal před asi 50 léty. Od té doby do dnes se díky rozvinuté technice podařilo zachytit světlo i z oblastí, odkud letí dvě i více miliard let. V nám známém vesmíru jsou miliardy galaxií. Jsou známy skupiny po dvou, třech, i soustavy mnohonásobné. Jsou známa seskupení až desetitisíců galaxií. Taková seskupení se nazývají kupy v souhvězdí Vlasu Bereniky, Severní Koruny, Panny, Sochaře, Velkého Vozu, Herkula a další. Od doby, kdy byly poprvé vyfotografovány, až do dnes je řešena otázka stavby dosud poznaného vesmíru ze základních stavebních kamenů-galaxií či jejich seskupení. Podle jedné z hypotéz kupy galaxií tvoří vyšší soustavu - supergalaxií. Nu a supergalaxie by opět vytvářely hierarchicky soustavu vyšší.

Obraz 57 - Místní skupina galaxií

Pro nás nejdůležitější - i když z hlediska ostatního vesmíru nepodstatná - je naše Místní skupina galaxií.

Naše Mléčná dráha spolu s Velkým a Malým Magellanovým mračnem tvoří trojici galaxií. Obě mračna jsou malými nepravidelnými galaxiemi a jsou to vlastně satelity naší Galaxie. Podobně naše nejbližší sousedka - galaxie M31 v Andromedě - má 4 satelity. Obě skupiny tvoří tzv. "Místní skupinu galaxií".

Tedy: žijeme na planetě Zemi, kolem které obíhá Měsíc. Země obíhá spolu s planetami kolem Slunce. Slunce je jednou ze sta miliard hvězd a obíhá kolem

středu Galaxie. Naše Galaxie je součástí vyššího systému zvaného místní skupina galaxií. I tato soustava je ovládána zejména přitažlivostí a je dynamicky vyvážená. Hmotnosti galaxií jsou obrovské a tím větší jsou hmotnosti celých skupin galaxií. Při působení tak velkých hmot bychom očekávali i velké přitažlivé síly působící na jednotlivá tělesa a tělíska uvnitř soustavy. Záleží však i na vzdálenosti. A tak pro člověka nejvýznamnější přitažlivá síla vzniká působením jeho hmotnosti a hmotnosti Země. Pro Zemi je nejdůležitější působení Slunce atd. Díky vlastnostem gravitační síly děje se jejich působení odstupňovaně a má za následek hierarchické uspořádání těles do skupin.

Obraz 58 - Kupy galaxií

S rozvojem astronomie v minulém století se stalo velmi aktuální hledat odpověď na otázku, jaké jsou vlastnosti vesmíru jako celku. Jako u každého problému nutno jít po dvou cestách - teoretické a praktické. Je to právě praxe, tj. ověření přímým měřením, které může dát (či potvrdit) pravdivou odpověď. Z tohoto hlediska je otázka vesmíru jako celku příliš předčasná. Vhodnější je formovat otázku takto: jaké jsou vlastnosti vesmíru v prostoru značně větším, nežli dnes známe? Je totiž jasné, že vlastnosti prostoru a času budou závislé na množství hmoty - na hmotnosti látky v tomto prostoru obsažené, tedy na hustotě. Jak poznáme dále, teoretické modely vesmíru jsou velmi dobře za posledních sto let propracovány - teoreticky ovšem. Zbývá jediné: ověřit či teprve změřit některé vlastnosti hmoty v dosud známém prostoru a "ještě kus dál". Bez znalosti hustoty hmoty a dobře změřených vzdáleností útvarů totiž na otázku stavby vesmíru (i když jen v té části, kterou známe), nelze odpovědět.

Na tomto místě, kdy na obraze putujeme do vzdáleností hraničících se vzdálenostmi kosmologickými, stojí za to zdůraznit, že útvary kolem nás jsou seskupeny hierarchicky. Je to jisté až po hranice, kam dosud pronikly dalekohledy. V tomto prostoru platí, že

"každá soustava vyššího řádu má poloměr větší, než je součet poloměru soustavy nižšího řádu a počtu členů této nižší soustavy".

Výsledkem je dynamické vyvážení. V žádném místě poznané části vesmíru nemůže při hierarchickém uspořádání působit ani při nekonečně velikém vesmíru nekonečně veliká síla (řadá tzv. gravitační paradox) a rovněž světlo ze všech útvarů nekonečného vesmíru by nemohlo způsobit světlo větší, než je pozorované (řadá tzv. fotometrický paradox). Nekonečná varianta modelu vesmíru je zcela oprávněná.

Jedním z hlavních problémů je dosti přesné měření vzdálenosti galaxií. Po pravdě řekněme, že měření vzdáleností těchto objektů s přesností na 20 % je úspěchem!

Obraz 59 - Supergalaxie

Ve vzdálenostech nad zhruba miliardu světelných let je obtížné změřit cokoli, zejména vzdálenost. Zde nezbývá než určovat vzdálenost podle zdánlivých rozměrů obřích galaxií za předpokladu ovšem, že srovnáváme objekty stejně veliké. O tom, jak je problém obtížný, svědčí mimo jiné i to, jak se během let mění velikost tzv. Hubbleovy konstanty (viz dále), která se za padesát let změnila deseti až dvacetinásobně. A podobně se změnil i názor na velikost pozorovaného vesmíru - jenomže opačně.

Nesnáze, ve kterých je (sice dočasně, ale přece) současná astronomie, lze řešit jedině měřeními ve velkých vzdálenostech a výzkumem vlastností částic hmoty. Proto jsou objevy a průzkum vyšších soustav pro nás důležité - nejen z hlediska našeho zařazení do struktury vesmíru.

Podle teorie o existenci Supergalaxie bychom byli i s "místní skupinou galaxií" členy obří kupy ležící ve směru souhvězdí Panny. Střed supergalaxie se předpokládá právě v tomto směru ve vzdálenosti asi 50 milionů světelných let. Místní skupina pravděpodobně obíhá kolem středu Supergalaxie rychlostí 400 km za sekundu.

Supergalaxie má průměr asi 130 milionů světelných roků.

Sousední supergalaxie leží ve vzdálenosti asi 360 milionů světelných let ve směru souhvězdí Herkula. Její houfy galaxií leží v okolí dvou obřích kup. Ukazuje se, že tento systém má stejnou velikost jako naše Supergalaxie.

V systémech, které jsme dosud poznali, a to včetně soustav supergalaxií, je hlavní silou gravitační síla, jejíž podstatu je nutno hledat v nitru hmoty. Je to krásný příklad souvislosti zdánlivě tak odlišných útvarů, jako jsou jádra atomů na straně jedné a supergalaxie na straně druhé.

Obraz 60 - Rudý posuv ve spektrech galaxií

Vzdálenost galaxií, v nichž nelze rozlišit jednotlivé detaily, určujeme podle velikosti tzv. rudého posuvu. R. 1912 se zabýval Slipher spektry galaxií a zjistil, že jednotlivé čáry jsou posunuty směrem k červenému konci spektra. Nejlepším vysvětlením je interpretace za pomoci Dopplerova efektu. Podle něho při vzájemném pohybu zdroje

a přijímače dochází ke změně frekvence záření přijímaného proti vysílanému. Posun k dlouhovlnnější oblasti záření (k červené barvě) znamená "prodlužování" vlnových délek a tedy vzdalování objektů, posun k modré barvě naopak vzájemné přibližování. Po opravě na vlastní pohyb Slunce r. 1927 vykazovalo všech 41 zkoumaných galaxií známky vzdalování! Tomuto posuvu ve spektru se říká rudý posuv. Ukázalo se brzy, že vzdálenější (obvykle slabší) objekty vykazovaly větší rudý posuv, tj. že se od nás vzdalují rychleji.

Obraz 61 - Hubbleův vztah

Porovnání vzdáleností, určených podle cefeid; a rychlostí vzdalování z rudého posuvu vedlo E. Hubblea r. 1929 ke stanovení vzájemné vazby mezi nimi: rychlosti rostly přímo úměrně se vzdálenostmi! Čím jsou od nás galaxie dále, tím rychleji se vzdalují. Konstantou úměrnosti je tzv. Hubbleova konstanta

$$v = c \cdot \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = H \cdot l$$

Mírou rudého posuvu je veličina

$$z = \frac{\Delta \lambda}{\lambda}$$

kde $\Delta \lambda$ je posuv čáry, jejíž vlnová délka v laboratoři by byla λ ;

c - rychlost světla,

l - vzdálenost objektu od nás.

Původně vycházela Hubbleova konstanta na 500 km/s Mpc, tj. přírůstek rychlosti 500 km/s na každých milion parseků vzdálenosti. Od té doby se dalšími

měřeními hodnota změnila a poklesla asi desetinásobně. V současné době je za nejpravděpodobnější hodnotu přijímáno 50 km/s/Mpc, avšak objevily se odhady ještě výrazně nižší (teoretický limit je kolem 30 km/s Mpc).

Hubbleův vztah je jedním z nejdůležitějších pilířů, na nichž jsou vybudovány současné základní představy o stavbě a vývoji vzdáleného vesmíru.

Převrácená hodnota Hubbleovy konstanty označuje pro některé modely stáří vesmíru. Vzdálenost λ , kterou musela každá galaxie až dosud urazit, je rovna $v \cdot T$. Protože současně $v = H \cdot \lambda$, lze psát $T = 1/H =$ konstanta pro všechny galaxie. Pro nynější střední hodnotu H vychází stáří vesmíru na zhruba 18 - 20 miliard let.

Ze všech galaxií má největší rudý posuv radiová galaxie 3 C - 123, pro niž z činí 0,637, což odpovídá vzdálenosti asi 8 miliard sv. r. při průměru téměř 750 000 sv. r.

Na našem obrázku je na vodorovné ose "vzdálenosti" vynesena zdánlivá hvězdná velikost (magnituda), která je pro objekty stejné svítivosti M úměrná vzdálenosti objektů od nás.

Obraz 62 - Kvasary

V roce 1963 byly některé radiové zdroje s rozměry menšími než 1" ztotožněny s optickými objekty hvězdného vzhledu, často obklopenými difúzním prostředím. Později se ukázalo, že existují i podobné zdroje, které intenzivní radiové záření revyzařují. Byly nazvány kvasistelárními objekty, kvasary.

Ve spektrech kvasarů se pozorují emisní čáry, typické pro difúzní mlhoviny. Jejich proměření se ukázalo

být velmi obtížným, protože vykazovaly abnormálně velký rudý posuv. Čáry, obvyklé v ultrafialové oblasti, se přesouvaly do viditelného oboru. Pokud tento posuv interpretujeme jako Dopplerův, vychází podle Hubbleova vztahu, že kvasary jsou nejvzdálenějšími objekty v pozorované části vesmíru.

Jeden z blízkých kvasarů, 3C - 273 v souhvězdí Panny, který vidíme na fotografii, je od nás vzdálen přes půl miliardy parseků (přes 1,6 miliardy sv. r.). V optickém oboru se jeví jako objekt 13^m. Gigantické galaxie by se odtud jevily jako objekty slabší než 18^m; jsou tedy kvasary nejméně o dva řády jasnější než obří galaxie.

V současné době pozorujeme asi 400 kvasarů, z nichž mnohé mají zcela výjimečné vlastnosti. Z proměnnosti přicházejícího záření lze usuzovat na poměrně malé rozměry, řádově světelné dny až týdny. Pokud jsou kvasary skutečně v kosmologických vzdálenostech - a vše tomu zatím nasvědčuje - patří k tělesům ve vesmíru zdaleka nejsvítivějším! Rekordmanem je v tomto směru objekt 3C - 279, jehož $z = 0,536$. Obvykle mívá 18^m, ale jak se dodatečnou prohlídkou archivů zjistilo, v dubnu 1937 se rozjašnil na 11,3^m. Absolutní magnituda dosáhla - 31,4^M (zářivý výkon 10⁴¹ W). Během několika týdnů zde v malém objemu vzplanul ekvivalent mnoha tisíc obřích galaxií! Zdrojem této energie jen stěží může být obyčejná termionukleární reakce; jediným vysvětlením by byla energie černé díry.

Kvasary v mnohém připomínají aktivní jádra galaxií (rozměry, spektrum, proměnnost optická i radiová), zejména jádra Seyfertových galaxií. Silné rozšíření emisních čar ve spektrech svědčí o pohybech rychlostmi až 3 000 km/s. Byly pozorovány i výrony

hmoty do okolí, jako u některých radiových galaxií typu Cyg A.

Jedna z vývojových teorií kvasarů předpokládá, že jde o zárodky budoucích galaxií: intenzita radiového záření kvasarů by s "věkem" postupně slábla, kvasary by se měnily na kompaktní galaxie s jasným jádrem (Seyfertovy) a nakonec by došlo k přeměně na běžný typ galaxie.

Obraz 63 - Rudý posuv ve spektrech kvasarů

Již na prvních dvou optických spektrech zdrojů 3C-48 a 3C-273 byly patrné emisní čáry, zdánlivě nepříslušející k žádnému prvku. Teprve M. Schmidt r. 1963 ukázal, že jde o čáry posunuté o 60 až 80 nm k červenému konci spektra. Většina kvasarů má však posuvy značně větší. Vzorec pro rychlost vzdalování, uvedený na obr. 61 ($v = c \cdot z$), platí přesně jen pro $z = 0,2$ a menší; dále je nutno přihlídnout k teorii relativity. Platí následující závislost rychlosti pohybu na rudém posuvu (vždy zůstává rychlost nižší než rychlost světla):

z	rychlost vzdalování [% c]	rychlost vzdalování [km/s]
0,00	0	0
0,22	20	60 000
0,73	50	150 000
2,00	80	240 000
3,36	90	270 000
5,28	95	285 000
∞	100	300 000

Dnes známe již tři kvasary s posuvem větším než $z = 3$. Rekord drží objekt QQ 172, jeví se jako hvězdička $17,5^m$ - jeho posuv $z = 3,53$! Naopak nejbližším kvasarem je objekt BL Lacertae, jehož $z = 0,007 \pm 0,005$.

Na obrázku jsou vyznačeny nahoře klidové (laboratorní) polohy čar, vlevo jsou hodnoty z , dole vlnové délky záření.

Obraz 64 - Modely vesmíru

Odpověď na jednu z nejstarších otázek - jak vznikl a vyvíjí se vesmír - není ještě zdaleka jednoznačně formulována. Základním problémem je nepřesnost extrapolace současného stavu v prostoru a času. Pozorovaná expanse galaxií (resp. tímto způsobem interpretovaná pozorování) nás vede do minulosti k okamžiku, v němž tato expanse začala. Tento důsledek rozpínání se shoduje s vývojovými relativistickými modely vesmíru, odvozenými nezávisle Friedmannem a Lemaitrem ve dvacátých letech na základě Einsteinovy obecné teorie relativity.

Einstein sám zpočátku hájil teorii stacionárního vesmíru, homogenního a isotropního, se stálou střední hustotou a s neměnnými zakřivením prostoru. Dosud nevyřešeným problémem by bylo mj. neustálé tvoření hmoty. Avšak uvážíme-li spekulativní zdroje např. ve formě bílých děr a skutečnost, že stačí vzniknout jeden atom vodíku v kubickém kilometru za rok, nelze jednoznačně vyloučit, že něco podobného není možné. Dnes však teorii "steady-state" nezůstalo mnoho zastánců.

Daleko favorizovanější jsou modely nestacionárního vesmíru, v němž je sice zakřivení prostoru všude stejné, avšak mění se s časem. Všechny takové modely

se shodují v počátečním stavu, avšak připouštějí rozdílné průběhy expanse vesmíru.

Hyperbolický model vesmíru - prostor je neohra-
ničený a nekonečný. Průměrná hustota hmoty je příliš
malá, než aby se gravitační silou zastavila expanse
jednou započatá, a proto rozpínání pokračuje neomezeně.
Střední hustota je menší než kritická (kritická hustota
je taková, při níž křivost vesmíru je rovna 0). Křivost
vesmíru je menší než 0.

Parabolický model vesmíru - rozpíná se právě úni-
kovou rychlostí a toto rozpínání se postupně zmenšuje
gravitačními silami. Konečným stavem bude stacionární
stav. Střední hustota vesmíru je rovna kritické, křivost
je rovna 0, geometrie prostoru je euklidovská.

Oscilující model vesmíru - prostor je sice neohra-
ničený, avšak konečný. Průměrná hustota hmoty je příliš
velká (střední hustota větší než kritická), křivost vět-
ší než 0. Proces expanse bude nahrazen po dosáhnutí ma-
ximálního rozměru vesmíru kontrakcí až do výchozího sta-
vu a celý vývoj se může znovu opakovat (např. s periodi-
citou sto miliard roků). Za předpokladu rostoucí entropie
by se mohly jednotlivé maximálně dosažené "poloměry"
vesmíru zvětšovat.

Bohužel, prozatím nemůžeme s jistotou rozhodnout,
který model odpovídá skutečnosti. Vztah rudého posuvu
a vzdáleností známe stále poměrně nepřesně a problema-
tické je i stanovení střední hustoty hmoty ve vesmíru.
Při $H = 50 \text{ km/s} \cdot \text{Mpc}$ je $\rho_k = 4,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$. Podle do-
savadních (zatím neúplných) odhadů je skutečná hustota
asi o dva řády nižší než kritická, avšak chybí seriózní
odhady skrytých forem hmoty ve vesmíru.

Náš graf ukazuje "poloměr" vesmíru v závislosti
na čase podle různých teorií vývoje vesmíru.

Obraz 65 - Decelerační parametr

Jiná možnost, jak se pokusit stanovit model vesmíru, odpovídající skutečnosti, je pokusit se měřit zpomalování expanse, pokud k němu dochází. Toto zpomalení charakterizujeme tzv. deceleračním parametrem q_0 . Pro $q_0 = -1$ by platil stacionární model vesmíru, pro $q_0 = 0$ platí hyperbolický model, pro $q_0 = 0,5$ euklidovský model parabolického vesmíru, pro $q_0 = 1$ a větší bude vesmír oscilovat.

I v tomto případě je však rozptýl měření příliš velký, než aby některé z určení bylo průkazné, i když se zdá být pravděpodobné, že q_0 je poněkud větší než 0. Názorně to dokumentuje náš obrázek, na němž je uvedena závislost rudého posuvu na zdánlivé hvězdné velikosti (jasnosti) objektu.

Obraz 66 - Geometrie vesmíru

Einsteinova obecná teorie relativity nás vede k závěru, že směr šíření elektromagnetického záření, jež je hmotné povahy, lze ovlivňovat gravitačním polem. Tento jev byl již pozorován při zatměních Slunce a výsledky jsou ve shodě s Einsteinovou předpovědí. Pro naše modely vesmíru to má zajímavé důsledky. Např. v geometrii vesmíru nemusí platit pravidlo, podle něhož součet úhlů v trojúhelníku je roven 180° (jen v euklidovské geometrii), nýbrž může být více nebo méně než 180° podle zakřivení prostoru.

Vesmír se nerozepíná do "prázdna", protože prostor je vlastnost, kterou hmota "unáší" s sebou. Vydáme-li se třeba na cestu vesmírem přímočarým letem, nenarazíme ani za nekonečně dlouhou dobu na žádnou hranici, avšak může se nám stát, že několikrát proletíme výchozím bodem.

Obraz 67 - Velký třesk = Big Bang

Jak tedy vypadá v současné době nejatraktivnější teorie vzniku a vývoje vesmíru? Expanse začala ze singulárního stavu (nekonečně malý objem s nekonečně vysokou hustotou hmoty, resp. ve velmi malém objemu s hustotou nad 10^{97} kg/m³). Během první desetitisíciny sekundy se veškerá látka skládala zejména z těžkých částic - hadronů. Po poklesu hustoty na 10^{17} kg/m³ přišla tzv. leptonová éra, trvající "plných" 10 sekund, během níž vznikly lehké částice. Za stavu hustoty 10^7 kg/m³ následovala éra záření, v níž vznikaly protony (jádra nejrozšířenějšího prvku vodíku) a byla porušena rovnováha mezi hmotou a zářením. Pozůstatkem tohoto původně velmi žhavého záření by mělo být tzv. reliktové záření, pozorovatelné na radiových vlnách. Tato éra trvala asi milion let. Od hustoty 10^{-24} kg/m³ trvá současná éra hmoty, v níž se vesmír utvořil v podobě, kterou nyní známe. Pro teorii Velkého třesku hovoří i současná měření zastoupení helia ve vesmíru a objev reliktového záření. Obrázek symbolicky představuje jednotlivé fáze vývoje vesmíru podle teorie Big Bang (shora dolů). Uprostřed je současný stav. V pravé části úhlopříčky pokračuje vývoj podle modelu oscilujícího vesmíru.

Obraz 68 - Kupa galaxií v Severní Koruně

Své putování po poznaném vesmíru zakončíme v obří kupě galaxií, obsahující na 200 000 útvarů a ležící ve vzdálenosti 1 miliardy světelných let. Leží - pozorována ze Země - na malé plošce oblohy v překrásném souhvězdí Severní Koruny.

Kdybychom putovali po vesmíru před několika sty léty, skončili bychom své putování na hranici sluneční soustavy a čekali bychom na první solidní informace o

hvězdách desítky a desítky let. Řeceno obecně: poznání vesmíru stále roste, v posledních desítkách let a létech nesrovnatelně s předchozími staletími, ale v každé době má své hranice, jejichž posunutí nastane vždy v budoucnosti. Tak je tomu i dnes.

Až po určitou míru (množství vědomostí, vzdáleností apod.) jsou poznatky ověřené. Dále postupováním poznání vždy tak, že na základě praktických pozorování a teoretických úvah vzniká domněnka, teorie, která je ověřována měřeními. Tak tomu bude i nadále. Je vždy třeba velmi pečlivě uvážit, kde je hranice věcí poznatých a co je síce poznatelné, ale dosud nepoznané. Je nutno rozlišit, věřím-li ověřenému - či "fandím-li" některé teorii.

V dnešní době (1976) nelze rozhodnout např. o tom, který z modelů vesmíru (lépe: velkých prostor, kolem dosud poznaného prostoru) se blíží skutečnosti a do jaké míry. Tuto otázku jak z hlediska filozofie, tak z hlediska fyziky lze rozhodnout jedině zjištěním skutečných vlastností hmoty. K tomu je nutné např.

- znát přesněji vzdálenosti objektů v kosmologických vzdálenostech,
- určit přesněji Hubblovu konstantu a ověřit, že rudý posuv je dopplerovský (je to velmi pravděpodobné, ale jisté to není),
- rozšířit naše poznání o další prostory ve vzdálenostech mnoha miliard světelných let
- a hlavně lépe poznat podstatu hmoty (vazby částice - vlna-pole) a gravitace. Dokonce lze prohlásit, že bude třeba hledat lepší teorii gravitace, která obsáhne Einsteinovu teorii relativity.

Obraz 69 - Optická astronomie

Při získávání informací o vesmíru jsme až na výjimky odkázáni na elektromagnetické záření, které od jednotlivých objektů přichází. Teprve v poslední době, zejména díky kosmonautice, jsme se dostali za hranice úzkého pásma viditelného světla, které proniká zemskou atmosférou až na povrch planety. Avšak pozemská astronomie není zdaleka se svým vývojem u konce. Velký dalekohled už přestal být ve světě něčím mimořádným a pro efektivitu vědecké práce často není ani rozhodující průměr, jako spíše pomocné vybavení ve formě spektrografů, fotometrů, elektronických zesilovačů atd. Budoucnost optické astronomie spočívá v systematickém využívání pozemních i družicových observatoří.

Největší dalekohled na světě byl nedávno uveden do pokusného provozu - je umístěn na Kavkaze a má na azimutální montáži reflektor o průměru zrcadla 6 metrů. Na druhé místo byl odsunut Mt. Palomarský zrcadlový dalekohled (průměr 5 m). Náš největší dalekohled je reflektor firmy Zeiss Jena (NDR), má dvoumetrové zrcadlo a na observatoři AÚ ČSAV na Ondřejově slouží zejména ke stelárnímu výzkumu.

Obraz 70 - Radiová astronomie

V posledním čtvrtstoletí získala astronomie vynikajícího pomocníka v radiovém výzkumu: radioastronomie dnes nechybí při žádném významnějším objevu. Jsou to právě radiové dalekohledy, které "dohlédnou" do větších vzdáleností (o řád dál, než to dovoluje běžná optická astronomie). Díky jim byly objeveny kvasary, pulsary i mezihvězdná hmota, obsahující organické sloučeniny.

Největší parabolickou anténou je radioteleskop v Arecibo na Portoriku (300 m), umístěný na dně celého jednoho údolí. Největší pohyblivou parabolickou anténu má radioteleskop v Effelsbergu (NSR) - průměr 100 metrů, který je na našem obrázku. Kolos o hmotnosti 3 200 tun lze nastavit na oblohu s přesností 6". V SSSR byl dokončen systém Ratan 600, který se skládá z 900 parabolických panelů, montovaných v kruhu o průměru 576 m. Při rozsahu vlnových délek 4 mm - 21 cm dosahuje rozlišovací schopnosti velkých optických dalekohledů.

Dnes jsou i velké přístroje radiové astronomie používány skupinově, např. při mezikontinentální interferometrii.

Zdokonalování přístrojů pozemské i kosmické astronomie a systematicčnost pozorování nás v budoucnosti nepochybně přivedou k mnoha překvapujícím objevům. Kromě elektromagnetického záření bude nutno zkoumat i korpuskulární záření a další formy šíření energie prostorem. Spolu s novými daty nastoupí i nové interpretace dosavadních a budoucích pozorování.

Astronomie nebude těžit jen z výzkumu vzdáleného prostoru. Právě tak musí využívat znalostí z jiných oborů fyziky a přírodních věd - z teorie atomového jádra stejně jako z teorie relativity. Jedině na základě nových faktů nově zpracovaných lze budovat hypotézy, které nebudou hraničit se spekulacemi.

Poznání veškerých vlastností hmoty je předmětem filozofie, poznání fyzikálních vlastností předmětem fyziky. Zdůrazněme, že např. dialektický materialismus nemůže být nikdy v rozporu s fyzikou, neboť obě disciplíny vycházejí z ověřených poznatků o hmotě a

upřesňují své názory právě na základě nových ověřených vlastností.

Pro průzkum vesmíru - o jehož jednotě jako celku nikdo již dlouho nepochybuje - je charakteristické, že vyřešení záhad obrovského prostoru vesmíru závisí též na poznání nitra atomu a těch nejmenších částí, které jsou dosud známy i těch, které budou teprve objeveny.

* * * *

179a-77-Mn