

ČESkoslovenská akademie věd

Vědecký redaktor

prof. RNDr. Vladimír Vanýsek, DrSc.

Recenzent

RNDr. Jan Svatoš, CSc.

Hvězdářská ročenka 1987

Pod redakcí Pavla Příhody
připravili

Vladimír Karas
Jaroslav Klokočník
Zdeněk Mikulášek
Bedřich Onderlička
Pavel Příhoda
Vladimir Ptáček
Vladimir Vanýsek
Jan Vondrák
Jaromír Zahrádka
Vladimir Znojil

Ročník 63

ACADEMIA
nakladatelství Československé akademie věd
Praha 1986

KOSMICKÉ VÝTRYSKY

VLADIMÍR KARAS

Katedra astronomie a astrofyziky MFF UK

1. ÚVOD

Astronomická pozorování na rádiových frekvencích odhalila bouřlivé procesy probíhající v kvasarech a v aktivních galaktických jádrech. Obrovská množství energie se uvolňuje ve formě úzkých proudů plazmy vycházejících z jádra. Obvykle končí rozsáhlými rádiovými laloky vzdálenými až několik milionů světelných let od optického obrazu galaxie resp. kvasaru. Astrofyzikální výtrysky - jety - nejsou zřejmě ve vesmíru jediným jevem a vyskytuje se i na škálách 10^9 krát menších (nejznámějším příkladem jsou dva výtrysky vycházející v navzájem opačných směrech rychlostí $\sim 80\ 000$ km/s ze zdroje SS 433). Tento objekt je vzdálen od Slunce pouze 15 000 svět.let. Jety byly detektovány v rádiovém i v rentgenovém záření). Též z energetických a časových hledisek jsou mezi jety značné rozdíly, a nemůžeme proto předpokládat jediný fyzikální mechanismus pro objasnění všech jejich vlastností. Nelze však vyloučit, že podstata jejich vzniku je stejná. V tomto článku se zaměříme na extragalaktické objekty.

Jetby nejsou pro astronomii novým jevem. V roce 1917 objevil H.D. Curtis na Lickově observatoři optický jet asociovaný s velkou eliptickou galaxií M 87 ležící v bohaté kupě galaxií v souhvězdí Panny. Délka jetu na obloze činí téměř $30''$. Za počátek intenzivního výzkumu objektů tohoto druhu lze považovat r. 1953, kdy R.C. Jennison a M.K. Das Gupta sestrojili na observatoři Jodrell Bank první rádiový interferometr. S překvapením zjistili, že rádiový zdroj Cygnus A se skládá ze dvou difúzních laloků. Mezi nimi se nachází eliptická galaxie, která je optickým protějškem rádiového zdroje. Později se ukázalo, že takové uspořádání je pro extragalaktické rádiové zdroje typické. Důležitou úlohu v něm mají jetby, které - jsou-li pozorovatelné - spojují aktivní centrální objekt s rádiovými laloky po obou stranách.

G. Lelièvre a jeho spolupracovníci získali 3,6metrovým dalekohledem na Mauna Kea elektronografické obrazy M 87 a blízkého kvasaru 3C 273. Fotografie mají vysoké rozlišení a optický vzhled jetu je na nich podobný. Výtrysk z M 87 ovšem začíná v jádru galaxie a jeho stopa končí ve vzdálenosti 5000 svět.let, zatímco u kvasaru začíná jet ve vzdálenosti 70 000 svět.let a má délku 14krát větší. Zajímavá je i ta skutečnost, že oba objekty mají - na rozdíl od mnoha dalších - pouze po jednom jetu.

Většinu informací dosud přinesla rádiová astronomie. Výzkum se týká řady otázek:

- výskyt rádiových jetů a laloků, jejich struktura a existence tsv. horké skvrny produkující intensivní rádiové záření;
- rozložení intenzity záření v příčném a v podélném směru;
- kolimační vlastnosti (rozevření jetů činí 5 - 30°, pozoruje se však mísťa zvýšené expanze v příčném směru);
- souvislosti mezi protilehlými jety, existence jednostranných výtrysků;
- ohnutí a "třepotání" jetů (některé výtrysky jsou přímé, jiné zahýbají až o 90°. Všechny mají při velkém rozlišení komplikovanou strukturu);
- rádiové spektrum;
- uspořádání magnetického pole v příčném a podélném směru, polarizace záření;
- rozdělení tlaku a rychlostní pole v jetech (pozoruje se tzv. nadsvětelné rychlosti).

Theoretická astrofyzika má před sebou dva úkoly: popsat šíření plazmy v okolním prostředí a vytvořit model "centrálního motoru", jenž dodává jetům energii a udržuje jejich směr a kolimaci.

2. POZOROVACÍ METODY

K dosažení rozlišovací schopnosti 1" na vlnové délce 10 cm by bylo třeba radioteleskopu se vstupní aperturou asi 12 km. Takový přístroj je z pochopitelných důvodů neuskutečnitelný, ale přesto dnes dosahujeme na rádiových frekvencích lepšího rozlišení než na optických.

Metoda rádiové interferometrie byla vyvinuta počátkem 50.let v Austrálii, Anglii a Francii. V nejjednoduším případě interferují signály ze dvou vzdálených radioteleskopů. Vyzařovací charakteristika takového systému má četné laloky, které se zužují s rostoucí vzdálostí antén. Tím se zlepšuje rozlišovací schopnost přístroje. Základnu ovšem nelze rozširovat neomezeně. Jedním z problémů je rostoucí množství úzkých laloků ve vyzařovací charakteristice. Vzniká tak nejednoznačnost, ve kterém z nich vlastně pozorovaný objekt leží, což opět zhoršuje určení jeho polohy. Další obtíží je neúnosné zkreslení signálu při velké délce propojovacích kabelů. První problém lze vyřešit stavbou systému s více anténami. Tím se snižuje počet směrů, z nichž přicházejí signály ve fázi, přičemž šířka vyzařovacích laloků je stále dáná nejvzdálenějšími anténami. První takové systémy začaly pracovat již koncem 50.let, avšak největší rozvoj nastal až s příchodem moderních počítačů. Ty umožnily porovnávat data získaná s odstupem několika hodin, během nichž se systém potočil i se Zemí vůči zdroji. Interferometrie využívající propojených antén dosáhla rozlišovací schopnosti

0,05". Přitom se ukázalo, že řada rádiových zdrojů má úhlový průměr ještě menší.

V r. 1967 vyzkoušeli poprvé kanadští radioastronomové metodu interferometrie s velmi dlouhou základnou (Very-Long-Baseline-Interferometry, VLBI). Signál z antény se zaznamenává na magnetický pásek spolu s časovými značkami z atomových hodin. Hodiny u jednotlivých antén musí být navzájem synchronizovány. Zaznamenané signály jsou později počítačově zpracovány. Poněvadž odpadla potřeba dlouhých kabelů, odstranila se komplikace se zkreslením signálu a bylo možno použít vyšší frekvence. Již první měření dosáhla při délce základny 3000 km a vlnové délce 67 cm rozlišovací schopnost 0,02". Záhy následovala měření s mezikontinentálními základnami. Vzdálenost 6319 km z observatoře Green Bank do Onsala Space Observatory (Švédsko) umožňuje rozlišení 0,001" na vlnové délce 6 cm (5 GHz). Řada extragalaktických rádiových zdrojů má však úhlový průměr ještě menší. Metodou VLBI se podařilo dosáhnout rozlišení $2 \cdot 10^{-4}$ " na vlnové délce 1,3 cm (22 GHz). Zde také zřejmě leží hranice jejich možností.

Dosud se využívalo již existujících radioteleskopů, které často neměly nejvhodnější polohu a speciální vybavení.

Počátkem 70. let začali američtí a kanadští astronomové plánovat rozsáhlý systém VLBA (Very-Long-Baseline-Array), určený právě pro interferometrická měření s dlouhou základnou. Podle současného plánu se má postavit deset 25m teleskopů rozmístěných od Havajských ostrovů až k Portoriku. Jejich polohy byly vybrány s ohledem na místní podnebí a výsledný interferenční obraz. Systém bude řízen dálkově z centra poblíž známé řady Very-Large-Array v Novém Mexiku. Všechny antény budou pozorovat současně jedno místo na obloze. Každá z nich bude vybavena záznamovým zařízením a atomovými hodinami. Magnetické pásky se záznamy se potom pošlou do centra k dalšímu zpracování. Celý systém bude mít efektivní průměr 8000 km a bude moci pracovat na vlnových délkách 0,7 - 90 cm. Kanadští astronomové plánují stavbu ještě další podobné řady, Canadian Long-Baseline-Array (CLBA). Má být tvořen osmi 32m teleskopy. Každý bude přeladitelný v intervalu vlnových délek 1,3 - 49 cm a celý systém bude kompatibilní s VLBA. Také Sovětský svaz plánuje stavbu systému tohoto typu. V konceptu je zatím vypuštění satelitu Quasat s 15m anténa, který by umožnil až čtyřnásobné rozšíření základny a omezení rušivých signálů v zaznamenaných datech.

V současnosti přichází největší množství informací z Very-Large-Array (VLA) v Novém Mexiku. Tento systém je tvořen 27 propojenými anténami o průměru 25 m a dosahuje rozlišení 0,2". Britský systém propojených antén Multi-Element-Radio-Linked-Interferometry-Network (MERLIN) s centrem v Jodrell Banku představuje přechod mezi VLA a

VLBI. Tvoří jej soustava šesti antén ve vzdálenostech 6-134 km a poskytuje několikrát lepší rozlišení proti VLA.

Záření jetu v optické a rentgenové oblasti může být pro jeho energetickou bilanci stejně důležité jako v oblasti rádiové, avšak jeho detekce je obtížnější. Pokrok v rozlišovací schopnosti znamenala elektronografická metoda a dobré výsledky se očekávají především od prvků CCD. Další svýšení rozlišovací schopnosti by měl přinést Space Telescope. Navíc se od něj očekává velký pokrok ve výzkumu vztahů mezi morfologickým typem galaxie a aktivitou jádra.

Na rok 1986 se plánuje ROSAT, společná družice USA a NSR pro oblast rentgenového záření, která by měla zlepšit naše znalosti o statistice extragalaktických zdrojů v tomto obooru. Detekce některých dalších jetů v rentgenovské části spektra se očekává od družice AXAF (Advanced X-ray Astrophysical Facility), plánované na r. 1991.

3. VÝSLEDKY POZOROVÁNÍ

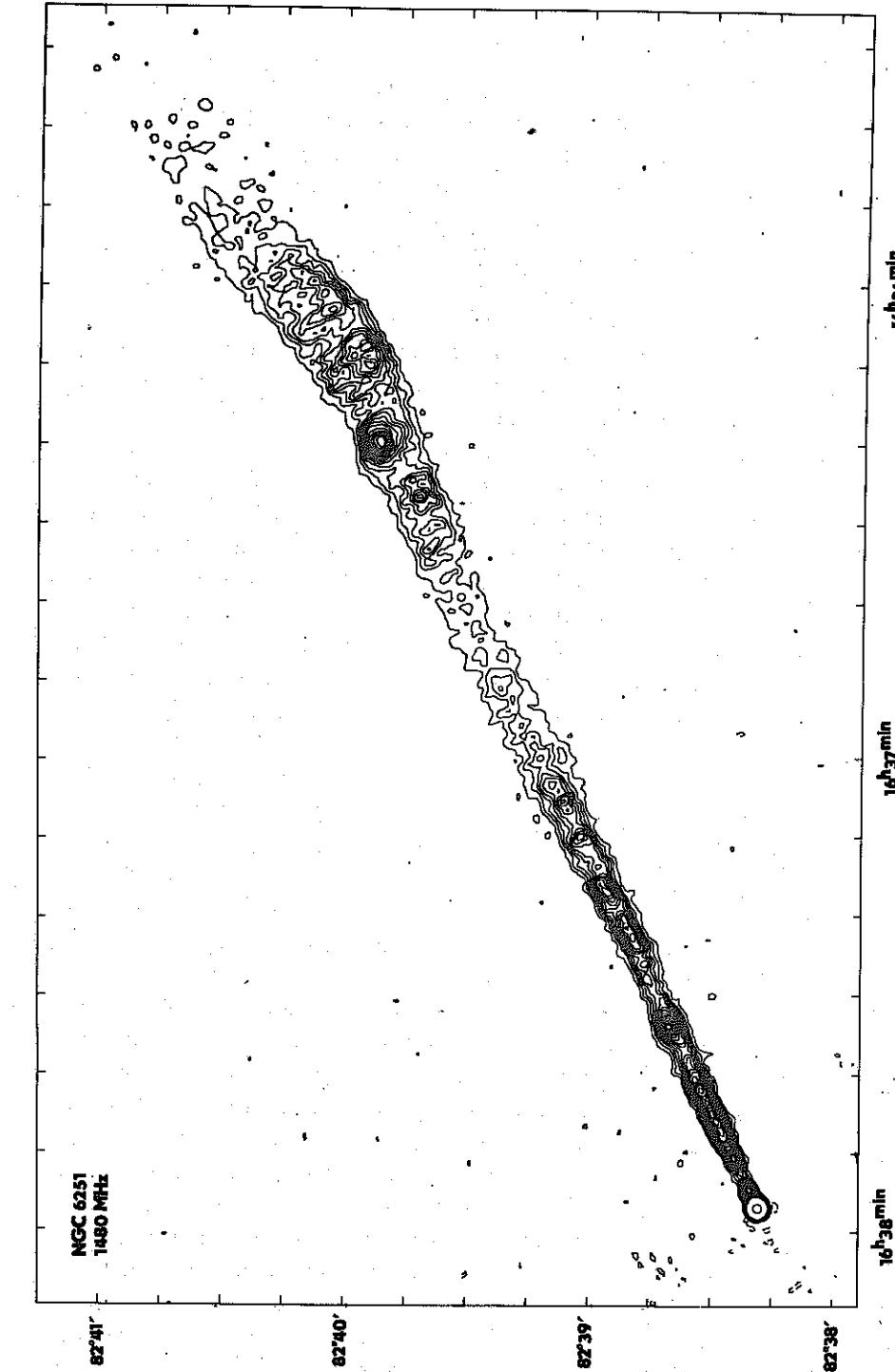
Radiocastronomická pozorování odhalila, že jety jsou poměrně úzké proudy plazmy vycházející z jádra některých galaxií a kvasardů a emitující rádiové záření. Dosahuje dálku 10^6 svět.let. V případě rozsáhlých rádiových zdrojů končí rádiovými laloky, které se nacházejí daleko od optického obrazu vlastní galaxie. Energetický obsah laloků je kolem 10^{53} J (10^{60} erg). Na jejich vnější části obvykle leží tzv. horká skvrna.

Z pozorovacích důvodů byly zavedeny tři charakteristiky, které mají jetu splňovat:

- délka je alespoň čtyřnásobkem šířky,
- při velkém rozlišení jsou odlišitelné od ostatních struktur (kontrastem nebo morfologií),
- vycházejí z kompaktního rádiového centra.

Katalog Bridlea a Perleyho (1984) uvádí 125 známých jetů. Většina extragalaktických jetů je asociovaná s eliptickými galaxiemi a s kvasary. Též některé Seyfertovy (spirální) galaxie mají neobvykle aktivní kompaktní jádra a rádiové struktury tvaru "S". Jsou známy spirální galaxie, jež pozorujeme ze strany a z nichž vycházejí rádiové struktury podél rotační osy. Dosud (1984) je však potvrzen pouze jeden dvojitý rádiový zdroj, který není asociovan s eliptickou galaxií. Družice IRAS jej ztotožnila s mohutnou Seyfertovou galaxií.

Vzhled jetů je velice rozmanitý. Zmínili jsme se již o výtrysku spojeném s galaxií M 87. Dalším dobré známým příkladem je jet u eliptické galaxie NGC 6251, vzdálené od nás $3 \cdot 10^8$ svět.let, který objevili



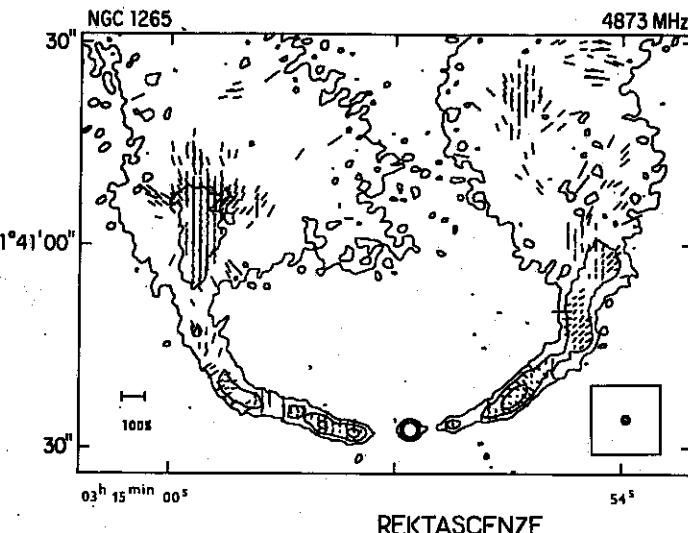
Obr. 1 Rádiová mapa vnitřní části jetu NGC 6251, pořízená systémem VLA s rozlišením 2,11''. Na vodorovné ose je vynesena rektascenze, na svislé deklinace. Všechny souřadnice jsou pro ekvinokrium 1950,0.

P. Waggett, P. Warner a J. Baldwin r. 1977. Vnitřní část jetu je velice přímá a vychází z téměř bodového zdroje v centru galaxie. Její délka je $4,4'$ (asi $4 \cdot 10^5$ svět.let) a navazuje na ni slabší zakřivená část pokračující $3,5'$. O rok později se podařilo metodou VLBI zmapovat i centrální část. Ukázalo se, že opět obsahuje úzký jet vycházející z ještě menšího zdroje. Tento "minijet" je pouze 3 svět.roky dlouhý a je téměř kolineární s rozsáhlým jetem (rozdíl pozicičních úhlů činí asi 3°). Byl rovněž detektován protilehlý výtrysk, jehož intenzita je 40 - 200krát nižší (v závislosti na vzdálenosti od jádra).

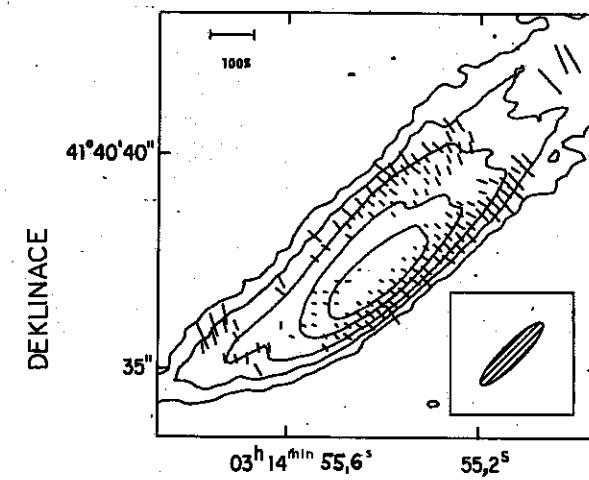
Poněkud jinak vyhližejí jetu 3C 449, související s galaxií vzdálenou 10^8 svět.let. Jde o dva výtrysky vycházející v opačných směrech přímo z jádra galaxie. Oba vykazují několik prudkých záhybů. Severní jet ve vzdálenosti asi 10^5 svět.let náhle uhýbá k východu, po chvíli zpět do severního směru a pak opět k východu. Jižní jet se také střídavě zahýbá k východu a zase k jihu. Tato zrcadlová symetrie může mít původ v pohybu galaxie při oběhu kolem jejího souputníka. Mnohdy se u těchto objektů skutečně podařilo nalézt blízkého průvodce. Typickými příklady jsou galaxie 3C 31 a 3C 449. Naopak inverzní symetrie některých jetů (např. u galaxií NGC 326 nebo 3C 315) je zřejmě způsobena precesním pohybem osy zdroje. Precese může nastat, pokud orbitální úhlový moment akreované hmoty není rovnoběžný s rotační osou centrálního objektu - černé díry (viz kap. 5). Pravděpodobnější vysvětlení je vzájemné působení černých děr v jádrech interagujících galaxií.

V obou předchozích případech se vlastně hmota jetu pohybuje volně, ačkoli výsledný vzhled nasvědčuje spíše zakřivené trajektorii. V bohatých kupačích galaxií s vyšší hustotou intergalaktické hmoty se častěji vyskytují pozoruhodné jety připomínající jakési rádiové "ohny". Postupně se stále více zahýbají - až o více než pravý úhel - a nekončí horlkou skvrnou. Zde je ohnutí pravděpodobně způsobeno interakcí jetu s okolním prostředím.

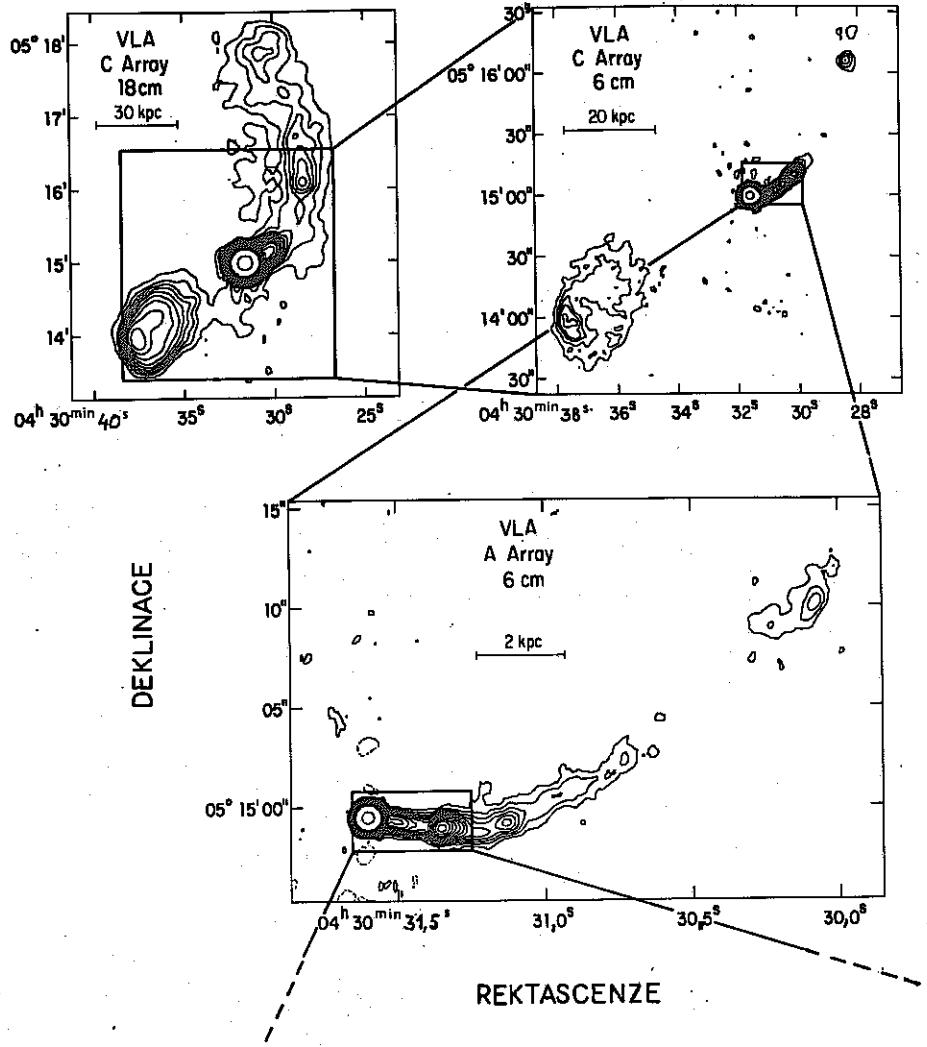
Úplnou statistiku rádiových zdrojů dosud nemáme, nicméně řadu závislostí se již podařilo nalézt. Existují dva druhy extragalaktických rádiových objektů: kompaktní (s rozměry $\lesssim 10$ svět.let na frekvenci 5 GHz), související se vzdálenými kvasary, a rozsáhlé ($\gtrsim 10^3$ svět.let na 5 GHz), související s bližšími dvojitými zdroji. První z nich bývají často proměnné, mají ploché spektrum a nepravidelné slabší halo, u druhých pozorujeme slabší jádro, tvořené galaxií nebo kvasarem, a většina rádiového záření přichází od nich z postranních laloků. Jetu rozsáhlé se častěji nacházejí v méně intenzivních dvojitých rádiových zdrojích. Častečně jde o výběrový efekt, neboť intenzivní zdroje jsou ve větších vzdálenostech, kde již nelze jejich jetu objevit. Vzdálenost však tento trend zřejmě nevysvětlí bez zbytku.



Obr. 2 Vrstevnicová mapa celkové intenzity zdroje NGC 1265 na vlnové délce 6 cm. Směr úseček vyznačuje poziciční úhel polarizace, jejich délka stupen polarizace (úsečka v levém dolním rohu má délku odpovídající 100% polarizaci). Elipsa vpravo dole vyznačuje citlivost a tvar vyzařovací charakteristiky systému.

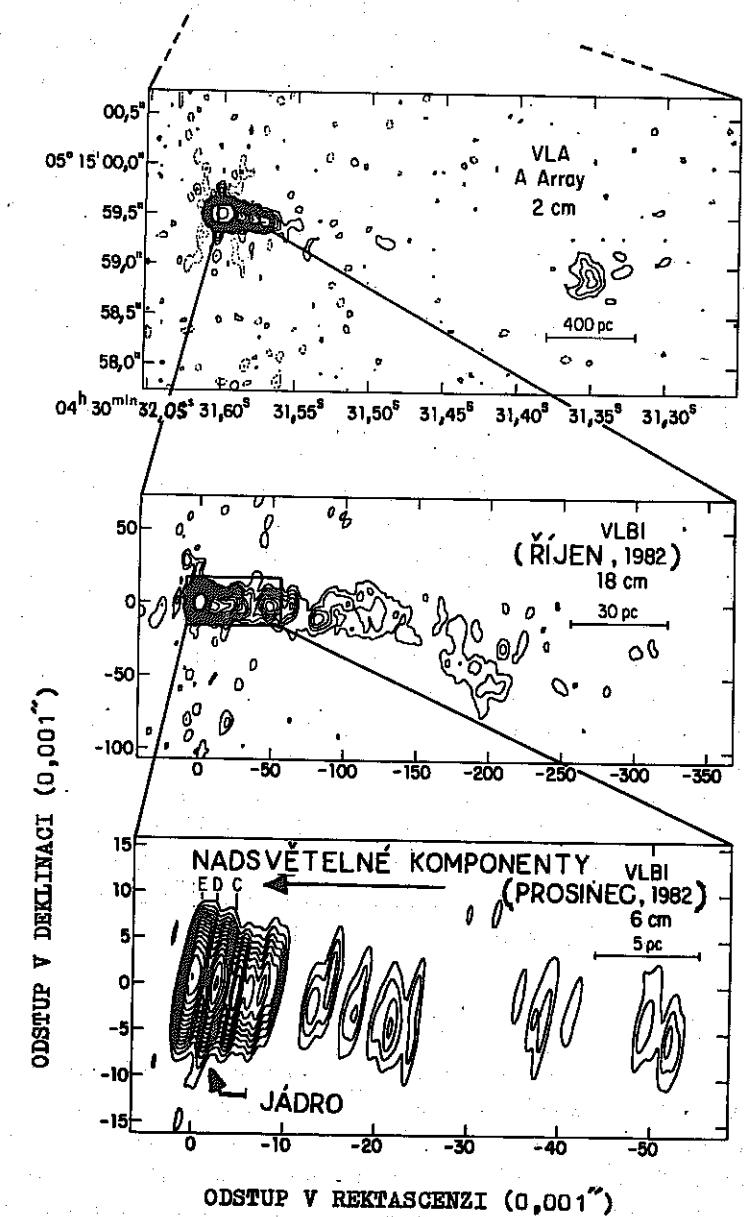


Obr. 3 Detail mapy z obr. 2.



Obr. 4 Rádiová struktura zdroje 3C 120 na škále 0,5 pc - 30 kpc. U každé mapy je uveden pozorovací systém a vlnová délka. 3C 120 je první objekt, u něhož byla nalezena nadsvětelná rychlosť.
(1. část)

254



Obr. 4 (2. část)

255

Záření rádiových zdrojů je polarizováno, tzn. elektrické pole v rádiových vlnách preferuje některý směr. Polarizace je důsledkem toho, že jde o synchrotronové záření elektronů, které se pohybují v magnetickém poli a jsou urychlovány kolmo k jeho orientaci. Měřením polarizace tedy získáme informace o uspořádání magnetického pole. V intenzivních jetech jsou siločary magnetického pole rovnoběžné se směrem jetu, zatímco u slabých bývají kolmé. Ve výtryscích střední intenzity se často pozoruje přechodová oblast - blízko jádra galaxie je magnetické pole paralelní a postupně přechází v kolmé. Také v příčném směru se může magnetické pole měnit od B_{\parallel} k B_{\perp} . Komplikovaná struktura magnetických polí je dána elektrickými proudy, které v jetech tečou.

Úloha jetu v rádiových zdrojích je celkem jednoznačná: zásobují energií, hmotou, hybností a magnetickým tokem rádiové laloky. Zdrojem je aktivní jádro. Hustota vodíkových atomů v intergalaktickém prostředí je asi $10^{-6}/\text{cm}^3$. I tak malá hustota způsobuje postupné brzdění hmoty jetu, která po vyvržení z jádra musí tímto prostředím pronikat. Ve vlastním jetu je tok hmoty s nejvyšší pravděpodobností velmi uspořádaný a supersonický, avšak v oblasti horké skvrny vzniká rázová vlna, v níž se většina uspořádané kinetické energie mění na energii relativistických elektronů a magnetického pole.

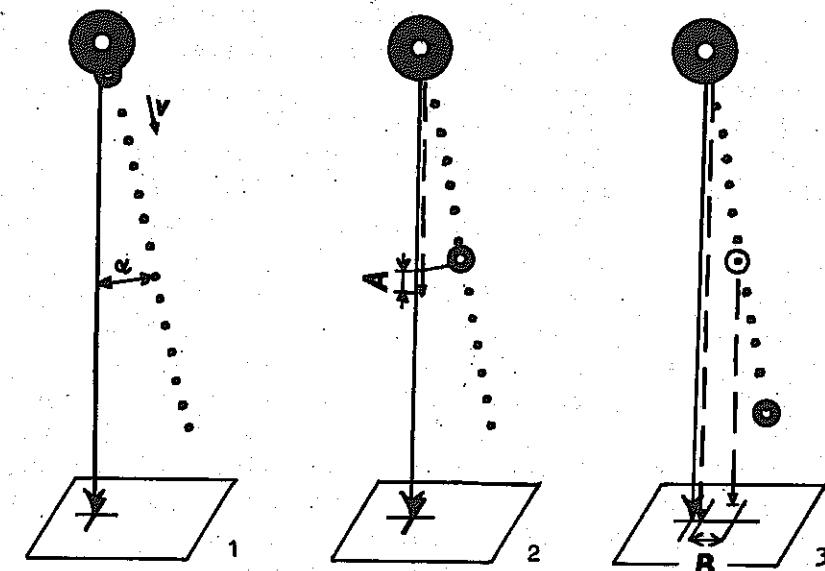
Viděli jsme již, že mnohé jety vykazují velká zahnutí. Ta mohou být způsobena (kromě interakce jetu s okolní hmotou nebo pohybu zdroje) prostě jejich nestabilitou. Výtrusky, které se chybají o více než 90° a neztrácejí přitom svou integritu, však jistě nestabilní nejsou. Známe-li rychlosť intergalaktického prostředí vůči galaxii a délku rádiového ohonu u takových objektů, můžeme odhadnout stáří jetu. Zpravidla dostáváme hodnoty kolem $10^8 - 10^9$ let.

4. NADSVĚTELNÉ RYCHLOSTI

Metodou VLBI se podařilo na škále řádu jednotek světelných let nalézt jetu, které jsou asociovaný s jádry kompaktních rádiových zdrojů nebo rozsáhlých dvojitých zdrojů. Většinou pozorujeme jediný jet (tj. druhý je alespoň 10krát slabší). Pozorujeme-li u objektů s jednostrannými jetu jak jáderný minijet, tak i rozsáhlý vnější výtrusk, míří oba na tutéž stranu. V případě kompaktních rádiových zdrojů je jet obvykle značně zahnutý a úhel mezi jeho směrem a směrem rádiové struktury vně zdroje činí $20 - 40^\circ$. Naproti tomu u rozsáhlých zdrojů míří jet ve směru laloků s přesností několika stupňů.

Měření rychlosti pohybu hmoty v jetech kompaktních zdrojů vedla v několika případech k hodnotám značně převyšujícím rychlosť světla

(v jádrech rozsáhlých dvojitých zdrojů nebyly nadsvětelné rychlosti dosud pozorovány). Nejznámější je v tomto směru kvasar 3C 273 s $60\ 000$ svět.let dlouhým optickým jetem. Z jádra kvasaru vychází VLBI jet, ve kterém byla změřena rychlosť plazmového oblaku, převyšující (při předpokládané vzdálenosti $1,5 \cdot 10^9$ svět.let) pětinásobek rychlosť světla. Jedním z nejpravděpodobnějších vysvětlení tohoto výsledku je kinematický efekt, vyžadující pouze, aby byl plazmový oblak vyvržen přiblížně ve směru k pozorovateli vysokou (i když podsvětlou) rychlosťí. Změřená rychlosť může v tomto případě rychlosť světla převyšovat. Na víc v tomto uspořádání působí Dopplerův jev a aberace světla zesílení jetu mířícího k pozorovateli. Existuje-li také výtrusk mířící opačným směrem, nebude pozorovatelny, neboť ze stejného důvodu bude jeho záření značně zeslabeno. To je jedna z možných příčin vyšší svítivosti (zdánlivě) jednostranných jetů. Právě popsaný model má mnoho předností, poněvadž jednotně vysvětuje vlastnosti mnoha rádiových zdrojů. Podle tohoto scénáře by mely ve skutečnosti všechny být dvojitými zdroji s rádiovými laloky napájenými dvěma jety. Vcelku izotropní zá-



Obr. 5 Možné vysvětlení nadsvětelných rychlosťí změřených metodou VLBI v některých výtruscích. V okamžiku 1 byl z galaxie vyvržen plazmový oblak směrem k pozorovateli (úhel α je malý). Celou světelnou vlnoplochu z této události předbíhá v okamžiku 2 plazmový oblak o vzdálenost A . Pokud však není rychlosť plazmonu o mnoho menší než rychlosť světla ($v/c \rightarrow 1$), bude v okamžiku 3 vzdálenost $B > A$ a pozorovatel mylně usoudí, že se oblak pohybuje nadsvětlou rychlosťí v $\sim cB/A$.

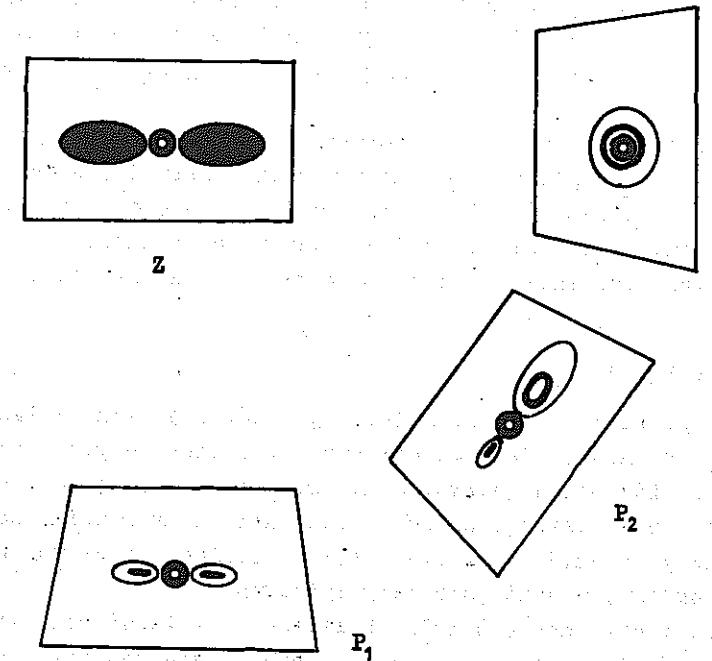
ření laloků vytváří halo kolem kompaktních objektů, které pozorujeme přibližně ve směru jetů. Výraznější zakřivení jetů, které pozorujeme u kompaktních zdrojů, je tak vysvětlováno geometricky. Zdroje, jež se jeví jako dvojitě, pozorujeme pod větším úhlem. Tok hmoty v jetech je u intenzivních zdrojů relativistický a my pozorujeme pouze jeden výtrysk. Přitom u relativistických jetů nevzniká problém s jejich speciálním směrováním vůči pozorovateli, protože i pro úhly $\sim 60^\circ$ dostáváme poměr intenzity obou jetů při $v \rightarrow c$ kolem 1:20. U slabších zdrojů je tok subrelativistický, Dopplerův jev není tolik významný a detektovatelné jsou oba výtrysky.

Jsou známy objekty, u nichž nelze z energetických důvodů vysvětlit jednostrannost jetu Dopplerovým jevem. Alternativní vysvětlení předpokládá souvislost mezi jasností jetu a jeho stabilitou. Nestability ve výtrysku vedou k větší dissipaci kinetické energie uspořádaného toku částic a tím ke zvýšení jasnosti jetu. Observačním testem by mohla být pozorování struktury laloků nebo jejich vzdálenosti od jádra ve zdrojích s jednostrannými jety. Liší-li se systematicky na jedné straně takových objektů od protilehlých laloků, bude zřejmě vysvětlení s Dopplerovým jevem neudržitelné. Jsou známy galaxie (např. NGC 5128), u nichž je spektroskopicky určená rotační osa kolmá ke směru našeho pohledu, a přesto pozorujeme jediný výtrysk vycházející podél této osy. Dokonce pozorování některých jednostranných jetů nasvědčuje tomu, že detektovaný jet míří ke vzdálenějšímu laloku.

Vysoký tok energie jetu odpovídá nejlépe supersonickému proudění hmoty. Velká zahnutí výtrusků na škále 100 světlet svědčí spíše pro malé rychlosti. Přímé určení rychlosti však možné není. K dispozici máme pouze nepřímé indikátory, jako jsou optické emisní čáry, změny rádiové morfologie při VLBI, rozdělení jasnosti v rádiovém oboru, změna úhlového rozměru s časem apod. Jedna z nepřímých metod je založena na standardním modelu, ve kterém je energie generovaná v jádře přenášena kolimovaným svazkem do rádiového laloku. Tam je tok zabrzděn a energie dissipována v rázové vlně. Svazek se ztotožňuje s jetem (jenž sám pozorovatelný být nemusí) a oblast rázové vlny s jasnější horkou skvrnou. Je-li energie přenášena uspořádaným kinetickým tokem částic bez ztrát, je poměr mechanické energie jetu L k toku hybnosti T roven poměru kinetické energie K jedné částice k její hybnosti P :

$$\frac{L}{T} = \frac{K}{P} = \frac{(\gamma - 1)mc^2}{(\gamma - 1)^{1/2} mc^2} = c \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right)^{1/2}, \quad \gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}.$$

Hodnoty L a T lze určit z údajů o horké skvrně. V odhadu je značná chyba, neboť nelze dostatečně přesně stanovit účinnost přeměny mecha-



Obr. 6 Pozorovanou strukturu rádiových zdrojů s relativistickými jety silně ovlivnuje Dopplerův jev a smerce světla. Zdroj Z má kompaktní jádro, které vyzařuje izotropně, a jetu, které v soustavě pozorovatelů P vyzařuje především ve směru šíření plazmy. Výsledný vzhled objektu závisí proto na orientaci vůči pozorovateli.

nické energie na rádiové záření horké skvrny a laloku. Kombinací spodní hranice pro L a horní hranice pro T však pro většinu rádiových galaxií, pro něž je metoda použitelná, vychází rychlosť v jetu $\approx 0,1 c$.

Nejpravděpodobnější je, že všechny silné zdroje s jednostrannými jety vykazujícími nadsvětelné rychlosťi mají jetu relativistické – na rozdíl od zdrojů s rádiovými chony. U některých rozsáhlých zdrojů dostáváme dolní odhad rychlosťi prostě z jejich maximálního možného stáří. Např. 3C 236 má rozměr $20'$ a při rychlosći expanze 300 km/s vychází jeho věk $0,5 \text{ H}_0^{-1}$, tj. srovnatelný se stářím vesmíru. Zpřesněná pozorování jednostranných jetů by měla odhalit, zda jde o skutečnou asymetrii, dopplerovské zesílení a zda jsou odůvodněné tzv. flip-flop modely (střídavě pracuje vždy jeden z jetů), které mají několik silných observačních podkladů (např. 3C 234, 3C 236).

Důležitá je otázka časového vývoje jetů. Jsou známy objekty s dvojitou horkou skvrnou, přičemž jet vede pouze k jedné. Zdá se tedy, že změnil směr. Pro dynamiku jetů bude zřejmě podstatný vliv tur-

bulence a magnetického pole. Nelineární jevy se však dosud podařilo zahrnout pouze do hydrodynamických počítacových experimentů ve dvou dimenzích. Dalším krokem bude přiblížení magnetického pole a přechod k 3-D modelům.

Přes velký nedostatek v našich pozorováních, kterým je nedostatečná citlivost optických a rentgenových přístrojů, podařilo se několik jetů detektovat i v této části spektra. Znamená to, že v ní vyzařují mnohem více energie než na rádiových vlnách, takže odhadnout celkové množství energie, které jety vyzařují a přenášejí, je obtížné.

5. VZNIK JETŮ

Klíčovým problémem v teorii jetů je otázka jejich vzniku. Je známo několik mechanismů, jež vedou k vytvoření směrovaných výtrysků hmoty. Některé z nich mohou vysvětlovat princip menších jetů v Galaxii, ale nehodí se pro extragalaktické vzhledem k extrémním požadavkům na energetický výkon, dobu života, stálost kolimace a přitom poměrně malé rozdíly objemu, v němž jsou jety vytvářeny.

Není třeba, aby počáteční kolimace byla lepší než asi 60° , neboť existuje několik efektů, které způsobují postupnou fokusaci jetů dál od jádra. Jednou z možností pro centrální zdroj je tryskový mechanismus, vznikající v důsledku interakce chladnějšího a hustšího oblaku plynu se vzlínavým materiélem, injektovaným do jeho středu. Pokud je oblak gravitačně vázán centrálním tělesem (galaxií), avšak přitom rotuje, májí jeho izobary asférický tvar. Na hranici obou tekutin vzniká nestabilita a vzlínavý materiál proudí kolem rotační osy. Tryskový efekt se může objevit také tehdy, vytvoří-li se během akrece plynitého materiálu jakési výrovité trachytéře nebo komíny. Jsou známy dva efekty, které mohou takové trachytéře vytvořit: v prvním případě je akrovaný materiál vytlačen od rotační osy odstředivými silami, v druhém jde o relativistický jev, v jehož důsledku je oblast podél rotační osy nestacionární a hmota v ní buď padá k centru, nebo se od něj vzdaluje.

Máme četné důvody se domnívat, že kolimace jetů probíhá v oblasti obklopující velmi hmotnou černou díru. Předpoklad o její přítomnosti v aktivních jádřech galaxií a kvasarů podporuje hlavně jejich rychlá časová proměnnost. Mnohé rádiové zdroje mění výrazně svou jasnost během jediného dne. Odtud plyne, že by rozdíly oblasti, v níž záření vzniká, měly být menší než 1 svět. den. Tato vzdálenost odpovídá přibližně desetinásobku poloměru horizontu černé díry s hmotností $10^9 M_\odot$. Byla zaznamenána proměnnost v oboru X-záření na časové škalce hodin. Samotná rádiová pozorování existenci černých dér přímo nevyžadují,

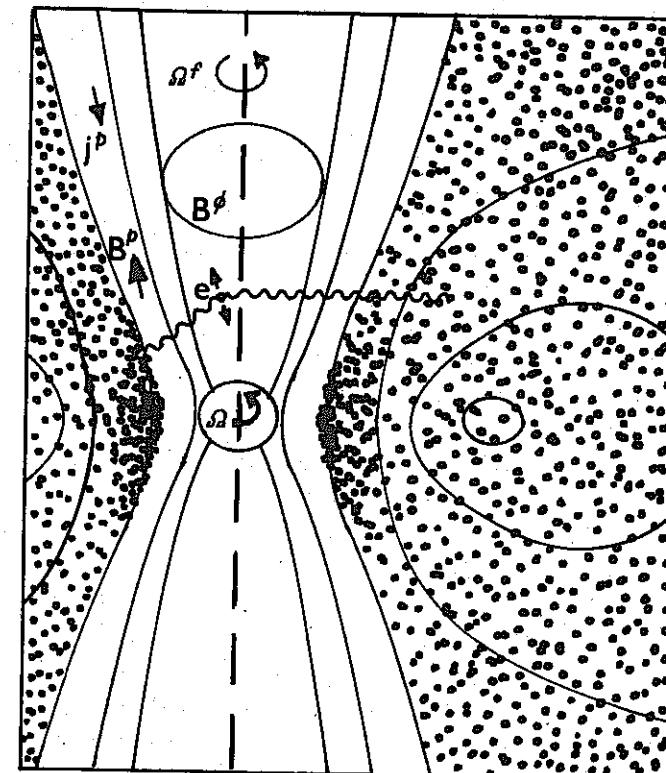
neboť dosažená rozlišovací schopnost odpovídá 10^3 - 10^5 poloměrům horizontu.

Existence masivních černých dér ve vesmíru je pravděpodobná, neboť jsou konečným produktem většiny možných vývojových cest kosmické hmoty. Tyto černé díry mají zřejmě velmi velký moment hybnosti, což je pro vznik jetů podstatné. Rotující (Kerrova) černá díra tak představuje gyroskop, nesbytný k vytvoření kolimovaných svazků. Konkrétní mechanismus urychlování hmoty je však otázkou do diskuse. Vlastně ani přesně nevíme, co je v jetech urychlováno - nerelativistická, relativistická nebo elektron-positronová plazma či opticky hustý plyn? Přesto již máme scénář, do něhož řada observačních skutečností dobře zapadá: Rotující černé díry k sobě gravitačně přitahují okolní hmotu, která sama má zřejmě dostatečně velký orbitální moment hybnosti pro vznik akrečního disku. Plazma v okolí rotující černé díry vykonává relativistický precesní pohyb kolem rotační osy. Vázané obory častic totiž buď leží trvale v rovníkové rovině, nebo ji opakovaně protínají. Body, v nichž nerovníková dráha protíná rovinu rovníku, jsou unášeny ve smyslu rotace (tyto skutečnosti plynou z řešení relativistických pohybových rovnic). Viskozita v plazmě pak způsobí vytvoření akrečního disku ležícího v rovníkové rovině, takže tento model vede ke vzniku axiálně symetrického systému. Struktura disku závisí na tlaku záření a častic v jeho objemu a na jeho schopnosti vyzářit nebo jinak se zbavit energie uvolněné v důsledku viskozity. Tenké disky (tloušťka v daném místě < vzdálenost od rotační osy) mohou existovat pouze při malém vnitřním tlaku. Modely tlustých disků udržovaných tlakem záření jsou relevantní tehdy, je-li následkem vysoké akrece luminosita nad kritickou - Eddingtonovoumezí, při níž se vyrovnává gravitační působení s tlakem záření. Mohou být adekvátní pro popis některých objektů, zejména kvasarů, ale dávají optické a UV-záření vysoko nad hodnotou pozorovanou v jádřech většiny galaxií souvisejících s dvojitými rádiovými zdroji. Je proto třeba se zabývat akrecí při nízkých hodnotách $\dot{M} \ll \dot{M}_{\text{Edd}}$. Mechanismus produkovající uspořádaný tok hmoty v jetech musí být velice efektivní a vyzářené teplo malé. Důležitou úlohu má magnetické pole, které je vmarzlé do akreované plazmy (tj. magnetické siločáry jsou unášeny spolu s hmotou; "zamrznutí" magnetického pole je obvyklý termín, kterým označujeme tuto skutečnost. Vyplývá - za určitých předpokladů - z magnetohydrodynamických rovnic, tj. z pohybových rovnic plazmy v magnetickém poli). Viskozita je způsobena magnetickým polem a turbulencemi. Opět existují dvě self-konzistentní řešení rovnic magnetohydrodynamiky a zářivého pole, které v závislosti na počátečních podmírkách a vnějším působení určují teplotní stav disku. Prvním je tenký disk s teplotou $\sim 10^4$ K. Toto řešení není sta-

bilní, při zahřátí vede k tlakem udržovanému tlustému disku - toru. Rovněž interakce s netermálním zářením (např. jetu) může způsobit nestabilitu tenkého disku, jenž proto představuje adekvátní řešení jen v tom případě, kdy je k dispozici účinný ochlazovací mechanismus. Tím může být Comptonův rozptyl a v přítomnosti magnetického pole synchrotronové záření. Oba efekty ochlazují především elektrony. Srážkami se pak snižuje rovněž energie iontů. Tlustý disk se za těchto podmínek přemění na tenký. Za poměrně slabých podmínek na akreci hmoty však ionty energií kolizemi téměř neztrácejí a vzniká plazma s odlišnou elektronovou a iontovou teplotou. Disk je v tom případě udržován tlakem iontů a zůstává tlustý.

Tory jsou schopny vytvářet kolimované svazky částic. Základem pro jejich vznik jsou trhyty přibližně parabolického tvaru, vznikající podél rotační osy. Hmota je do této oblasti injektována ze stěn toru. Tlakem záření je urychlována směrem ven. Tímto mechanismem se asi 1 % záření přemění na energii kolimovaného toku částic, což je pro některé málo svítivé rádiové zdroje se dvěma jetu postačující. Centrální Kerrova černá díra, obklopená diskiem z magnetizované plazmy, je však schopna dodávat jetům mnohem větší množství energie. Výpočty takových objektů vycházejí z modelu axiálně symetrické magnetosféry, vznikající v okolí pulsarů (magnetosférou se označuje oblast, v níž dominantní úlohu mají magnetické síly). Ačkoliv základní myšlenka je stejná, teorie magnetosfér kolem pulsarů se vyvíjela rychleji - pravděpodobně proto, že v případě černých dér jsou důležité komplikovanější relativistické efekty.

Původní model Goldreicha a Julianova (1969) předpokládal, že primární (dipolové) magnetické pole má zdroj uvnitř neutronové hvězdy a v jejím okolí vytváří korotující magnetosféru. Intenzita elektrického pole při povrchu neutronové hvězdy převyšuje její gravitaci a způsobuje vytrhování nabitych částic, takže hvězda není obklopena vakuem. Korotace se pochopitelně nezachovává do neomezené vzdálenosti, protože poblíž tzv. světelného povrchu (kde vzdálenost od osy rotace \propto úhlová rychlosť = rychlosť světla) rostou odstředivé síly, zatímco magnetické klesají. Působením inerciálních sil a energie-hybnosti magnetického pole samotného dochází k vytlačení magnetických siločar, které jsou nadále neuzavřené a vytvářejí oblast větru. Pole zde má toroidální charakter. Zdrojem magnetického pole a plazmy ovšem nemusí být hvězda sama, nýbrž akreční mechanismus. Relativně nejjednodušší modely popisují tenký akreční disk, keplerovsky rotující kolem neutronové hvězdy a unášející s sebou zamrzlé magnetické pole. Magnetický tok v disku je následkem zamrznutí podstatně větší než v nekonečnu. V inerciální soustavě se tak generuje elektrické pole. Je tedy třeba řešit sousta-



Obr. 7 Model "centrálního motoru" s rotující černou dírou a tlakem udržovaným torem (vytečkaná oblast). Ω je úhlová rychlosť rotace díry, B magnetosféra v její blízkosti korotuje úhlovou rychlosť Ω^* . Vlnovky vyznačují dráhy fotonů, vytvárajících elektron-pozitronové páry v jinak nestacionární oblasti podél rotační osy. Přítomnost nabitych částic v okolí černé díry vede k vytvoření proudu J , který extrahuje její rotační energii ve formě Poyntingova toku. Plné křivky vyznačují izodáry poloidální složky B^* magnetického pole. K výslednému poli přispívá ještě toroidální složka B^{ϕ} .

vu magnetohydrodynamických rovnic, což je možné pouze s mnoha zjednodušujícími předpoklady (kromě axiální symetrie a zanedbání hmotnosti disku proti hmotnosti centrálního objektu to je stacionarita, dokonalá vodivost plazmy, zanedbání inerciálních sil proti magnetickým aj.). Nabité částice se pohybují z disku podél ekvipotenciál a vytvářejí tak prostorové rozdělení náboje a proudu. Jednotlivé ekvipotenciály korotují konstantní rychlosťí spolu s diskem. Poblíž světelného povrchu hmota opět přestává s diskem korotovat a uniká pryč od něj. Ztráta energie a momentu hybnosti elektromagnetickým tokem jde na účet rotační energie disku. Ve stacionárním stavu je brzdění disku vyrovnané další akrecí hmoty.

Část hmotnosti Kerrovy černé díry je reducibilní v tom smyslu, že ji lze z díry extrahovat a vzdálit do nekonečna. Moment hybnosti J Kerrovy černé díry je shora omezen, $J \leq J_{\max}$, a v extrémním případě rovnosti činí reducibilní část asi 29 % celkové hmotnosti. Konkrétní popis mechanické extrakce cestou srážek nebo rozpadu častic poblíž horizontu černé díry (v tzv. ergosféře) podal poprvé Penrose (1969). Tento mechanismus však zřejmě není v astrofyzikálních aplikacích dosud statečně efektivní. Nadějnější je Blandfordovo-Znajekovo (1976) relativistické zobecnění elektrodynamiky pulsarů. Magnetické pole je udržováno proudy v ekvatoreálním disku. Nabité částice jsou poblíž horizontu elektrostaticky urychlovány, září a toto záření dále produkuje elektron-pozitronové páry, které zásobují magnetosféru. Plazma zde opět má úlohu udržovat elektromagnetické pole. Výsledný Poyntingov tok v nekonečnu je kladný, přičemž extrahovaná energie jde na konto rotační energie černé díry. Získané záření je schopen kolimovat tlustý disk. Kromě toho se projevuje magnetické uvěznění jetu, zvyšující fokusaci častic dále od zdroje. Touto cestou může torus u objektu s velice malou rychlosťí akrece \dot{M} katalyzovat extrakci energie $\gg M c^2$, přičemž jeho vlastní luminozita je $\ll M c^2$.

Vzniká tak možný evoluční model extragalaktických objektů s jety: rádiové galaxie se interpretují jako "vyhladovělé" kvasary se silně nadkritickou akrecí ($\dot{M} < \dot{M}_{\text{Edd}}$) a torem udržovaným tlakem iontů díky silnému magnetickému poli. Z energetických i časových důvodů má tento model četné výhody proti konkurenčním modelům (např. model s $\sim 10^8$ neutronovými hvězdami o hmotnosti $\sim 1 M_\odot$ v gigantické hvězdokupě nebo model se spinarem - velmi hmotným rotujícím nezkolabovaným objektem). Rádiově silné kvasary se liší od rádiově tichých (optických) kvasarů rovněž rychlosťí akrece. V prvním případě je kritická, ve druhém nadkritická. Seyfertovy galaxie by měly mít také nadkritickou akreci, ovšem centrální černá díra má menší hmotnost.

Pozorování dávají příliš různorodé výsledky, abychom mohli doufat v jednoduchý model rádiových zdrojů. Určité sjednocení je však velmi pravděpodobné.

6. LITERATURA

- Prací zabývajících se problematikou rádiových zdrojů je vskutku nesmírné množství a přibývají rychlým tempem, takže je snad nevhodnější uvést pouze přehledové články, v nichž lze nalézt nejenom mnoho informací, ale také další odkazy.
- Begelman M.C., Blandford R.D., Rees M.J.: Theory of extragalactic radio sources; Rev. Mod. Phys. 56 (1984), 255.
 Blandford R.D., Begelman M.C., Rees M.J.: Cosmic Jets; Scientific American 246 (1984), 84.
 Blandford R.D., McKee C.F., Rees M.J.: Super-luminal expansion in extragalactic radio sources; Nature 267 (1977), 211.
 Bridle A.H., Eilek J.A.: Physics of Energy Transport in Extragalactic Radio sources; Proc. of NRAO Workshop 9 (1984).
 Ferrari A., Pacholczyk A.G.: Astrophysical Jets; D.Reidel (1983).
 Gordon M.A.: A Continent-Size Radio Telescope; S & T 69 (1985), 487.
 Rees M.J. et al.: Ion-supported tori and the origin of radio jets; Nature 295 (1982), 17.

OBSAH

Předmluva	5
Část 1. Astronomické efemeridy	7
A. Kalendářní data roku 1987	9
B. Efemeridy	13
1. Slunce	13
2. Měsíc	37
3. Planety a jejich měsíce	51
4. Zatmění Slunce, Měsíce a zákryty hvězd Měsícem	123
5. Kalendář úkazů	153
6. Planetky, komety a meteory	163
7. Hvězdy	176
8. Proměnné hvězdy	188
C. Časové signály	200
Část 2. Pokroky v astronomii	207
Jaroslav Klokočník: Modely gravitačního pole Země	209
Vladimír Karas: Kosmické výtrusky	247

Dalekohled typu meniskový Cassegrain, o průměru zrcadla 40 cm, výrobek firmy Zeiss Jena, umístěný na Hvězdárně Petřín.

Foto: archív Planetária Praha