

Коллимация релятивистских струйных выбросов на суб-парсековых масштабах

А.В. Черноглазов¹, Ю.Ю. Ковалёв^{2,3}, А.Б. Пушкарев^{4,2}
В.С. Бескин^{1,5}

¹Московский Физико-Технический Институт

²Астро-космический центр ФИАН

³Max-Planck-Institut für Radioastronomie

⁴Крымская астрофизическая обсерватория

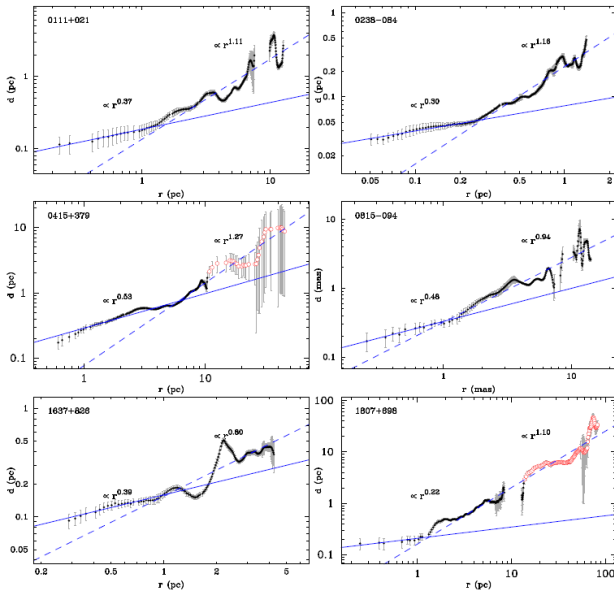
⁵Физический Институт Академии Наук

Актуальные проблемы внегалактической астрономии, 2017

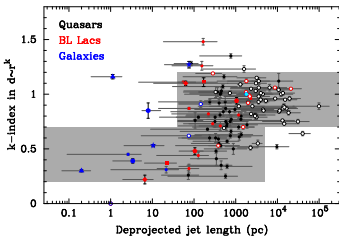
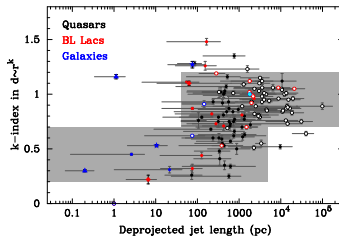
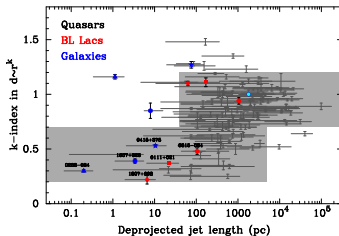
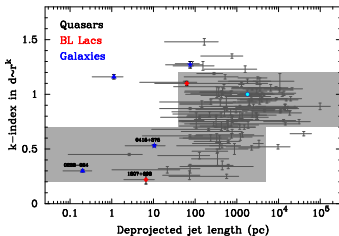
План

- 1 Наблюдения
- 2 МГД-подход
- 3 Задача
- 4 Решение
- 5 Результат

Изменение профиля джета



Изменение профиля джета



Параметр замагниченности Майкеля

$$\sigma_M = \frac{\Omega_0^2 \Psi_{\text{tot}}}{8\pi^2 \mu \eta c^2}$$

Два смысла:

1

$$\sigma_M = \frac{Flux_{em}}{Flux_{particle}}$$

2

$$\sigma_M = \Gamma_{max}$$

Световой цилиндр $R_L = c/\Omega_F(0)$ - внутренний размер, на котором скорость твердотельного вращения равна скорости света.

Асимптотика для Лоренц-фактора для квазицилиндрического течения

$$\Gamma = \frac{r_{\perp} \Omega_F}{c} = \chi_r$$

Но для джетов $\chi_r \sim 10^4 - 10^5$, значит, есть две возможности:

1

$$\sigma_M > 10^5 \implies \Gamma \sim 10^5$$

2

$$\sigma_M < 10^5 \implies \Gamma \sim \sigma_M$$

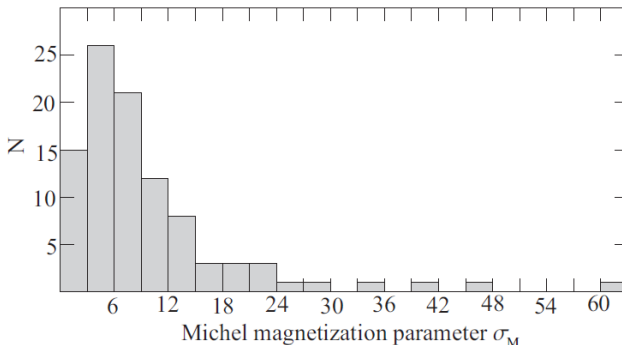


Рис.: Распределение параметра σ_M для 97 источников

$\sigma_M \sim 10$ - есть "насыщение" (переход от сильно-замагниченного к слабо).

Можно ли этим объяснить изменение характера расширения?

Задача

- 1 Осесимметричный стационарный джет;
- 2 Джет находится во внешней среде без магнитного поля;
- 3 Зависимость давления от расстояния как в аккреции Бонди
 $P \sim r^{-5/2}$;
- 4 Суммарный ток в джете равен 0 на краю (без бесконечно тонкого токового слоя);
- 5 Давление на краю $B^2/8\pi = P_{\text{ext}}$

Суммарный ток I

$$\frac{I}{2\pi} = \frac{L - \Omega_F r^2 E / c^2}{1 - \Omega_F^2 r^2 / c^2 - M^2}$$

равен нулю из-за выбора интегралов

$$L(\Psi) = \frac{\Omega_0 \Psi}{4\pi^2} \sqrt{1 - \frac{\Psi}{\Psi_{\text{tot}}}}$$
$$\Omega_F = \Omega_0 \sqrt{1 - \frac{\Psi}{\Psi_{\text{tot}}}},$$

где L - угловой момент, а M^2 - полоидальное число Маха

$$M^2 = \frac{4\pi\mu\eta^2}{n}$$

Интегралы

На самом краю

$$\frac{I}{2\pi} = \frac{\Omega_F r^2 \mu \eta}{M^2} \equiv H$$

вместе с

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{\Omega_F r^2 \mu \eta}{M^2} \right) - \frac{M^2}{\mu \eta \Omega_F r^3 (\Omega_F^2 r^2 / c^2 + M^2)} L^2 = 0$$

дают сохранение тока вплоть до самого края

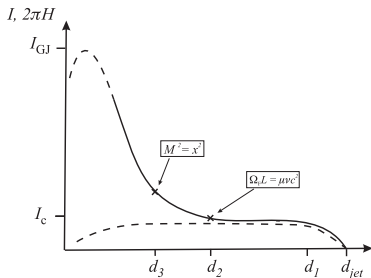


Рис.: ток вблизи границы. Пунктирная линия - интеграл H

Решение

$$\left[\frac{(E - \Omega_F L)^2}{\mu^2 \eta^2} - 1 + \frac{\Omega_F^2 r^2}{c^2} - A^2 \frac{c_s^2}{c^2} \right] \frac{dM^2}{dr} = \frac{M^6 L^2 c^2}{A r^3 \mu^2 \eta^2} + \frac{\Omega_F^2 r M^2}{c^2} \left[2 - \frac{(E - \Omega_F L)^2}{A \mu^2 \eta^2} \right] + \frac{M^2}{2 \mu^2 \eta^2} \frac{d\Psi}{dr} \frac{d(E - \Omega_F L)^2}{d\Psi} + \frac{M^2 r^2}{2 c^2} \frac{d\Psi}{dr} \frac{d\Omega_F^2}{\Psi} - M^2 \left(1 - \frac{\Omega_F^2 r^2}{c^2} + 2A \frac{c_s^2}{c^2} \right) \frac{d\Psi}{dr} \frac{1}{\eta} \frac{d\eta}{d\Psi} - \left[\frac{A}{n} \left(\frac{\partial P}{\partial s} \right)_n + \left(1 - \frac{\Omega_F^2 r^2}{c^2} \right) T \right] \frac{M^2}{\mu} \frac{d\Psi}{dr} \frac{ds}{d\Psi},$$

здесь $A = 1 - \Omega_F^2 r^2 / c^2 - M^2$.

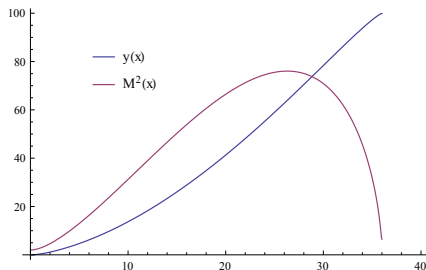


Рис.: решение уравнения совместно с уравнением Бернулли для $\sigma\Psi/\Psi_{tot}$ и M^2

Решение

Связь ширины джета со значением интеграла H и внешним давлением P_{ext} может быть оценено

$$x_{\text{jet}} = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} h(x_{\text{jet}}) \left(\frac{\Omega_0}{c} \right)^2 \Psi_{\text{tot}} P_{\text{ext}}^{-1/2},$$

где $h = 2\pi H / I_{GJ}$ и $x = \Omega_F(0)r/c$

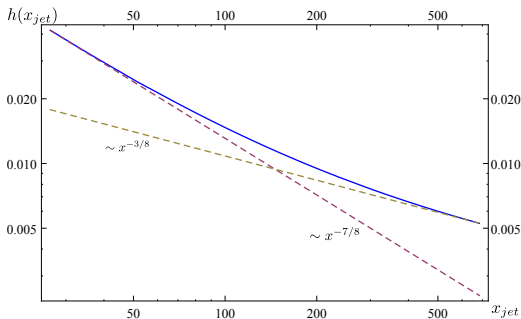


Рис.: численное решение для $h(x_{\text{jet}})$ как функции поперечного его размера

Используя зависимость внешнего давления от расстояния $P_{\text{ext}} \sim l^{-5/2}$, получаем:

Поперечный размер в зависимости от удаления от "центральной машины" меняется от

$$r_{\text{jet}} \sim R^{0.6}$$

вблизи до

$$r_{\text{jet}} \sim R^{0.96}$$

на больших расстояниях.

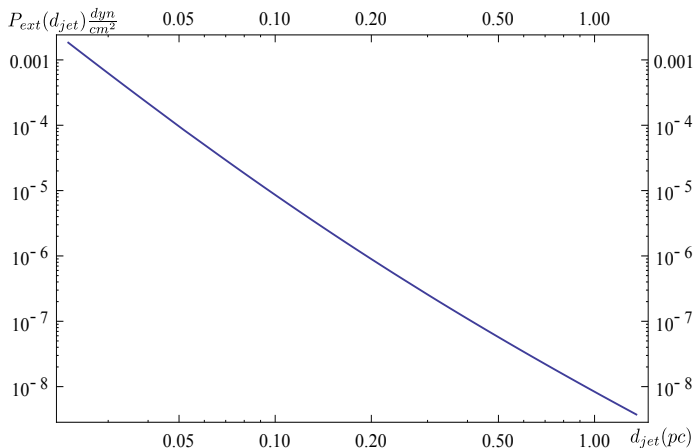


Рис.: Внешнее давление P_{ext} как функция радиуса джета r_{jet}

- 1 Обнаружено изменение характера расширения джета на малых расстояниях;
- 2 Дано оценочное теоретическое обоснование в рамках стационарной осесимметричной МГД;
- 3 Оценено давление для объяснения результатов.

Спасибо за внимание!