

Ускорение протона в окрестности сверхмассивной черной дыры

Я. Н. Истомин* А. А. Гуня†

Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН
Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, д.53

(Статья поступила 26.06.2019; Подписана в печать 15.08.2019)

Нами рассмотрено центробежное ускорение заряженных частиц в магнитосферах вращающихся массивных черных дыр. Численными и аналитическими методами найдены максимальные значения Лоренц-факторов ускоренных частиц. Максимальные энергии зависят от параметра замагниченности частиц κ , отношения нерелятивистской циклотронной частоты ω_c к частоте вращения магнитных силовых линий магнитного поля в магнитосфере Ω_F , $\kappa = \omega_c/\Omega_F \gg 1$, и от параметра α отношения тороидального магнитного поля B_T к полоидальному B_P , $\alpha = B_T/B_P$. Показано, что при малых тороидальных полях, $\alpha < \kappa^{-1/4}$, максимальный Лоренц-фактор γ_m есть только квадратный корень из замагниченности, $\gamma_m = \kappa^{-1/2}$, в то время как при больших тороидальных полях, $\alpha > \kappa^{-1/4}$, максимальная энергия значительно увеличивается, $\gamma_m = \kappa^{-2/3}$. Однако, максимально возможное ускорение, $\gamma_m = \kappa^{-1}$, в магнитосфере не достигается. Также нами оцениваются максимальные энергии протонов, ускоренных в некоторых ядрах галактик.

PACS: 98.70.Sa, 98.54.Cm, 98.54.Aj, 98.62.Js

УДК: 524.1-62.

Ключевые слова: ускорение частиц, активные ядра галактик, чёрные дыры.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время считается, что наиболее мощные источники гамма-излучения такие как релятивистские струи блазаров, лацертид, квазаров и радиогалактик являются наиболее эффективными ускорителями частиц космических лучей.

Ряд черенковских телескопов, таких как VERITAS, HESS, MAGIC, за последние несколько лет зарегистрировали источники гамма лучей экстремально высоких энергий, выходящих за пределы ТэВ диапазона. Наиболее яркими близлежащими внегалактическими «эталоном» для исследования процесса энерговыделения лучей таких энергий можно было бы назвать NGC4486 (M 87), NGC4261, PKS 2155-304.

Основными носителями таких энергий в космических лучах выступают протоны, энергии которых достигают $\geq 10^{21}$ эВ.

Происхождение таких энергий объясняется наличием в центре галактики активного ядра (чёрную дыру), на которую аккрецирует вещество, в следствие чего светимость центрального объекта равна $L = \eta_r \cdot \dot{M} \cdot c^2$, где \dot{M} — скорость аккреции, η_r — излучательная эффективность.

Следуя классической парадигме активных ядер галактик (АЯГ) полагается, что в центре лежит сверхмассивная чёрная дыра массой 10^6 – $10^9 M_\odot$, окружённая аккреционным диском, вещество которого падает на поверхность горизонта событий радиуса $r_H = 2MG/c^2$. Для радиогалактик и блазаров часть аккрецирующей материи выбрасывается в виде коллимированных потоков ультрарелятивистской плазмы (джеты).

Процесс ускорения обусловлен вращением частиц вместе с магнитосферой, благодаря наличию у чёрной дыры вращательной энергии $E_{rot} = Mr_H^2 \Omega_H^2/2$, где M — масса СМЧД, Ω_H — угловая скорость вращения, приближаются к области, где скорость вращения стремится к скорости света. Эффективное преобразование энергии вращения ЧД в энергию частиц дается механизмом Блэндфорда–Знаека.

Ключевая задача заключается в определении взаимосвязи таких ключевых параметров как параметр замагниченности частиц κ и параметр α — отношения тороидального магнитного поля к полоидальному. Комбинация их напрямую определяет значения максимального значения Лоренц-фактора γ_{max} (энергии) протонов, ускоряемых в магнитосфере АЯГ, исходя из значений массы чёрной дыры, а также тороидального магнитного поля в магнитосфере.

Как показал расчёт максимальное ускорение протон получает в области вблизи поверхности светового цилиндра, радиус которого определяется равенством электрического и магнитного полей. Магнитосфера чёрной дыры содержит следующие компоненты электрического и магнитного полей: электрического поля E_θ , определяющего тороидальное вращение частиц, радиального магнитного поля B_r , образующего сплит-монополю в центре АЯГ; и тороидального магнитного поля B_ϕ .

$$\begin{aligned} B_r &= \sigma B_0 \left(\frac{r}{r_L}\right)^{-2}, & B_\phi &= \alpha \sigma B_0 \left(\frac{r}{r_L}\right)^{-1}, \\ E_\theta &= -\sigma B_0 \sin \theta \left(\frac{r}{r_L}\right)^{-1}, \end{aligned} \quad (1)$$

Силы, действующие на заряженную частицу, представляют собой комбинацию инерциальных сил в виде релятивистской силы Кориолиса и центробежной силы,

*E-mail: istomin@ipi.ru

†E-mail: aagunya@lebedev.ru

а также силы Лоренца:

$$\begin{aligned} \frac{dp_r}{dt} &= \frac{\kappa}{r\gamma} (p_\theta^2 + p_\phi^2) + \frac{\sigma\alpha}{r\gamma} p_\theta, \\ \frac{dp_\theta}{dt} &= -\frac{\kappa}{r\gamma} (p_r p_\theta - p_\phi^2 \cot \theta) - \frac{\sigma}{r} \sin \theta + \frac{\sigma}{r^2\gamma} p_\phi - \frac{\sigma\alpha}{r\gamma} p_r, \\ \frac{dp_\phi}{dt} &= \frac{\kappa}{r\gamma} (p_r + p_\theta \cot \theta) p_\phi - \frac{\sigma}{r^2\gamma} p_\theta, \\ \frac{r}{dt} &= \frac{\kappa}{\gamma} p_r, \\ \frac{\theta}{dt} &= \frac{\kappa}{r\gamma} p_\theta. \end{aligned} \quad (2)$$

Определение зависимостей Лоренц-фактора γ как функции радиуса светового цилиндра r_L , параметра магнитного поля $\alpha = B_\varphi/B_r$ и параметра замагниченности $\kappa = r_c/r_L$ (r_c — циклотронный радиус) базируется на системе уравнений (2) движения протона, решаемых численно методом Рунге-Кутты. Здесь $r_L = c/\Omega_F$ есть естественный размер магнитосферы в поперечном направлении, Ω_F — угловая частота вращения силовых линий магнитного поля.

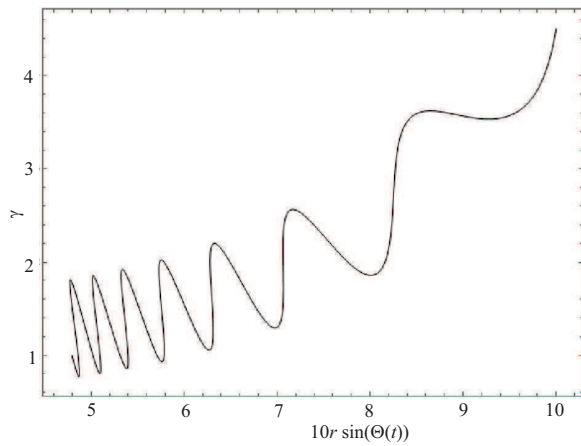


Рис. 1: Изменение Лоренц-фактора в процессе ускоряемого движения протона к световому цилиндру

График (рис. 1) показывает приращение энергии при движении к световому цилиндру.

На основании резкого ускорения вблизи светового цилиндра можно построить приближенное решение уравнений движения, считая, что область основного ускорения лежит на сравнительно малой области размером

$$\Delta r = -\frac{\sigma\kappa\gamma m}{\sin^2 \theta} \frac{p_r}{p_\theta} \Big|_{r=1/\sin \theta}. \quad (3)$$

В результате расчётов было получено два частных случая, определяющих результирующую энергию протона. Первый (рис. 2) состоит в отсутствии тороидального поля и, как следствие, джета (актуально для неактивных ядер галактик, таких как наша).

$$\gamma = \kappa^{-1/2}. \quad (4)$$

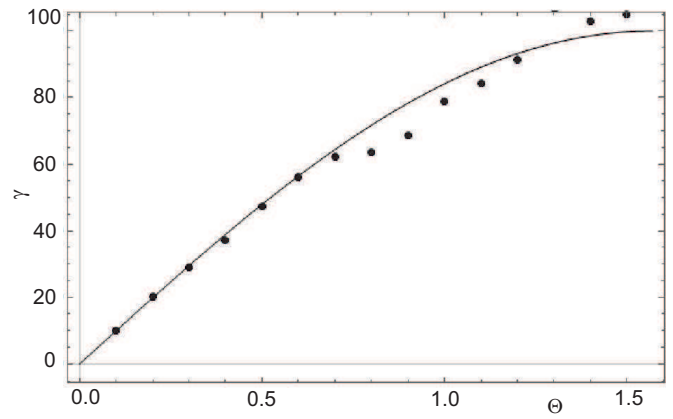


Рис. 2: Зависимость Лоренц-фактора от угла наклона магнитной силовой линии при фиксированном значении параметра замагниченности

Второй заключается в наличии тороидального поля, что обуславливается наличием тока джета.

$$\gamma = (\alpha\kappa^{-1})^{2/3}. \quad (5)$$

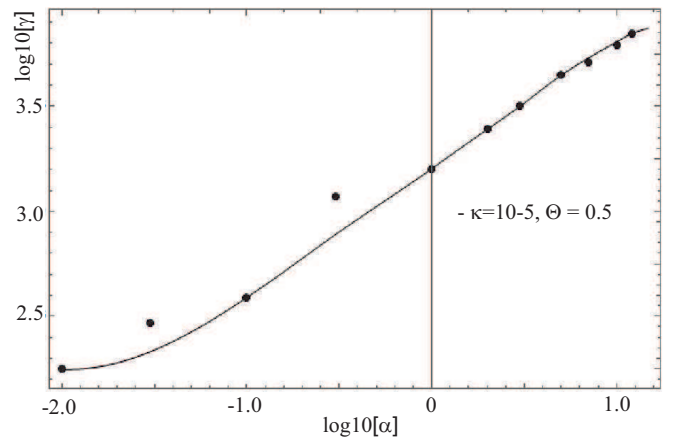


Рис. 3: Изменение Лоренц фактора в зависимости от параметра магнитного поля α при фиксированном значении κ

Результаты расчёта на основании полученного выражения были проверены на примере ряда галактик, в частности центра Галактики Sgr. A* и M87. Имея в качестве исходных данных массу Sgr. A*, $M_9 = 4.3 \cdot 10^6 M_c$, где M_c — солнечная масса, и значение полюoidalного (джет отсутствует) магнитного поля $B_r = 3.6 \cdot 10^3$ Гс, получаем, что $E_{max} = 2.7 \cdot 10^{14}$ эВ, что согласуется с данными, полученными на телескопах HESS (Abramowski et.al., 2016). Для галактики NGC4486 (M 87) $M_9 = 6.6 \cdot 10^9 M_c$ и значение тороидального (есть джет) магнитного поля $B_\varphi = 4.5 \cdot 10^3$ Гс, получаем, что $E_{max} = 8.3 \cdot 10^{19}$ эВ.

-
- [1] *Istomin Y. N., Sol H. Astrophysics and Space Science.* 2009. **321**, N 1. P. 57. [2] *Istomin Y. N., Sol H. Astronomy and Astrophysics.* 2011. **527**. A22.
-

Centrifugal acceleration of protons by a supermassive black hole

Ya. N. Istomin^a, A. A. Gunya^b

¹*P. N. Lebedev Physical Institute RAS, Moscow 119991, Russia*
E-mail: ^aistomin@lpi.ru, ^baagunya@lebedev.ru

We have considered the centrifugal acceleration of charged particles in the magnetospheres of rotating massive black holes. The maximum values of Lorentz factors of accelerated particles are found by numerical and analytical methods.

The maximum energies depend on the parameter of the magnetization of particles κ , which is the ratio of the frequency of rotation of the magnetic field lines of the magnetic field in the magnetosphere Ω_F , to the nonrelativistic cyclotron frequency $\kappa = \omega_c/\Omega_F \gg 1$, and from the parameter α of the ratio of the toroidal magnetic field B_T to the poloidal one B_P , $\alpha = B_T/B_P$. It is shown that for small toroidal fields, $\alpha < \kappa^{-1/4}$, the maximum Lorentz factor γ_m is only the square root of the magnetization, $\gamma_m = \kappa^{-1/2}$, while for large toroidal fields, $\alpha > \kappa^{-1/4}$, the maximum energy increases significantly, $\gamma_m = \kappa^{-2/3}$. However, the maximum possible acceleration, $\gamma_m = \kappa^{-1}$, is not achieved in the magnetosphere. We also estimate the maximum energies of protons accelerated in some galactic nuclei.

PACS: 98.70.Sa, 98.54.Cm, 98.54.Aj, 98.62.Js

Keywords: particle acceleration, active galactic nuclei, black hole.

Received 2019.

Сведения об авторах

1. Истомин Яков Николаевич — доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (499) 132-61-71, e-mail: istomin@lpi.ru.
 2. Гуня Алексей Алексеевич — аспирант; e-mail: aagunya@lebedev.ru.
-