

РАЗДЕЛ II. ФИЗИКА

УДК 524.7-7+52.6

Чаругин В.М.

Московский государственный педагогический университет

ФОРМИРОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО СТЕПЕННОГО СПЕКТРА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В КОСМИЧЕСКИХ РАДИОИСТОЧНИКАХ

Аннотация. Наблюдения указывают на универсальность радиоспектров активных галактик и квазаров. Так, спектральные индексы радиоизлучения у них заключены в пределах $1,3 > \alpha > 0,6$, причем среднее значение $\alpha = 0,8$ с дисперсией 0,15. (Здесь интенсивность излучения $I(\nu) \sim \nu^{-\alpha}$.) Исходя из синхротронной природы радиоизлучения, можно говорить об универсальном распределении электронов по энергиям $N(E) \sim E^{-\gamma}$, где $\gamma = 2\alpha + 1 = 2,6$ с дисперсией 0,3. Учитывая масштабную инвариантность электромагнитного взаимодействия релятивистских электронов, радиоизлучающие области квазаров и активных галактик можно рассматривать как фрактал. Используя теорию фракталов, показано, что в этих небесных телах должен формироваться универсальный спектр релятивистских электронов с $\gamma = 2,4$. Таким образом, универсальность в распределении электронов по энергиям и излучения по частотам связана с фрактальной природой области радиоизлучения квазаров и активных галактик.

Ключевые слова: квазары, активные галактики, синхротронное излучение, степенные спектры, фракталы.

V. Charugin

Moscow State Pedagogical University

THE FORMATION OF UNIVERSAL SPECTRUM OF RELATIVISTIC ELECTRONS IN ACTIVE GALAXIES AND QUASARS

Abstract. Observations indicate the versatility of radiospectra of active galaxies and quasars. Thus, the spectral indices of radio emission from them lie within $1.3 > \alpha > 0.6$, at an average

© Чаругин В.М., 2015.

value of α being equal to 0.8 with a dispersion of 0.15. (Intensity of radiation is $I(\nu) \sim \nu^{-\alpha}$) Based on the synchrotron nature of radio emission, we can speak about a universal distribution of electrons with respect to energies $N(E) \sim E^{-\gamma}$, where $\gamma = 2\alpha + 1 = 2.6$ with a dispersion of 0.3. Bearing in mind the scale invariance of the electromagnetic interaction of relativistic electrons, the radio-emitting area of quasars and active galaxies can be thought of as a fractal. Using the theory of fractals, it is shown that these celestial bodies should produce a universal distribution of relativistic electrons with $\gamma = 2.4$. Thus, the universality in the distribution of electrons with respect to energies and emission on frequencies is associated with the fractal nature of the field of radio emission of quasars and active galaxies.

Key words: quasar, active galaxy, synchrotron radiation, power spectrum, fractals.

Различные типы внегалактических радиоисточников показывают удивительно одинаковое спектральное распределение радиоизлучения [1]. В среднем радиоисточники имеют $\alpha = 0,8 \pm 0,15$ (рис. 1). Еще более интересно, что остаток взрыва сверхновой II типа Кассиопея А имеет такой же спектральный индекс радиоизлучения (рис. 2). Возникает интересный вопрос о том, как у таких разных по мощности и по природе объектов формируется универсальный степенной спектр с $\gamma = 2,6$?

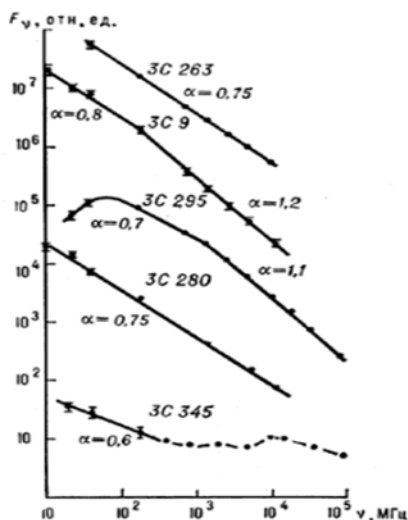


Рис. 1.

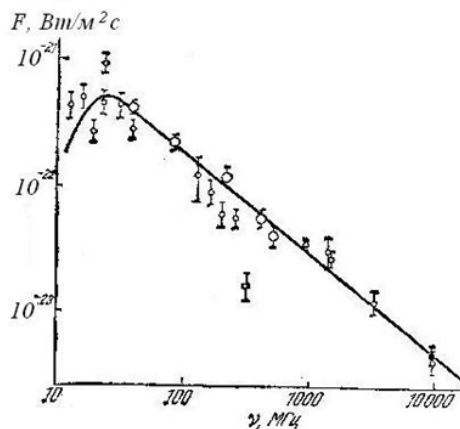


Рис. 2.

Следует иметь в виду, что степенные функции являются фракталами, так как обладают масштабной инвариантностью. Экспериментальные данные и наблюдения свидетельствуют о том, что фрактальность, или самоподобие, характерна как для пространственных свойств стационарных сложных систем, так и для процессов эволюции в сложных системах (например, простейший

механизм хаотизации системы по схеме удвоения периода). Свойство фрактальности устойчиво и сохраняется в процессах самоорганизации и в переходах «порядок-хаос».

Таким образом, фрактальность сложных систем с сохраняющимся электрическим зарядом есть следствие существования в нашем мире электромагнитного взаимодействия, которое описывается уравнениями Максвелла [2]. Это относится и к масштабной инвариантности электромагнитного взаимодействия релятивистской плазмы. Отсюда – фрактальная структура формирования областей синхротронного излучения и формирование степенных спектров излучения.

Попытаемся воспользоваться этим выводом и посмотрим, что еще можно получить, предполагая фрактальную природу синхротронного излучения этих релятивистских объектов.

Двигаясь в магнитном поле, релятивистский электрон излучает в узком диапазоне частот. При этом частота, на которую приходится максимум излучения электрона с энергией E , равна:

$$\nu = 0,25 \frac{eH}{2\pi mc} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2 \quad (1)$$

$$\nu_H = \frac{1}{T} = \frac{eH}{2\pi mc}$$

Здесь ν_H – гирочастота, T – период вращения нерелятивистского электрона в магнитном поле. В работе [3] было показано, что фрактальная природа джетов активных галактик естественным образом объясняет универсальный степенной спектр их радиоизлучения.

Фрактальность структуры распределения релятивистской плазмы, ответственной за нетепловое радиоизлучение в туманности, не столь очевидна. Но на это указывает степенная зависимость распределения релятивистских электронов по энергиям, обладающая масштабной инвариантностью.

Итак, сделаем следующие предположения: область излучения состоит из k облаков намагниченной плазмы с релятивистскими электронами; пусть полная энергия электронов в каждом облаке $w_0 < w_1 < w_2 < \dots < w_k$ и имеют максимумы при энергиях соответственно $E_0 > E_1 > \dots > E_k$, которые зависят от напряженности магнитного поля $E_i \sim \frac{1}{\sqrt{H_i}}$, $H_0 < H_1 < \dots < H_k$.

Пусть спектр k -го облака имеет степенную форму:

$$w_k(E > E_k) = w_k(E_k) \cdot \left(\frac{E}{E_k}\right)^{-\beta}.$$

Будем считать, что $\beta < 1$ у каждого облака одинаково. При фрактальной структуре туманности имеем:

$$E_k = aE_{k-1} = a^k E_0, \quad (2)$$

$$k = \frac{1}{\lg a} \lg \frac{E_k}{E_0}, \quad a < 1, \quad (3)$$

$$w_k(E_k) = b \cdot w_{k-1}(E_{k-1}) = b^k \cdot w_0(E_0), \quad b > 1. \quad (4)$$

Тогда для энергетического распределения k -го облака имеем:

$$w_k(E > E_k) = w_k(E_k) \cdot \left(\frac{E}{E_k}\right)^{-\beta} = b^k w_0(E_0) \frac{E^{-\beta}}{E_0^{-\beta} a^{-k\beta}} = b^k a^{\beta k} w_0(E_0) \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\beta}.$$

Суммарная энергия от всех k облаков при энергии E_k равна:

$$W(E_k) = w_0(E_0) \left(\frac{E_k}{E_0}\right)^{-\beta} + b^1 a^{\beta} w_0(E_0) \left(\frac{E_k}{E_0}\right)^{-\beta} + b^2 a^{2\beta} w_0(E_0) \left(\frac{E_k}{E_0}\right)^{-\beta} + \dots + b^N a^{\beta N} w_0(E_0) \left(\frac{E_k}{E_0}\right)^{-\beta}.$$

При $ba^{\beta} > 1$ и при больших k последнее выражение принимает вид:

$$W(E_k) = w_0(E_0) \frac{[(ba^{\beta})^k - 1]}{ba^{\beta} - 1} \left(\frac{E_k}{E_0}\right)^{-\beta} \approx w_0(E_0) \frac{[(ba^{\beta})^k]}{ba^{\beta} - 1} \left(\frac{E_k}{E_0}\right)^{-\beta} = w_0(E_0) \frac{[(ba^{\beta})^k]}{ba^{\beta} - 1} (a^k)^{-\beta} = w_0(E_0) \frac{b^k}{ba^{\beta} - 1},$$

с учетом (3) имеем:

$$\lg W(E_k) = \lg w_0(E_0) + k \cdot \lg b - \lg(ba^{\beta} - 1) = \lg w_0(E_0) + \frac{\lg b}{\lg a} \lg \left(\frac{E_k}{E_0}\right).$$

Таким образом, показатель степени в распределении плотности энергии электронов в зависимости от их энергии $m = -\frac{\lg b}{\lg a}$. ($W(E) = K \cdot E^{-m}$) определяется фрактальными параметрами туманности a и b . Теперь надо из общих соображений оценить b и a .

Так как, согласно (1), $E \sim v^2 \sim \frac{1}{\sqrt{T}}$, а из физического эксперимента известно, что обмен энергией в сложных системах наиболее эффективен, когда он проходит по схеме удвоения периода $T_k = 2T_{k-1}$, то $E_k = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{k-1}$, а $a = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$.

Для определения b используем вероятностный подход. Пусть w_k образуют вероятностное множество. Вероятность того, что энергия k -го облака будет w_k , равна $P(w_k) = \frac{w_k}{W}$. Условная вероятность значения w_{k-1} при условии, что энергия k -го облака равна w_k :

$$P_1 = \frac{P(w_{k-1})}{P(w_k)} = \frac{w_{k-1}}{w_k}. \quad (5)$$

Так как взаимодействие облаков зависит от количества энергии в каждом облаке, то вероятность передачи энергии от k -го облака к $(k - 1)$ облаку:

$$P_2 = \frac{P(w_k - w_{k-1})}{P(w_{k-1})} = \frac{w_k - w_{k-1}}{w_{k-1}}. \quad (6)$$

При равенстве этих вероятностей $P_1 = P_2$ получаем уравнение:

$$\left(\frac{w_{k-1}}{w_k}\right)^2 + \left(\frac{w_{k-1}}{w_k}\right) - 1 = 0. \quad (7)$$

Как видно, мы получили уравнение золотого сечения для $\frac{w_{k-1}}{w_k}$, его решение $\frac{w_{k-1}}{w_k} = 0,618$, т.е. $b = 1,618$. Следовательно, среднее статистическое значение

показателя энергетического спектра электронов $m = -\frac{\lg b}{\lg a} = -\frac{\lg 1,618}{\lg 0,707} \approx 1,4$.

Обычно принято говорить о показателе энергетического спектра в концентрации релятивистских электронов $N(E) = KE^{-\gamma} = \frac{w(E)}{E} = KE^{-(m+1)}$.

Таким образом, $\gamma = 2,4$. Для таких спектров электронов показатель спектра синхротронного излучения от них $\alpha = (\gamma - 1)/2 = 0,7$. Полученное значение универсального показателя спектра электронов в пределах погрешностей находится в хорошем согласии с наблюдаемыми значениями.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Келлерманн К.И. Радиогалактики и квазары // Галактическая и внегалактическая радиоастрономия: Сб. / под ред. Г.Л. Верскера и К.И. Келлерманна. М: Мир, 1976. С. 406–547.
2. Чаругин В.М., Розгачева И.К., Бруевич Е.А. Об электромагнитной природе фрактальности сложных систем: Фрактальность джетов галактических ядер и хромосферных структур маломассивных звезд главной последовательности // Фракталы и прикладная синергетика: Труды ФиПС-03 / под ред. В.С. Ивановой, В.У. Новикова. М: Изд-во МГОУ, 2003. С. 253–257.
3. Чаругин В.М., Розгачева И.К. Фрактальность джетов активных галактических ядер // Труды всероссийской астрономической конференции ВАК 2004 «Горизонты Вселенной». М.: МГУ, 2004. С. 258–259.