

АСТРОФИЗИКА

М. А. Аракелян

О цвете излучения релятивистских электронов

(Представлено академиком В. А. Амбарцумяном 16. IV. 1959)

Астрофизическими исследованиями последних лет обнаружен ряд весьма разнообразных объектов, характеризующихся аномально голубым цветом, причем среди них имеются как объекты, входящие в состав нашей Галактики, так и некоторые детали внешних галактик, а в некоторых случаях и целые внешние галактики. При этом спектральный участок, в котором наблюдается аномальное распределение энергии, у различных объектов часто бывает неодинаковым. В ряде случаев аномальное распределение энергии сопровождается другими необычными явлениями — эмиссионными линиями, поляризацией излучения, мощным радиоизлучением и т. д. Приведем несколько примеров.

а) Яркоультрафиолетовые звезды типа Т Тельца характеризуются резким возрастанием интенсивности непрерывного излучения на участке спектра $\lambda < 3800 \text{ \AA}$. Например, у одного из типичных представителей этой группы — NX Единорога, распределение энергии в фотографической области спектра является нормальным для звезды типа G5 или K0, в то время как на участке $\lambda 3800 - \lambda 3600$ интенсивность непрерывного спектра возрастает более чем в два раза ⁽¹⁾. Соответственно, показатель цвета $B - V$ близок к нормальному, в то время как $U - B$, согласно В. Хилтнеру и Б. Ириарте ⁽²⁾, достигая $-1^m 35$, является наименьшим наблюдаемым показателем цвета. Звезда характеризуется интенсивными эмиссионными линиями, а, возможно, также большой и резко переменной поляризацией излучения ⁽³⁾.

б) Некоторые вспыхающие звезды, как известно, характеризуются непрерывной эмиссией, интенсивность которой возрастает при переходе к ультрафиолету. Единственная звезда этого типа, вспышка которой наблюдалась колориметрически (HII 11306 в Плеядах ⁽⁴⁾), имела в максимуме следующие показатели цвета: $U - B = -0^m 97$ и $B - V = +0^m 50$. Заметим, что, согласно В. Осканяну, вспышки звезд типа $U'V$ Кита сопровождаются ростом поляризации излучения.

в) Кометарные туманности, по-видимому, также характеризуются аномально голубым цветом. Согласно работе Э. Е. Хачикяна (⁵), средний показатель цвета туманности IC 432 в международной системе равен -0^m7 , достигая в некоторых местах значения -1^m4 . Поляриметрическое исследование этой туманности обнаружило нерадиальную поляризацию со средней степенью, равной 14%. Тот же автор показал, что в случае другой кометарной туманности—NGC 2261, имеет место радиальная поляризация, однако гипотеза отражения в этом случае недопустима, так как нарушается соотношение Хаббла. Цвет этой туманности в международной системе, по-видимому, также существенно отрицательный (⁶).

г) Ряд эллиптических галактик, обнаруженных В. А. Амбарцумяном и Р. К. Шахбазян (⁷), имеет голубые выбросы и спутники, причем имеются случаи, когда показатель цвета в международной системе достигает значения -0^m5 . Примером является сгущение струи, выброшенной из NGC 3561. Этот выброс является аналогом замечательной струи, выброшенной из эллиптической галактики NGC 4486, которая имеет непрерывный спектр и голубой цвет. Излучение струи в NGC 4486 сильно поляризовано. Последняя является известным источником радиоизлучения.

д) Голубые галактики, обнаруженные Г. Аро (⁸), возможно отличаются по своему цвету от галактик, упомянутых в предыдущем пункте. Колориметрические наблюдения В. Хилтнера и Б. Ириарте (⁹) показывают, что показатель цвета $B - V$ у них положителен, в то время как показатель цвета $U - B$ достигает у некоторых значения 0^m7 . Крайне голубой цвет объектов, упомянутых в настоящем и предыдущем пунктах, частично может быть обусловлен интенсивной линией $\lambda 3727$. Однако случай NGC 4486 показывает, что эта линия интенсивна не во всех объектах этого типа.

В ряде случаев для истолкования перечисленных явлений прибегают к гипотезе излучения релятивистских электронов в магнитном поле. Это, по-видимому, обусловлено тем, что излучение релятивистских электронов является в настоящее время единственным известным механизмом, способным объяснить поляризацию. С другой стороны, известную роль, вероятно, играет сходство с Крабовидной туманностью, аморфная часть которой, характеризуясь интенсивным непрерывным излучением в оптическом диапазоне, является также мощным источником радиоизлучения. При этом излучение Крабовидной туманности поляризовано. В этом случае, по-видимому, не приходится сомневаться в том, что излучение туманности, или, по крайней мере, часть его, является синхротронным. Однако, в отличие от всех перечисленных выше объектов, непрерывное излучение Крабовидной туманности имеет существенно положительный цвет ($CI = +0^m6$), что не противоречит гипотезе излучения релятивистских электронов.

Для объяснения же приведенных выше случаев простая гипотеза тормозного излучения релятивистских электронов, по-видимому, не-

применима. Для случая яркоультрафиолетовых звезд типа Т Тельца это было установлено в работе К. Бема (1), спектрофотометрически исследовавшего NX Единорога и VY Ориона. Чтобы проиллюстрировать неприменимость механизма синхротронного излучения для объяснения приведенных выше примеров голубых объектов, вычислим показатели цвета $U - B$ и $B - V$ излучения моноэнергетического потока релятивистских электронов в магнитном поле для случая $\lambda \gg \lambda_{\max}$, где λ_{\max} — длина волны максимума интенсивности излучения. В этом случае, как известно, распределение интенсивности можно записать в виде

$$I_{\lambda} d\lambda = \text{const} \cdot \lambda^{-\frac{7}{3}} d\lambda. \quad (1)$$

Грубую оценку цвета излучения релятивистских электронов можно произвести следующим образом. Введем аналогично случаю черного излучения величину абсолютного спектрофотометрического градиента

$$\varphi = 5\lambda - \frac{d \ln I_{\lambda}}{d(1/\lambda)} = \frac{8}{3} \lambda. \quad (2)$$

Легко видеть теперь, что в спектральной области $\lambda > 4000 \text{ \AA}$, соответствующей показателю цвета в международной системе или в системе $B - V$, абсолютный спектрофотометрический градиент этого излучения превосходит единицу, т. е. распределение энергии соответствует звездам типа A0 или более холодным. Это значит, что показатель цвета излучения релятивистских электронов в международной системе не может быть отрицательным.

Для более точного подсчета показателей цвета нами были вычислены следующие величины:

$$C_y = -2.5 \lg \frac{\int \lambda^{-\frac{7}{3}} B(\lambda) d\lambda}{\int \lambda^{-\frac{7}{3}} V(\lambda) d\lambda} = -0.95,$$

$$C_u = -2.5 \lg \frac{\int \lambda^{-\frac{7}{3}} U(\lambda) d\lambda}{\int \lambda^{-\frac{7}{3}} B(\lambda) d\lambda} = -0.25,$$

где через $U(\lambda)$, $B(\lambda)$, $V(\lambda)$ обозначены кривые спектральной чувствительности системы Джонсона и Моргана (10). В (11) было показано, что C_y и C_u связаны с показателями цвета в системе Джонсона и Моргана следующими уравнениями:

$$C_y = 0.94 (B - V) - 1.05.$$

$$C_u = 1.13 (U - B) + 0.76.$$

Таким образом, для показателей цвета моноэнергетического потока релятивистских электронов, излучающих в магнитном поле, мы получаем следующие значения: $B - V = +0.04$ и $U - B = -0.89$.

Сопоставление наблюдаемых цветов всех перечисленных выше объектов, характеризующихся аномально голубым цветом, с полученными теоретическими значениями показателей цвета излучения электронов самой высокой энергии, показывает непримечимость гипотезы излучения релятивистских электронов для истолкования свечения этих объектов.

При рассмотрении наблюдаемых отрицательных показателей цвета следует принимать во внимание следующее обстоятельство. В большинстве случаев наблюдаемый нами аномально голубой или ультрафиолетовый цвет излучения должен рассматриваться как сумма нормального излучения, присущего данному объекту (звезда, туманность или деталь галактики), и избыточного аномального излучения. Следовательно, собственный цвет этого аномального излучения должен быть более голубым, чем наблюдаемое суммарное излучение. При этом, разница между последними двумя цветами будет, очевидно, тем больше, чем меньше относительная доля избыточного излучения.

Далее заметим, что приведенные выше значения показателей цвета излучения релятивистских электронов представляют собой минимальные значения этих величин. Действительные значения могут быть значительно больше по следующим двум причинам:

а) Мы рассматривали область длин волн с $\lambda \gg \lambda_{\max}$. Если λ приближается к λ_{\max} , зависимость I_λ от λ ослабевает, а при $\lambda \ll \lambda_{\max}$ имеет место экспоненциальное падение интенсивности с уменьшением длины волны.

б) Нами рассматривалось излучение моноэнергетического потока релятивистских электронов. Легко убедиться в том, что учет распределения энергий релятивистских электронов при любом энергетическом спектре может привести только к покраснению излучения. Известно, например, что если энергетический спектр электронов представлен показательной функцией вида:

$$N_e(\mathcal{E}) = K \cdot E^{-\gamma},$$

то распределение интенсивности в спектре излучения принимает вид

$$I_\nu d\nu = \text{const} \cdot \nu^{\frac{1-\gamma}{2}} d\nu,$$

или

$$I_\lambda d\lambda = \text{const} \cdot \lambda^{-\frac{5-\gamma}{2}} d\lambda.$$

В таблице (стр. 39) приведены значения $B-V$ и $U-B$ для различных значений γ .

Из изложенного следует, что гипотеза синхротронного излучения неприменима к перечисленным выше голубым объектам. Это, в свою очередь, приводит к выводу о действии другого механизма выделения энергии, дающего излучение, характеризующееся резким возрастанием интенсивности к ультрафиолету, а в некоторых случаях и наличием

поляризации. Согласно В. А. Амбарцумяну ⁽¹²⁾ в случае звезд и туманностей таким источником энергии может быть внутризвездное вещество, выброшенное во внешние слои звезд и в объемы туман-

γ	1	2	3	4	5
$(B - V)$	+0.08	+0.23	+0.39	+0.49	+0.61
$(U - B)$	-0.83	-0.73	-0.61	-0.48	-0.36

ностей. С другой стороны, приведенные выше примеры говорят о некоторой аналогии между проявлениями голубой непрерывной эмиссии у нестационарных звезд и голубых внегалактических объектов.

Бюраканская астрофизическая обсерватория
Академии наук Армянской ССР

Մ. Ա. ԱՌԱԲԵՆԼՅԱՆ

Ռեկտիֆիկացիայի էլեկտրոնների ճառագայթման գույնի մասին

Վերջին տարիների ընթացքում հայտնագործվել են մի շարք բաղադրյալ օրյեկտներ, որոնք բնորոշվում են անոմալ կապույտ գույնով, դրանցից են՝

ա) *T* ցուլի տիպի մի շարք աստղեր, որոնց $U - B$ գույնի ցուցիչը հասնում է $-1^m 35$ -ի ⁽²⁾;

բ) Բոնկվոդ թղուկ աստղեր, որոնց $U - B$ գույնի ցուցիչը բունկման մարսիմումում խիստ բացասական է ⁽³⁾;

գ) Գիսալորաձև միղամածուխյուններ, որոնց գույնի ցուցիչը որոշ կետերում միջազգային սխտեմում ավելի փոքր է, քան $-1^m 0$ ⁽⁴⁾;

դ) Էլիպտիկ դալակտիկաների որոշ արբանյակներ, որոնք միջազգային սխտեմում ունեն բացասական գույնի ցուցիչ ⁽⁵⁾;

ե) Որոշ կապույտ գալակտիկաներ, որոնք ունեն դրական $B - V$ գույնի ցուցիչ և խիստ բացասական $U - B$ գույնի ցուցիչ:

Քանի որ մի շարք աշխատանքներում փորձ է արվում բացատրել այդ կապույտ օրյեկտների ճառագայթումը որպես ռեկտիֆիկացիայի էլեկտրոնների սինխրոտրոն ճառագայթում, ապա աշխատանքում հաշվված են այդպիսի ճառագայթման $B - V$ և $U - B$ գույնի ցուցիչները ռեկտիֆիկացիայի էլեկտրոնների մոնոէներգետիկ ֆնջի համար այն դեպքում, երբ $\lambda \gg \lambda_{\max}$, որտեղ λ_{\max} -ը նշանակում է ճառագայթման մարսիմալ ինտենսիվության արժեքային երկայնությունը: Այդ դեպքում ստացվում է՝ $B - V = +0^m 66$ և $U - B = -0^m 89$:

Եթե մենք գործ ունենք ոչ մոնոէներգետիկ ֆնջի հետ, ապա ճառագայթման գույնի ցուցիչներն ստացվում են ավելի մեծ:

Այստեղից հետևում է, որ ռեկտիֆիկացիայի էլեկտրոնների ճառագայթման հիպոթեզը ի վիճակի չէ բացատրել այդ կապույտ օրյեկտների լուսարձակման երևույթը: Դա իր հերթին բերում է այն եզրակացության, որ պետք է գործի մի այլ մեխանիզմ, որը ընդունակ է ստեղծելու այդպիսի կապույտ ճառագայթում:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

¹ К. Бём, Zs. f. Ap. 43, 245 (1957). ² В. Хилтнер, Б. Ириарте, Ap. J., 127, 510 (1958). ³ К. Лунгер, I. Крон, PASP, 69, 347 (1957). ⁴ Г. Джонсон, Р. Митчелл, Ap. J., 128, 31 (1958) ⁵ Э. Е. Лачикян, ДАН АрмССР, XXIII, 49 (1956). ⁶ Э. Е. Лачикян, Сообщения Бюраканской обсерватории, 25, 67 (1958). ⁷ В. А. Амбарцумян, Р. К. Шахбазян, ДАН АрмССР, XXV, 185 (1957). ⁸ Г. Аро, Vol. Obs. Ton. y. Tac. № 14 (1956). ⁹ В. Хилтнер, Б. Ириарте, Ap. J. 128, 443 (1958). ¹⁰ Г. Джонсон, Ann. d'Ap., 18, 292 (1955). ¹¹ М. А. Арачелян, Сообщения Бюраканской обсерватории, 26, 27, (1959). ¹² В. А. Амбарцумян, Сообщения Бюраканской обсерватории, 13, 3 (1954).