

УДК 525.35

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СВЕРХНОВЫХ ЗВЕЗД II ТИПА

И. Ю. ЛИТВИНОВА и Д. К. НАДЁЖИН

Получены теоретические соотношения, связывающие наблюдаемые характеристики плато кривых блеска сверхновых II типа с энергией взрыва  $E$ , массой выброшенной оболочки  $M$  и радиусом предсверхновой  $R$ . Для «средней» сверхновой II типа получено  $E \approx 6 \cdot 10^{50}$  эрг,  $M \approx 6 M_{\odot}$ ,  $R \approx 1000 R_{\odot}$ , а для SN 1969I соответственно  $\approx 10^{51}$  эрг,  $\approx 10 M_{\odot}$  и  $\approx 500 R_{\odot}$ .

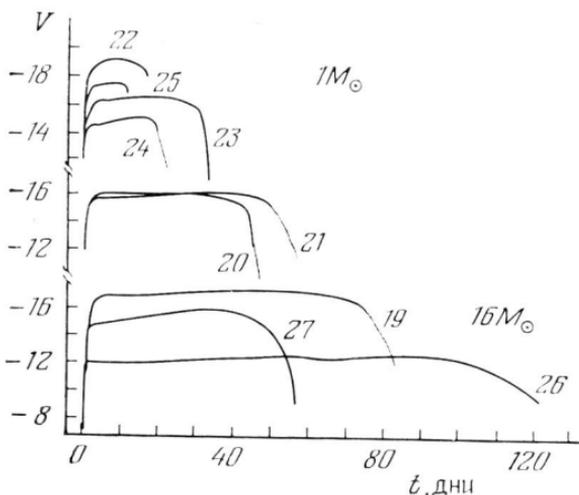
DETERMINATION OF THE INTEGRAL PARAMETERS OF TYPE II SUPERNOVAE, by I. Yu. Litvinova and D. K. Nadezhin. Theoretical relations are derived between the properties of the light curve plateau observed for type II supernovae and the explosion energy  $E$ , the mass of the envelope ejected,  $M$ , the presupernova radius,  $R$ . It is found that  $E \approx 6 \cdot 10^{50}$  erg,  $M \approx 6 M_{\odot}$ , and  $R \approx 1000 R_{\odot}$  for the «average» type II supernova whereas for SN 1969I these parameters  $\approx 10^{51}$  erg,  $\approx 10 M_{\odot}$  and  $\approx 500 R_{\odot}$  respectively.

В нашей предыдущей работе (Литвинова и Надёжин, 1983; далее ЛН) исследовалось развитие вспышки сверхновой II типа (СНII) в зависимости от следующих трех основных параметров: массы  $M$  выбрасываемой оболочки сверхновой, радиуса  $R$  звезды перед вспышкой (предсверхновой) и энергии взрыва  $E$ . Была рассчитана сетка из 18 вариантов, которая охватывала изменения этих параметров в пределах  $M = (1-16) M_{\odot}$ ,  $R = (800 \div 5000) R_{\odot}$ ,  $E = (1.82 \div 29.1) \cdot 10^{50}$  эрг. Такая сетка теоретических моделей позволила, в частности, получить приближенные формулы, выражающие  $M$ ,  $R$  и  $E$  через три других параметра. Два из них — продолжительность плато кривой блеска  $\Delta t$  и абсолютная звездная величина  $V$  на середине плато — описывают характер свечения СН II. Третий параметр — скорость  $u_{ph}$  вещества на уровне фотосферы в момент, соответствующий середине плато кривой блеска, — характеризует быстроту разлета оболочки сверхновой. Значения  $\Delta t$ ,  $V$  и  $u_{ph}$  можно определить из наблюдений СНII. В этом случае полученные в ЛН формулы позволяют найти  $M$ ,  $R$  и  $E$ .

В настоящей работе продолжено построение сетки моделей сверхновых II типа. Основной целью новых расчетов было увеличить число моделей с крайними значениями масс  $M = 16 M_{\odot}$  и  $M = 1 M_{\odot}$ , а также распространить сетку на модели с меньшими начальными

радиусами ( $R < 800 R_{\odot}$ ). Постановка задачи и метод расчета тогда же были приняты в ЛН. В табл. 1 и 2 собраны характеристики вновь полученных моделей (нумерация вариантов продолжает нумерацию в ЛН), а на рисунке показаны теоретические кривые блеска (в цвете  $V$ ) этих моделей.

Первые пять новых моделей (19—23) вместе с 18 моделями из ЛН были обработаны по методу наименьших квадратов. В резуль-



Теоретические кривые блеска в цвете  $V$  сверхновых II типа. Числа у кривых соответствуют номерам вариантов в табл. 1 и 2

тате были получены новые приближенные соотношения, связывающие  $E$ ,  $M$  и  $R$  с  $\Delta t$ ,  $u_{ph}$  и  $V$ :

$$\lg E = 0.135V + 2.34 \lg \Delta t + 3.13 \lg u_{ph} - 3.205, \quad (1)$$

$$\lg M = 0.234V + 2.91 \lg \Delta t + 1.96 \lg u_{ph} - 1.829, \quad (2)$$

$$\lg R = -0.572V - 1.07 \lg \Delta t - 2.74 \lg u_{ph} - 3.350. \quad (3)$$

Здесь  $E$  выражено в  $10^{50}$  эрг,  $M$  — в  $M_{\odot}$ ,  $R$  — в  $R_{\odot}$ ,  $\Delta t$  — в днях,  $u_{ph}$  — в  $10^8$  см/с. По полученным в расчетах значениям  $V$ ,  $\Delta t$  и  $u_{ph}$  формулы (1) — (3) воспроизводят исходные величины  $E$ ,  $M$  и  $R$  в вариантах 1—23 со среднеквадратичными ошибками 36, 32 и 21% соответственно. При этом максимальные отклонения достигаются в варианте 19:  $-70\%$  для  $E$ ,  $-50\%$  для  $M$  и  $+70\%$  для  $R$ . Точность формул (1) — (3) существенно выше, когда  $M$  и  $R$  оказываются в интервалах  $3 M_{\odot} \lesssim M \lesssim 10 M_{\odot}$  и  $300 R_{\odot} \lesssim R \lesssim 5000 R_{\odot}$  (варианты 3—18, 21). В этом случае среднеквадратичные ошибки аппроксимации составляют 19% для  $E$  и 13% для  $M$  и  $R$  при максимальных отклонениях, не превышающих 50% для  $E$  и 30% для  $M$  и  $R$ . Значения  $E$ ,  $M$  и  $R$  для не принятых во внимание при получении формул (1) — (3) вариантов 24—27 воспроизводятся с точностью до множителя 2—6. Однако с точки зрения теории эволюции звезд

## Интегральные характеристики моделей сверхновых

Номер варианта	$M/M_{\odot}$	$R/R_{\odot}$	$E_s$ , $10^{50}$ эрг	$\bar{u}$ , $10^8$ см/с	$E_{r,s}$ , $10^{50}$ эрг	$E_H$ , $10^{50}$ эрг	$N_H$ , $10^{60}$	$E_H/N_H$ , эВ	$E_r/E_s$
19	16	300	29.4	4.3	0.17	0.014	0.017	42	0.0058
20	1.7	400	1.6	3.1	0.040	0.0075	0.015	31	0.025
21	3.63	260	3.22	3.0	0.037	0.0044	0.0075	36	0.012
22	1	300	29.4	17.1	0.25	0.050	0.075	42	0.0086
23	1	300	4.82	4.3	0.036	0.0074	0.013	36	0.020
24	1	30	4.82	4.3	0.037	0.0017	0.0024	45	0.0020
25	1	30	29.4	17.1	0.023	0.0012	0.0020	36	0.0080
26	16	30	4.82	1.4	0.028	0.00037	0.00051	45	0.0015
27	16	30	29.4	4.3	0.021	0.00021	0.00029	44	0.00072

Примечание.  $\bar{u} = \sqrt{2E/M}$  — средняя скорость разлета оболочки СН,  $E_r$  — полная энергия, излученная за все время вспышки;  $N_H$  и  $E_H$  — число фотонов с  $h\nu > 13.6$  эВ и энергия, излученная ими за все время вспышки.

## Основные характеристики моделей сверхновых на стадии вблизи середины плато кривой блеска

Номер варианта	$\Delta t$ , дни	$M_{\text{bol}}$	$U$	$B$	$V$	$T_{ph}$ , 1000 K	$\rho_{ph}$ , $10^{-14}$ г/см <sup>3</sup>	$R_{ph}$ , 1000 $R_{\odot}$	$u_{ph}$ , $10^8$ см/с
19	74	-17.38	-17.14	-16.84	-17.35	6.3	60	22	4.8
20	42	-16.11	-16.03	-15.65	-16.09	6.7	37	14	4.1
21	52	-16.02	-15.85	-15.51	-16.00	6.5	94	11	3.5
22	16	-19.17	-19.46	-18.78	-18.96	9.3	2.1	23	23
23	30	-16.39	-16.38	-15.96	-16.37	7.0	16	12	5.8
24	20	-14.68	-14.54	-14.19	-14.66	6.6	190	6.0	4.8
25	12	-17.17	-17.18	-16.75	-17.15	7.1	7.2	16	22
26	120	-12.8	-10.5	-11.0	-12.0	4.2	3100	6.8	0.9
27	48	-15.8	-15.25	-15.00	-15.60	5.6	335	13	4.3

Примечание.  $M_{\text{bol}}$ ,  $U$ ,  $B$ ,  $V$  — абсолютные звездные величины (болометрическая и в цветах  $U$ ,  $B$  и  $V$ );  $T_{ph}$  и  $R_{ph}$  — температура и радиус фотосферы;  $u_{ph}$  и  $\rho_{ph}$  — скорость вещества и его плотность на уровне фотосферы.

предсверхновые с такими малыми радиусами мало вероятны. Для вариантов 1—18 новые формулы дают практически тот же результат, что и прежние формулы (8) — (10) из ЛН, которыми можно пользоваться при достаточно больших радиусах предсверхновых ( $> 400 R_{\odot}$ ).

Иногда могут понадобиться обратные формулы, выражающие  $V$ ,  $\Delta t$  и  $u_{ph}$  через  $E$ ,  $M$  и  $R$ . Решая систему уравнений (1) — (3) относительно  $V$ ,  $\Delta t$  и  $u_{ph}$ , получаем

$$V = -2.34 \lg E - 1.80 \lg R + 1.22 \lg M - 11.307, \quad (4)$$

$$\lg \Delta t = -0.191 \lg E + 0.186 \lg R + 0.566 \lg M + 1.047, \quad (5)$$

$$\lg u_{ph} = 0,563 \lg E - 0.0616 \lg R - 0.476 \lg M + 0.729. \quad (6)$$

Среднеквадратичные ошибки этих формул не очень велики ( $0^m.18$  для  $V$ , 4% для  $\Delta t$  и 12% для  $u_{ph}$ ) и эти формулы практически совпадают с аналогичными формулами из ЛН (в формуле (5) для  $\Delta t$  из ЛН опечатка: знак у коэффициента перед  $\lg R$  должен быть положительным).

Попытаемся теперь с помощью найденных соотношений определить энергию взрыва  $E$  и массу  $M$  выброшенной оболочки СНП, а также радиус предсверхновой  $R$ . СНП показывают значительные вариации наблюдаемых характеристик. Здесь будут иметься в виду лишь СНП с явно выраженным плато кривой блеска (Барбон и др., 1979). Как и в ЛН, нам не удалось построить модели СНП с «линейными» кривыми блеска, которые, по нашему мнению, характеризуются малыми массами выбрасываемых оболочек ( $< 0.3 M_{\odot}$ ) и сигнализируют об образовании нейтронных звезд (пульсаров) или даже черных дыр. Исходя из данных работ Псковского (1978) и Тамманна (1978), для «средних» наблюдаемых величин  $\Delta t$  и  $V$  можно принять значения соответственно 70 дней и  $-17^m.5$ . Труднее оценить скорость  $u_{ph}$  на середине плато кривой блеска, т. е. примерно через 30—40 дней после начала вспышки СНП. Как первые спектроскопические исследования (Хьюмсон, 1936; Минковский, 1941), так и последующее изучение спектров сверхновых (Хилл, 1965; Дибай и др., 1966; Гринстейн и Минковский, 1973; Кишнер и др., 1973; Оук и Сирл, 1974; Кишнер и Кван, 1975; Проник и др., 1976) указывают на типичные скорости разлета оболочек СНП порядка 5000—7000 км/с. С учетом того, что атмосфера сверхновой, где формируются спектральные линии, находится выше фотосферы и что с течением времени просвечиваются все более глубокие слои оболочки СНП, которые расширяются с меньшей скоростью, характерное значение  $u_{ph}$  можно принять в интервале 4000—5000 км/с. В верхней части табл. 3 приведены параметры «средней» СНП, рассчитанные по формулам (1) — (3) для двух крайних значений  $u_{ph}$  из этого интервала. Предсверхновая оказывается сверхгигантом с радиусом  $\sim 1000 R_{\odot}$ . В процессе взрыва СНП выделяется энергия  $(4-9) \cdot 10^{50}$  эрг и выбрасывается оболочка с массой 4—7  $M_{\odot}$ .

## Параметры сверхновых II типа

Объект	Данные наблюдений		
	$\Delta t$ , дни	$V$	$u_{ph}$ , км/с
«Средняя» СНII: случай А случай Б	70	$-17^m.5$	5000 4000
Сверхновая 1969I в NGC 1058	84	$-17^m.5^{+0.6}_{-0.5}$	$5000 \pm 500$
Объект	Расчеты по формулам (1)–(3)		
	$E$ , эрг	$M$ , $M_{\odot}$	$R$ , $R_{\odot}$
«Средняя» СНII: случай А случай Б	$8.7 \cdot 10^{50}$ $4.3 \cdot 10^{50}$	6.5 4.2	590 1100
Сверхновая 1969I в NGC 1058	$(1.3^{+0.9}_{-0.5}) \cdot 10^{51}$	$11^{+7}_{-4}$	$490^{+300}_{+700}$

В нижней части табл. 3 приведены результаты аналогичных вычислений для сверхновой SN 1969I, вспыхнувшей в галактике NGC 1058. Наблюдаемая величина  $\Delta t$  взята из кривой блеска, приведенной в работе Чиатти и др. (1971), а значение  $V$  соответствует расстоянию до NGC 1058, равному, согласно Киршнеру и Квану (1974),  $12 \pm 3$  Мпс (неопределенность в  $V$  соответствует неопределенности в расстоянии) и поглощению  $A_V = 0^m.5$  в нашей Галактике в направлении на NGC 1058 (Шаров, 1963) (поглощением в самой NGC 1058 можно, по-видимому, пренебречь). Значение  $u_{ph}$  найдено экстраполяцией данных Киршнера и Квана (1974). В их работе скорость на уровне фотосферы была определена за 31 и 10 дней до середины плато кривой блеска. Экстраполированному значению  $u_{ph}$  мы приписали такую же неопределенность, какая была указана в работе Киршнера и Квана. Энергия взрыва и масса выброшенной при взрыве SN 1969I оболочки получаются в  $\sim 2$  раза больше, чем в случае «средней» СНII. Неопределенность в оценках  $E$ ,  $M$  и  $R$  для SN 1969I связана с неопределенностью исходных значений  $u_{ph}$  и  $V$ , причем максимальным  $E$  и  $M$ , которые получаются в случае  $u_{ph} = 5500$  км/с и  $V = -16^m.9$ , соответствует минимальное  $R$  и наоборот.

Таким образом, построенная сетка гидродинамических моделей вспышек СНII дала возможность получить соотношения (1) – (3), по которым можно оценить интегральные характеристики СНII – энергию взрыва, массу выброшенного вещества при взрыве и радиус предсверхновой. Определение этих характеристик представляет собой важный этап исследования сверхновых. Однако возможности гидродинамического моделирования вспышек СН этим не ограничиваются.

раничиваются. При наличии подробной наблюдательной информации о какой-либо конкретной сверхновой построение детальных гидродинамических моделей позволяет определить не только интегральные характеристики, но и сделать выводы о внутреннем строении предсверхновой. Примером может служить исследование пекулярной сверхновой SN 1961v в NGC 1058 (Утробин, 1984).

#### ЛИТЕРАТУРА

- Барбон и др.* (Barbon R., Ciatti F., Rosino L.). *Astron. and Astrophys.*, 1979, v. 72, p. 287.
- Гринштейн и Минковский* (Greenstein J. L., Minkowski R.). *Astrophys. J.*, 1973, v. 182, p. 225.
- Дибай Э. А., Есипов В. Ф. и Проник В. И.* *Астрон. журн.*, 1966, т. 43, с. 907.
- Киришнер и Кван* (Kirshner R. P., Kwan J.). *Astrophys. J.*, 1974, v. 193, p. 27.
- Киришнер и Кван* (Kirshner R. P., Kwan J.). *Astrophys. J.*, 1975, v. 197, p. 415.
- Киришнер и др.* (Kirshner R. P., Oke J. B., Penston M. V., Searle L.). *Astrophys. J.*, 1973, v. 185, p. 303.<sup>4</sup>
- Литвинова И. Ю. и Надёжин Д. К.* *Astrophys. and Space Sci.*, 1983, v. 89, p. 89; Препринт ИТЭФ, 1982, № 23.
- Минковский* (Minkowski R.). *Publs Astron. Soc. Pacif.*, 1941, v. 53, p. 224.
- Оук и Сирл* (Oke J. B., Searle L.). *Annual Rev. Astron. and Astrophys.*, 1974, v. 12, p. 315.
- Проник В. И., Чуваев К. К. и Чугай Н. Н.* *Астрон. журн.*, 1976, т. 53, с. 1182.
- Исковский Ю. П.* *Астрон. журн.*, 1978, т. 55, с. 350.
- Тамманн* (Tammann G. A.). *Mem. Soc. astron. ital.*, 1978, v. 49, p. 315.
- Утробин В. П.* *Astrophys. and Space Sci.*, 1984, v. 98, p. 115; Препринт ИТЭФ, 1983, № 74.
- Хилл* (Hill P. W.). *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, 1965, v. 131, p. 155.
- Хьюмсон* (Humason M. L.). *Publs Astron. Soc. Pacif.*, 1936, v. 48, p. 110.
- Чиатти и др.* (Ciatti F., Rosino L., Bertola F.). *Mem. Soc. astron. ital.*, 1971, v. 42, p. 163.
- Шаров А. С.* *Астрон. журн.*, 1963, т. 40, с. 90.

Ин-т теоретической и экспериментальной физики, Москва †

Поступила в редакцию  
12 сентября 1984 г.