

УДК: 524.354—323.3

СУЩЕСТВУЕТ ЛИ $\Sigma(D)$ -ЗАВИСИМОСТЬ
ДЛЯ ОСТАТКОВ СВЕРХНОВЫХ ЗВЕЗД?

А. О. АЛЛАХВЕРДИЕВ, О. Х. ГУСЕЙНОВ, Ф. К. КАСУМОВ

Поступила 8 апреля 1985

Принята к печати 20 октября 1985

На протяжении 25 лет для определения расстояния до остатков сверхновых (ОС) пользуются зависимостью между поверхностной яркостью Σ и диаметром D остатков. Для построения $\Sigma(D)$ — зависимости разные авторы используют различные остатк-калибраторы с независимо установленными расстояниями. При этом от автора к автору меняются не только параметры зависимости, но и ее вид. Недавно Грин провел очень тщательный анализ всех существующих методов определения расстояний до ОС и нанес свои калибраторы на диаграмму $\Sigma-D$. Оказалось, что калибраторы с наилучшими расстояниями почти не показывают $\Sigma(D)$ -зависимости. В предлагаемой работе показано, что калибраторами для построения $\Sigma(D)$ -зависимости могут быть только остатки оболочечного типа, эволюционирующие в сравнительно плотной среде. Предложена $\Sigma(D)$ -зависимость, по которой можно оценить расстояния и проследить эволюцию подавляющего большинства ОС.

1. *Введение.* В понимании физически верной картины эволюции остатков сверхновых звезд (ОС) в межзвездной среде (МЗС) важная роль принадлежит выявлению истинной шкалы расстояний этих объектов. Обычно в силу крайней ограниченности надежных оценок расстояний для галактических ОС (число известных объектов ~ 140 , а надежных калибраторов ~ 20) прибегают к хорошо известной $\Sigma(D)$ -зависимости (зависимости поверхностной яркости от диаметра). На протяжении многих лет, вслед за Шкловским [1], различными авторами делались попытки построения такой зависимости для установления шкалы расстояний ОС (см., например, [2—4]).

В работах [5, 6] мы проанализировали имеющиеся данные в свете новых представлений о структуре МЗС и получили новую $\Sigma(D)$ -зависимость, но уже в облачной среде. Естественным продолжением этой работы является более детальная выборка ОС-калибраторов с учетом характера их взаимодействия с окружающей средой. Основная сложность при

этом заключалась в отсутствии надежных данных о межзвездной среде, где развивается каждый конкретный ОС, и крайней ограниченности числа калибраторов, среди которых необходимо проводить дальнейшую выборку. После нашей работы появилось несколько исследований по важным для решения поставленной задачи темам [7—10]. В работах [7, 8] исследованы возможности использования $\Sigma(D)$ -зависимости в статистических целях и установления эволюционного статуса ОС, а в [9, 10] изучено распределение межзвездных облаков в Галактике.

Важность работы [8] в интересующем нас аспекте заключается в том, что в ней впервые на основе новых наблюдений оценены радиоразмеры ОС в Магеллановых облаках. Это, при определенных предположениях, позволяет существенно увеличить число калибраторов для получения надежной $\Sigma(D)$ -зависимости в облачной МЗС. Отметим, что Грин [7] и Миллс и др. [8] пришли к противоположным выводам о возможности использования $\Sigma(D)$ -зависимости. Счесь скрупулезно проанализировав методы отбора ОС-калибраторов по степени надежности оценок расстояний, Грин [7] пришел к весьма неутешительному выводу о крайней осторожности в использовании этой зависимости, даже в статистических целях. Напротив, весьма оптимистически к ней подошли авторы работы [8]. Опираясь на полученную $\Sigma(D)$ -зависимость, они выдвинули новый взгляд на эволюционный статус ОС, рассматривая их как некое довольно быстрое переходное (со шкалой времени в несколько тысяч лет) явление. Эволюция и морфология ярких ОС во многом определяется столкновением с плотными облаками МЗС. Последний вывод этих авторов во многом совпадает с нашим [6], хотя и имеются существенные различия в оценке характерного возраста и эволюционного статуса большинства ОС.

Некоторые критические замечания о полноте статистической модели, используемой Миллсом и др. [8], были высказаны Грином [7]. В частности, он поставил под сомнение $\Sigma(D)$ -зависимость, полученную этими авторами, и основной вывод их работы о малом возрасте ОС. Эволюционное поведение и статус ОС в свете новых наблюдательных данных, а также критического обсуждения указанных выше работ будет нами исследован в отдельной работе. Предметом же настоящей статьи является дальнейшая детализация вопроса существования $\Sigma(D)$ -зависимости для ОС, эволюционирующих в облачной МЗС.

2. Новые факторы, влияющие на реальный вид $\Sigma(D)$ -зависимости. Как известно, традиционно основным фактором при построении $\Sigma(D)$ -зависимости до настоящего времени принималась точность оценки расстояний для избранных остатков-калибраторов. Этот вопрос был ранее подробно обсужден нами в работах [5, 6]. Дальнейший детальный анализ точности различных методов оценок расстояний до калибраторов, а так-

же некоторых эффектов селекции при статистических исследованиях ОС был недавно проведен Грином [7]. Он, хотя и несколько снизил количество надежных ОС-калибраторов (10 вместо 14, принятых у нас), практически мало изменил оценки расстояний для общих с принятыми нами калибраторов. Только для ОС Тихо им принята новая, более точная оценка расстояния ~ 2.3 кпк, т. е. почти в два раза меньше, чем у нас. В число надежных калибраторов у него вошли также 3С 58 и Краб, т. е. типичные плерионы (класс Р), а также W44 и RCW 89, RCW 103 — остатки промежуточного морфологического типа (класс С) — по классификации [11]. Построенная на основе этих и еще 8 калибраторов, хотя и с менее надежными по его мнению, но удовлетворительными оценками расстояний, диаграмма $\Sigma-D$ Грина показала довольно большой разброс наблюдаемых точек. Это обстоятельство привело его к пессимистическому выводу о возможности существования $\Sigma(D)$ -зависимости и ее использования даже в статистических целях.

Одной из основных целей построения $\Sigma(D)$ -зависимости является использование ее при оценке расстояний для всех известных остатков сверхновых и последующее исследование распределения ОС, оценки полного числа, частоты рождения и т. д. (а именно, использование ее в статистических исследованиях). Поэтому вывод Грина [7], если он верен, существенно затрудняет наше понимание природы ОС. Почти одновременно с этой работой появилась работа [8], посвященная исследованию ОС в Магелланских облаках, которая опиралась на новые радионаблюдения этих объектов в БМО и ММО, проведенные в 1981—82 гг. Авторы этой работы весьма оптимистически подошли к возможностям $\Sigma(D)$ -зависимости и, опираясь на нее, сделали довольно смелый вывод об эволюционном статусе большинства ОС не только в МО, но и в Галактике, что нами уже отмечалось во введении. Грин [7] также анализировал положение ОС в МО на диаграмме $\Sigma-D$, опираясь на оптические и рентгеновские оценки их размеров (данные [12]). Он был знаком с результатами исследований [8] и в своей работе высказал ряд критических замечаний по ним. В частности он отметил большую роль эффектов селекции для ОС с диаметрами $D \lesssim 30$ пк, хотя в [8] считают исследуемый ими стат-ансамбль полным, вплоть до значений $D \lesssim 40$ пк. В связи с чем Грин [7] поставил под сомнение и общий вывод о существенной молодости радиоостатков сверхновых, сделанный в [8]. Как видно из рис. 1 остатки сверхновых в МО по новым оценкам их радиоразмеров [8] на диаграмме $\Sigma-D$, как и ранее, показывают значительный разброс точек. В этом смысле выводы [7] в [8] не опровергнуты, а, наоборот, закреплены новыми наблюдательными данными (очевидно, для ОС в МО на диаграмме $\Sigma-D$ нет разбросов, связанных с неточностью расстояния до них). Однако это обстоятельство не помешало авторам [8] провести по ним $\Sigma(D)$ -зависимость в

виде $\Sigma \sim D^{-2.3 \pm 0.3}$ (на частоте $\nu = 843$ МГц). Отметим, что использование $\Sigma(D)$ -зависимости как индикатора расстояний оправдано в том и только в том случае, если ошибки при оценках расстояний до ОС с ее помощью меньше или сравнимы с ошибками кинематического метода. Дело в том, что по последнему методу оценены расстояния до $\sim 40\%$ ОС и в статистическом анализе увеличение числа объектов с худшими оценками

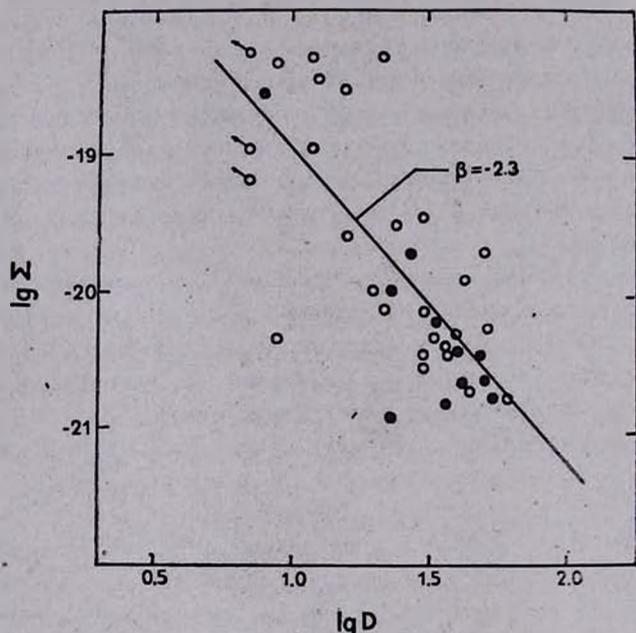


Рис. 1. $\Sigma-D$ — диаграмма для ОС в Магеллановых облаках по данным Миласа и др. [8]: \circ — остатки в БМО и \bullet — в ММО.

расстояний вряд ли приведет к более правильным выводам о природе исследуемых объектов. Основной недостаток кинематических оценок расстояний — это их неоднозначность и при отсутствии дополнительной информации ими трудно воспользоваться. Поэтому возможность даже с такой же точностью независимо оценить расстояния для большинства ОС уже существенно облегчает наши задачи при статистических исследованиях. Точность же оценок кинематических расстояний подробно обсуждалась в работах [6, 7], и надо отметить, что в ряде случаев ошибки могут быть весьма незначительными $< 30\%$.

Новые оценки размеров ОС в МО по радиоизображениям, сделанные в [8], не привели к уменьшению разброса точек на диаграмме $\Sigma-D$. В отличие от галактических калибраторов, неточность оценок расстояний до МО, а следовательно, и до всех ОС в нем, не может привести к изменению

разброса точек на этой диаграмме. Значит причину этого необходимо искать: 1) в точности оценок угловых размеров и радиопотока; 2) в правильном выборе объектов, эволюцию которых на этой диаграмме мы хотим проследить. При этом, если окажется, что начальные параметры вспышек наблюдаемых остатков не сильно различаются, то разброс их на диаграмме $\Sigma-D$ будет связан со средой, в которой они эволюционируют. В зависимости от того, какие из компонентов МЭС окажутся в пределах ОС, его излучающая способность, а следовательно и поверхностная яркость, будет различной (см., например, [6]). В то же время, расширяясь в крайне неоднородной многофазной среде, поверхностная яркость отдельных частей ОС может оказаться различной и в целом также крайне неоднородной, что приведет к неточностям в определении его угловых размеров.

Как известно, поверхностная яркость ОС определяется из выражения $\Sigma = 1.505 \cdot 10^{-19} \frac{S}{\Theta^2}$ Вт/м² Гц ср, где S — поток в Янских, Θ — размер

остатка в угловых минутах. Для ОС в МО радиоразмеры на частоте 843 МГц оценены только в каталоге [8]. Для галактических остатков таких каталогов несколько. Последними из них являются каталоги [2, 3 и 7], причем первый базируется на частоте 408 МГц, а остальные два на $\nu = 1$ ГГц. Сравнение угловых радиоразмеров галактических остатков всех трех каталогов показывает, что они в основном совпадают. Примерно в десяти случаях Θ отличаются и, как оказалось, все эти объекты являются плерионами [11], что может быть связано с различным методом измерений Θ . Уменьшение Θ с ростом частоты для плерионов хорошо известно, но для таких близких частот она весьма незначительна по сравнению с тем, что наблюдается.

Измерение угловых размеров радиоостатков, вообще говоря, представляет определенные трудности в связи со сложной структурой их радиоизображений и ограничениями, накладываемыми разрешающей способностью и чувствительностью радиотелескопов. Трудности эти отчетливо были поняты после получения на ИСЗ «Эйнштейн» рентгеновских изображений остатков сначала в других галактиках [13], а затем и отдельных галактических ОС. Так, в [13] показано, что ранние оценки размеров много меньше оценок рентгеновских размеров, полученных на HRI ИСЗ «Эйнштейн». Оценки радиоразмеров ОС в МО [8] уже приведены в соответствии с рентгеновскими данными и в большинстве случаев (при высокой разрешающей способности рентгеновских наблюдений) составляют $\sim 80\%$ последних. Только в некоторых случаях рентгеновские размеры (полученные в основном на IPC с малым разрешением с большей чувствительностью, чем на HRI) уступают радиоизображениям. Эти наблюдения согласуются с общими представлениями о совпадении рентгеновских раз-

меров с положением ударного фронта, который должен несколько (на $\sim 10\text{--}25\%$) опережать радиолонт ОС.

К сожалению, рентгеновских изображений всех галактических ОС пока нет, но из уже имеющихся также выявлены некоторые интересные особенности. Так, для остатков W 44, W 49 и IC 443 было обнаружено, что рентгеновские изображения имеют плерионную морфологию, хотя в радиодиапазоне указанные объекты являются оболочечными. Недавно в [14] по данным спектрофотометрических исследований показано, что оптические волокна, наблюдаемые до сих пор разными авторами на северо-востоке ОС IC 443, принадлежат остатку, а не соседней H II области — S 249, так как они возбуждены ударной волной. Если это действительно имеет место, то IC 443, имеющий довольно сложную форму, становится совершенно необычным и бесформенным. К тому же угловой размер его должен быть увеличен до $50'$ (вместо принимавшегося ранее $35'\text{--}40'$). Это в свою очередь приведет к уменьшению поверхностной яркости и увеличению диаметра. Аналогичные эффекты, как уже отмечалось ранее, видимо следует ожидать и для слабо излучающих частей других остатков (см., например, W 28, Cygnus Loop, Pup A, G 109, 1—1.0 и др.). Итак, в целом последние и пока единственные оценки радиоразмеров ОС в МО [8], их непротиворечие рентгеновским наблюдениям [13], а также сравнения оценок Θ в каталогах галактических остатков показывают, что погрешности в измерении угловых размеров не превышают 10% . Разумеется, неточности в определении Θ для бесформенных ОС с большим контрастом поверхностной яркости значительно больше. К увеличению погрешности в Θ приводят также возможные перекрытия ОС с другими радиоисточниками (например, H II-областями). Столь же незначительны, по мнению самих наблюдателей, и погрешности при измерении средних потоков ($\sim 10\%$, [2]). От каталога к каталогу разница между радиопотоками для надежных калибраторов незначительна, хотя для некоторых из них относительное отклонение достигает $\sim 20\%$ (в основном это объекты с малыми потоками, как, например, СТВ 1). Все это приводит к тому, что для надежных калибраторов, принятых нами, изменения Σ по данным различных каталогов не более 50% .

Такая погрешность в определении Σ никак не может обеспечить наблюдаемый разброс точек на диаграмме $\Sigma\text{--}D$, которая может достигать при заданном диаметре ОС почти порядка, а иногда и большей величины. Следовательно необходимо обратиться ко второй из возможных причин, вызывающих разброс точек на диаграмме $\Sigma\text{--}D$. А именно, к более точному выбору калибраторов, учитывающему идентичность условий их развития. Но прежде чем это сделать, отметим, что наиболее благоприятным условием выживаемости остатков (в частности, возможность их длительной эволюции) является их попадание в плотную МЗС, которая главным

образом связана с рукавной структурой. Поскольку там же концентрировались молодые массивные звезды, вспыхивающие как СН II типа, то и разброс начальных параметров (масса, энергия взрыва) таких остатков незначителен. Следовательно, выбор калибраторов для получения реальной $\Sigma(D)$ -зависимости будет ограничен вторым фактором, а именно близостью условий среды, в которой происходит их эволюция.

Как уже отмечалось, в работе [6] было показано, что увеличение яркости отдельных частей ОС связано со взаимодействием фронта ударной волны с отдельными неоднородностями МЗС, т. е. с межзвездными облаками средних размеров (~ 13 пк по классификации [15]), а не отдельными холодными ячейками (~ 2 пк) трехфазной модели среды, предложенной в [16]. Отметим, что эта модель нами не отвергается, а принимается за основу. К ней добавлены облака с размером ~ 10 — 15 пк, наблюдаемые издавна. Таким образом, чтобы надежно ограничить влияние неоднородностей МЗС, хотя бы в относительно крупных масштабах, необходимо среди ОС-калибраторов по расстоянию отобрать те из них, которые расположены в рукавных областях.

Теперь вновь обратимся к диаграмме Σ — D , приведенной на рис. 2, на которую нанесены ОС-калибраторы [5] с учетом данных [7] и остатки, расположенные в Магеллановых облаках (МО) по данным [8]. Наблюдения [8] проводились на частоте 843 МГц. Значения поверхностной яркости всех ОС на рис. 2 соответствуют частоте 1 ГГц. Расстояние до БМО принято равным 55 кпк, а до ММО — 63 кпк. На примере трех остатков с большими значениями Σ показана величина смещения мест ОС, если расстояние до БМО взять равным 45 кпк. Так как ОС Cas A имеет $\Sigma = 1.9 \cdot 10^{-17}$ Вт/м² Гц ср, на рис. 2 приведено направление, в котором он должен сместиться. Те из них, которые не проецируются на области звездообразования и газопылевые комплексы, взяты в круг (плерионы в МО также исключены из рассмотрения). При этом мы пользовались картами распределения указанных областей в МО, приведенными в работе [17].

Из диаграммы прежде всего видно, что ОС, эволюционирующие в облачной среде, при равных диаметрах имеют сравнительно большие поверхностные яркости. Далее к наибольшему разбросу точек на диаграмме как раз приводят остатки, не проецирующиеся на газопылевые туманности и области звездообразования, т. е. остатки с большей вероятностью эволюционирующие в отличных от остальных объектов условиях среды. Действительно, по данным [18] эти остатки в среднем имеют плотности ниже, чем остальные. В то же время имеющиеся индивидуальные отличия от средней тенденции могут быть обусловлены неточностями модельных расчетов, проведенных в этих работах (в частности, отсутствием учета влияния металличности и ионизационного равновесия). Отметим также, что влияние на поверхностную яркость радиоостатка может оказать широкий

разброс величины напряженности магнитного поля ($\sim 1-2$ порядка величины) в облаках примерно одинаковой плотности и размеров [19].

Наконец, галактические ОС с $\Sigma \geq 7 \cdot 10^{-21}$ Вт/м² Гц ср на этой диаграмме расположены подобно ОС в Магеллановых облаках. Поэтому последние также могут быть использованы в качестве калибраторов для построения $\Sigma(D)$ -зависимости, которая уже явно прослеживается по объек-

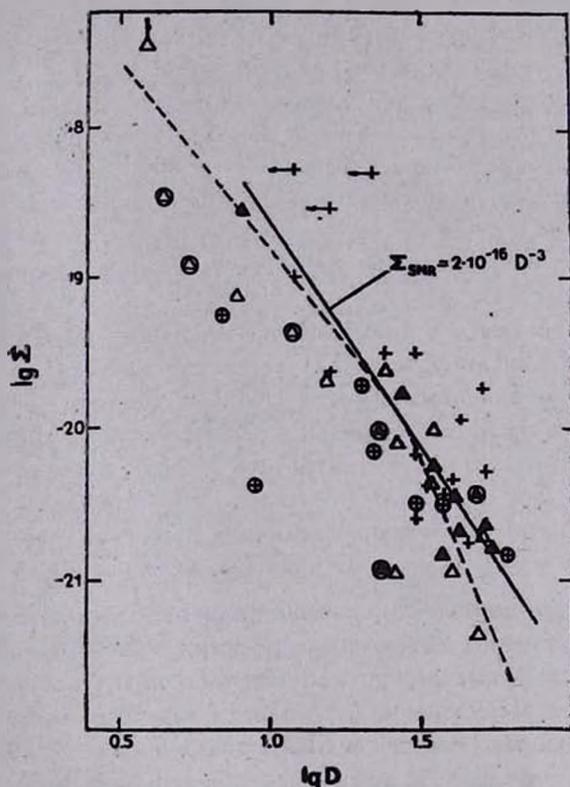


Рис. 2. $\Sigma-D$ — диаграмма галактических ОС-калибраторов (по [6] отмечены знаком Δ) и остатков в Магеллановых облаках ($+$ в БМО и \blacktriangle в ММО) на частоте 1 ГГц. Пунктирной линией изображена $\Sigma(D)$ -зависимость, полученная в работе [6]. Остатки, не проецирующиеся на газопылевые комплексы, взяты в кружок.

там, расположенным в плотной среде. Пунктирной линией на рис. 2 показана ранее полученная нами $\Sigma(D)$ -зависимость [6]. Поскольку для статистических исследований необходима полнота каталогов, то при использовании $\Sigma(D)$ -зависимости необходимо ограничиваться пороговой поверхностной яркостью, которая согласно [2] для 1 ГГц равна $\Sigma_0 \sim \sim 10^{-20}$ Вт/м² Гц ср. По данным последних каталогов следует, что большинство ОС ($\geq 70\%$) имеют поверхностные яркости больше этого пре-

дела. Отметим также, что при $10^{-20} \leq \Sigma \leq 10^{-19}$ Вт/м² Гц ср, где расположена существенная часть таких ОС, почти все имеющиеся $\Sigma(D)$ -зависимости слабо отличаются друг от друга. Как видно из рис. 2, для таких остатков при оценке расстояний можно пользоваться следующей простой зависимостью:

$$\Sigma = 2 \cdot 10^{-16} D^{-3}, \quad (1)$$

где D выражено в пк, а Σ — в Вт/м² Гц ср. При этом ошибки в оценках расстояния до ОС, эволюционирующих в пределах рукавов Галактики и ассоциаций, могут достигать самой величины.

Полученная выше зависимость (1) проведена по оболочечным ОС и ею нельзя пользоваться для оценки расстояний плерионов. Здесь видимо уместно отметить, что почти все исследователи обычно не выделяют из рассмотрения плерионы, что также может привести к неправильным выводам. Только в работах [20, 6] $\Sigma(D)$ -зависимость построена отдельно для оболочечных остатков. Однако, в отличие от нас, в [20] использовано большое количество калибраторов (~ 57 объектов). Кстати $\Sigma(D)$ -зависимость, полученная в [20], оказалась совершенно идентичной зависимости, построенной Лозинской [4] на меньшем числе калибраторов.

Следствием игнорирования всех указанных выше особенностей при построении $\Sigma(D)$ -зависимости и явился тот неутешительный вывод, к которому пришел Грин [7]. Он, детально анализирувавший степень надежности оценок расстояний до калибраторов, нанес на диаграмму $\Sigma-D$ остатки обоих морфологических типов, а также ОС, эволюционирующие как в плотной, так и в разреженной средах. Но ведь также поступали и все другие авторы. Почему же в таком случае у них получалась явно выраженная $\Sigma(D)$ -зависимость, а в [7] нет? Чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к калибраторам, используемым в ранних работах.

Базовым источником в выборе параметров калибраторов во многих работах служат каталоги [2] на частоте 408 МГц и [3] — на частоте 1 ГГц. Повтому мы на рис. 3 привели диаграмму $\Sigma-D$ по этим калибраторам (20 — на 408 МГц и 22 — на 1 ГГц). Из 24 калибраторов I класса [2] авторы исключили четыре: Крабовидную туманность, Cas A и G 349.7 + 0.2, как остатки с высокой поверхностной яркостью, и RCW 103, хотя и с хорошей оценкой расстояния, но резко отличающихся от других калибраторов. По остальным 20 объектам они получили $\Sigma(D)$ -зависимость с наклоном $\beta = -3$. Среди этих 20 калибраторов 13 расположены на $|b| \leq 0.5$ и в пределах угла, равного $l = \pm 70^\circ$. Почти все они имеют расстояния ≥ 6 кпк, т. е. расположены во внутренних частях Галактики, где и наблюдается основная масса газопылевых комплексов.

Обратимся теперь к калибраторам на частоте 1 ГГц. Из 20 калибраторов, используемых в [3] (RCW 103 и ОС Кеплер здесь были исключе-

ны при получении $\Sigma(D)$ -зависимости с $\beta = -3.8$), в том же секторе с $l = \pm 70^\circ$ и на широтах $|b| \leq 0.5$ расположены 8 объектов. Почти все они удалены на значительные расстояния от Солнца (≥ 9 кпк). Семь остатков расположены вне этого сектора, остальные 5 также во внутренних областях Галактики, но на относительно больших широтах. Все эти 12 остатков (за исключением G 21.8—0.6) находятся на относительно близких расстояниях (< 4 кпк) от Солнца. Итак, большая часть калибраторов [3] также находится во внутренних частях Галактики, но в отличие от калибраторов [2] имеется немало объектов, расположенных на больших широтах. Как известно, явно выраженная $\Sigma(D)$ -зависимость в [3] получалась путем введения z -эффекта.

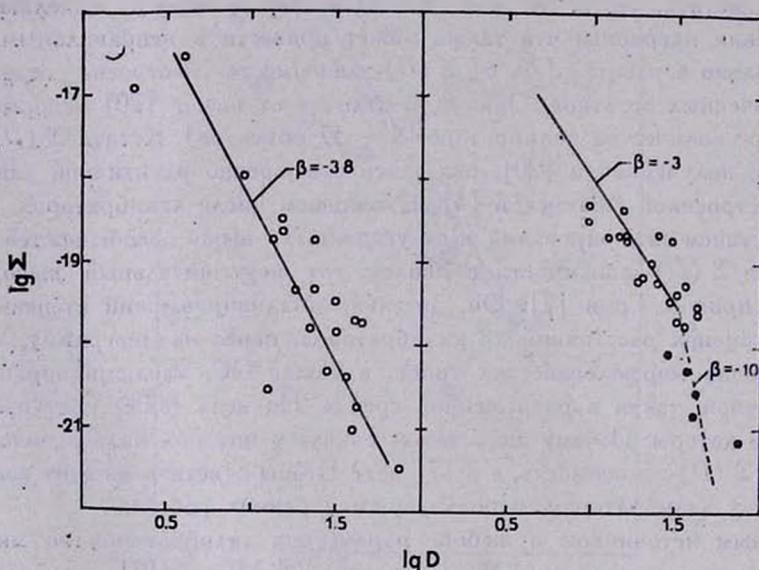


Рис. 3. $\Sigma(D)$ -зависимость на 1 ГГц по калибраторам [3] и на 408 МГц по калибраторам [2]. Заполненные кружки — калибраторы II класса.

Из проведенного выше анализа следует, что, в отличие от Грина [7], зависимость на диаграмме $\Sigma-D$ получалась другими авторами именно благодаря тому, что большинство ($\approx 65\%$) используемых ими калибраторов оказывались объектами, расположенными во внутренних частях Галактики.

Итак, используя в основном расположенные близко остатки-калибраторы (< 4 кпк) построить единую $\Sigma(D)$ -зависимость нельзя. Такую зависимость можно получить для остатков, расположенных во внутренних частях Галактики (в пределах долгот $l = \pm 70^\circ$ и на расстоянии от центра Галактики < 10 кпк). Естественно, эта зависимость будет улучшена,

если на диаграмму $\Sigma-D$ наносить только остатки оболочечного типа и эволюционирующих в пределах рукавов. По-видимому, для определения расстояний до таких ОС с $\Sigma \geq 10^{-20}$ Вт/м² Гц ср лучше всего воспользоваться зависимостью, приведенной выше (см. рис. 2).

В свете изложенного становится также понятной причина, по которой Грин [7], несмотря на более точный выбор калибраторов по расстоянию, чем это сделано в [3] и [2], вместо ожидаемого улучшения $\Sigma(D)$ -зависимости получил обратный результат. На основе только одного критерия при выборе калибраторов (а именно точности расстояния) нельзя получить $\Sigma(D)$ -зависимость. Такая зависимость может быть получена в этом случае, только если среди используемых ОС-калибраторов будут доминировать приблизительно одинаково эволюционирующие ОС. Этому-то условию, в отличие от калибраторов других авторов, калибраторы [7] не удовлетворили.

Поскольку на близких расстояниях расположены в основном остатки с $\Sigma < 10^{-20}$ Вт/м² Гц ср, становится также ясно, почему эти остатки не приводили к $\Sigma(D)$ -зависимости. Такие остатки-калибраторы всегда действовали в сторону ухудшения единой зависимости (излом в работе [2], введение z -эффекта в [3] и [21]). В то время как для более ярких ОС расстояния оценивались с помощью радиоастрономических методов, для слабых объектов эти оценки основаны на оптических методах, превышающих по точности первые. Но так как оптических наблюдений было мало, то и в числе калибраторов остатки, выбранные по данной методике оценки расстояний, оказывались в меньшинстве. Это и было причиной меньшего разброса точек на диаграмме $\Sigma-D$ и приводило к возможности выявления $\Sigma(D)$ -зависимости.

Использование $\Sigma(D)$ -зависимости для определения расстояний ОС независимо от величины пороговой яркости, как это делается многими авторами, не корректно. Для получения правильных представлений о распределении ОС в Галактике и других статистических исследований, необходимо ограничиться именно остатками с порогом яркости $\Sigma > 10^{-20}$ Вт/м² Гц ср, которые видны по всей Галактике и составляют большинство наблюдаемых ОС.

В работе [6] для ОС с $10^{-21} \leq \Sigma \leq 10^{-20}$ Вт/м² Гц ср получено $\Sigma \sim D^{-4.7}$, что видно и из рис. 2. Одной из возможных причин увеличения крутизны $\Sigma(D)$ -зависимости является уменьшение доли оболочки ОС, вносящей существенный вклад в наблюдаемый поток излучения. Рассмотренные радиоизображения галактических остатков в последовательности возрастания их диаметров подтверждают это. С другой стороны, к увеличению крутизны $\Sigma(D)$ -зависимости должны привести также умень-

шение эффективности ускорения частиц и магнитного поля с ростом диаметра.

На диаграмме $\Sigma-D$ на одной из осей откладывается размер остатка, который пропорционален времени. Поэтому полученная зависимость отражает эволюционный путь большинства остатков. В таком случае при использовании $\Sigma(D)$ -зависимости, полученной с учетом обсужденных нами выше факторов, необходимо быть осмотрительными [22]. Как при определении расстояния, так и при изучении изменения физических параметров ОС с заданными Σ , распределение вещества исследуемого остатка должно быть похожим на распределение вещества использованных калибраторов. Наблюдаемым признаком этого может служить схожесть картин их радиоизображений, т. е. их морфологических структур. В этой связи напомним, что иногда наблюдатели определяют параметры не всего ОС, а лишь его части. Так, остаток в G 296.1—0.5 ранее принимали за 2 ОС. Каждая отдельно выявленная его часть и остаток в целом попадут на диаграмме $\Sigma-D$ в различные участки.

Наконец, отметим, что эти ограничения на возможность использования $\Sigma(D)$ -зависимости не приводят к существенному уменьшению статистического ансамбля. Действительно, из 80 каталогизированных ОС с $\Sigma > 10^{-20}$ Вт/м² Гц ср $\sim 80\%$ находятся во внутренних областях Галактики ($l = \pm 60^\circ$), т. е. в местах локализации молекулярных облаков, где условия развития остатков довольно схожи. Поэтому основные результаты детальных исследований галактического распределения ОС, проведенных нами ранее [23], в связи с действием дополнительных факторов в статистике в целом останутся в силе.

3. *Заключение.* Остатки сверхновых, расположенные в окрестности Солнца, эволюционируют в существенно различных средах, являются продуктами вспышек Сверхновых обоих типов и имеют различные морфологические структуры. Поэтому при одинаковых размерах они имеют различные поверхностные яркости: используя их, почти невозможно получить удовлетворительную $\Sigma(D)$ -зависимость. Калибраторами для построения $\Sigma(D)$ -зависимости могут быть только остатки оболочечного типа, эволюционирующие в сравнительно плотной среде. Все предыдущие авторы критерием занесения ОС в калибраторы считали только надежное определение расстояния до них. Однако этот критерий недостаточен. Предложена $\Sigma(D)$ -зависимость, по которой можно оценить расстояния и проследить эволюцию подавляющего большинства ОС.

IS THERE A $\Sigma(D)$ -DEPENDENCY FOR
SUPERNOVA REMNANTS?

A. O. ALLAKHVERDIYEV, O. H. GUSEINOV, F. K. KASUMOV

For 25 years the dependence of the surface brightness Σ on the diameter D of the remnants is used to determine the distances to SNRs. Various authors have used different remnants with independently established distances (calibrators) to construct a $\Sigma(D)$ -dependency, not only the parameters of dependency but also its shape which was changed as well. Recently Green made a very minute analysis of all existing methods to determine the distances to SNRs, plotting his calibrators on the $\Sigma-D$ -diagram. The calibrators with the most reliable distances hardly showed the $\Sigma(D)$ -dependency. In this paper it is shown that only shell-type remnants evolved in a comparably dense medium may be the calibrators for the construction of $\Sigma(D)$ -dependency. Using $\Sigma(D)$ -dependency one can estimate distances and see the evolution of the overwhelming majority of the SNRs.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. С. Шкловский, *Астрон. ж.*, 37, 222, 1960.
2. D. H. Clark, J. L. Caswell, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 174, 267, 1976.
3. D. K. Milne, *Austral. J. Phys.*, 32, 83, 1979.
4. Т. А. Лозинская, *Письма в Астрон. ж.*, 7, 29, 1981.
5. А. О. Allakhverdiyev, P. R. Amnuel, O. H. Guseinov, F. K. Kasumov, *Astrophys. and Space Sci.*, 97, 261, 1983.
6. А. О. Allakhverdiyev, O. H. Guseinov, F. K. Kasumov, I. M. Yusifov, *Astrophys. and Space Sci.*, 97, 287, 1983.
7. D. A. Green, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 209, 449, 1984.
8. B. Y. Mills, A. J. Turtle, A. G. Little, J. M. Durdin, *Austral. J. Phys.*, 37, 321, 1984.
9. S. Drapatz, H. Zinnecker, *Mem. Roy. Astron. Soc.*, 210, 11, 1984.
10. D. B. Sanders, N. Z. Scoville, P. M. Solomon, *Astrophys. J.*, 289, 373, 1985.
11. K. W. Weiler, *Observatory*, 103, 85, 1983.
12. D. A. Mathewson, V. L. Ford, M. A. Dopita, I. R. Tuohy, K. S. Long, D. J. Helfand, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 51, 345, 1983.
13. K. S. Long, D. J. Helfand, D. A. Grabelsky, *Astrophys. J.*, 248, 925, 1981.
14. R. A. Fessn, *Astrophys. J.*, 281, 658, 1984.
15. S. Iksuchi, A. Habe, Y. D. Tanaka, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 207, 909, 1984.
16. C. F. McKee, J. P. Ostriker, *Astrophys. J.*, 218, 148, 1977.
17. R. D. Davies, K. H. Elliott, J. Meaburn, *Mem. Roy. Astron. Soc.*, 81, 89, 1976.
18. R. Fusco-Femiano, A. Preite-Martinez, *Astrophys. J.*, 281, 593, 1984.
19. P. R. Silverglate, *Astrophys. J.*, 279, 694, 1984.

20. *Ф. Х. Сахибов, М. А. Смирнов*, Письма в Астрон. ж., 8, 281, 1983.
21. *J. L. Caswell, I. Lerche*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 187, 201, 1979.
22. *R. A. Chevalier*, Ann. Rev. Astron. and Astrophys., 15, 175, 1977.
23. *A. O. Allakhverdiev, O. H. Guseinov, F. K. Kasimov*, Astrophys. and Space Sci., 115, 1, 1985.