Доклады Академии наук СССР
1955. Том 100, № 1

АСТРОНОМИЯ

И. М. ГОРДОН

ВОЗМОЖНОСТЬ ВЫЯСНЕНИЯ ПРИРОДЫ КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ПУТЕМ

(Представлено академиком Г. А. Шайном 10 XI 1954)

Изучение физических процессов, протекающих в одном из интереснейших космических объектов — Крабовидной туманности М 1, приобрело в последнее время выдающийся научный интерес. Проблема происхождения космических лучей, а также тесно связанная с ней проблема переменности звезд нуждаются прежде всего в создании теории вспышек Сверхновых ([1], [2]). Вместе с тем надежные данные о массе, температуре и других характеристиках М 1 отсутствуют, тогда, как только они могут послужить основой для создания такой теории. Одни спектроскопические исследования М 1, повидимому, не могут в настоящее время дать однозначный ответ на вопрос о природе ее излучения, ее массе и температуре.

Недавно появился ряд новых важнейших работ в этой области, которые учитывают свойства радиоизлучения туманности. И. С. Шкловский предположил, что излучение М 1 связано с наличием релятивистских электронов ([3], [4]). В. Л. Гинзбург указал механизм, который может ускорять заряженные частицы до больших энергий ([5], [6]). Необходимо рассмотреть те следствия, которые вытекают из этих новых работ. Совершенно необходимым представляется также указать те эксперименты, которые могут дать однозначный выбор между различными гипотезами о природе излучения и, таким образом, привести к получению достоверных сведений о физических процессах в туманности М 1. Обсуждению этих вопросов посвящена настоящая заметка.

I. До недавнего времени считалось, что аномально интенсивный непрерывный спектр М 1 (составляющий 80% всего оптического излучения туманности) является тепловым излучением высокоионизованного газа.

Такой механизм давал для массы $M = 15\,M_\odot$ весьма высокую температуру туманности, а также температуру центральной звезды $T = 5 \cdot 10^{5}$°. Заметим, что последнее предположение не представляется необходимым, так как при высокой температуре состояние ионизации может сохраняться несколько тысячелетий. Последующая работа показала, что ни наблюдаемый градиент интенсивности в непрерывном спектре, ни скачок у границы бальмеровской серии не дают сколько-нибудь надежных данных об электронной температуре ([8]). Следует признать, что полученные Минковским данные о массе и температуре М 1 лишь совместны с наблюдаемым характером излучения, но не вытекают из него с необходимостью.

Постоянство спектральной плотности радиоизлучения М 1 привело к предположению о том, что оно также является тепловым излучением ионизованного газа. Однако И. С. Шкловский показал, что в этом случае оптическое излучение превосходило бы $\approx$ в 300 раз наблюдаемое. Это позволило ему сделать заключение о том, что радиоизлучение обусловлено тормозным излучением релятивистских электронов в магнитном поле. В по-

следующей работе И. С. Шкловский предположил, что оптическое излучение в непрерывным спектре обусловлено тем же механизмом, что и радиоизлучение ([4]). Это предположение существенно меняет характер энергетического спектра релятивистских электронов. В этом случае протяженный спектр с постоянной плотностью простирается от $E = 10^9$ эв до $E > 10^{12}$ эв.

Интегральная энергия релятивистских электронов была оценена В. Л. Гинзбургом и оказалась равной 10^{50} эрг ([5]). Эту величину необходимо повысить на порядок, чтобы учесть излучение туманности в ультрафиолете. Полная энергия в 10^{51} эрг плохо согласуется с последними данными о массе М 1 ([4]).

При любом механизме, который создает релятивистские электроны, трудно представить, чтобы их энергия превосходила на 3 порядка полную кинетическую энергию туманности. Если этот механизм излучения получит решающие подтверждения, возникает необходимость радикального пересмотра вопроса о массе туманности.

Механизм ускорения частиц рассматривался В. Л. Гинзбургом ([5]), который указал на то важное обстоятельство, что в расширяющихся оболочках Новых и Сверхновых может эффективно действовать статистический механизм ускорения частиц. Следует учесть, что этот механизм действует не только на электроны, но и на протоны. Условия инжекции для последних более благоприятны, а приобретаемая энергия, пропорциональная массе, на 3 порядка превосходит приращение энергии электронов ([9]). В силу этого спектр энергии протонов должен быть аналогичен спектру электронов, но сдвинут в сторону больших энергий, а их интегральная энергия на 3 порядка превосходит интегральную энергию релятивистских электронов. Это создает некоторые трудности, так как потребуется значительно бо́льшая турбулентная энергия туманности.

Положение может изменить следующее обстоятельство. Радиус кривизны траектории заряженной частицы в магнитном поле зависит от ее энергии. Он возрастает с возрастанием энергии и при заданной энергии он тем более, чем больше масса частицы. Если электроны в туманности ускоряются за счет статистического механизма до энергии $5 \cdot 10^{12}$ эв, протоны приобретают энергию до $5 \cdot 10^{15}$ эв. Если окажется, что, начиная с некоторой энергии, радиус кривизны траектории протонов становится порядка радиуса туманности, они покидают туманность, и их энергетический спектр будет «обрезан» сверху. В этом случае энергия турбуленции туманности затрачивается на ускорение до «энергии ускользания» и условия становятся менее жесткими.

Произведем расчет применительно к условиям, существующим в Крабовидной туманности. Радиус кривизны траектории в магнитном поле определяется формулой

$$r = \frac{P}{300\,H},$$

где H — напряженность магнитного поля, P — импульс частицы, выраженный в единицах эв/c. Принимая $H = 10^{-4}$ эрст. и $E = 5 \cdot 10^{15}$ эв, мы получим для радиуса кривизны $r \approx 10^{17}$ см.

Таким образом, мы видим, что «ускользания» из туманности протонов, ускоряемых статистическим механизмом, не происходит, так как радиус кривизны на порядок меньше поперечника туманности. Протоны удерживаются в туманности, и трудность, связанная с большой энергией турбуленции, повидимому, остается.

Рассмотрим теперь с этими данными гипотезы о природе излучения и механизме ускорения в М 1.

I. Предположение о том, что радиоизлучение обусловлено релятивистскими электронами, требует наличия 10^{50} «радиоэлектронов» при $H = 10^{-4}$ эрст. и $E = 10^9$ эв.

2. Объяснение оптического излучения тем же механизмом приводит к протяженному спектру с общей энергией 10^{51} эрг.

3. Присоединение к этим гипотезам предположения о статистическом механизме ускорения увеличивает полную энергию до 10^{50} и 10^{54} эрг, соответственно (за счет протонов). Сопоставляя эти данные с разумными предположениями о массе туманности, мы приходим к выводу, что энергия турбуленции недостаточна для обеспечения ускорения во всех этих случаях. В первом случае это требует массы оболочки $M = 10^{36}$ г (т. е. $10^3\ M\odot$, во втором 10^{40} г ($10^7\ M\odot$). Скорость турбуленции мы приняли равной 0,1 скорости расширения. Это, повидимому, подтверждает наш вывод о том, что релятивистские электроны сохранились от эпохи вспышки (2).

II. Нами указывалось (10), что для решения вопроса о механизме оптического излучения М 1 исключительное значение могут приобрести наблюдения поляризации света, так как тормозное излучение релятивистских электронов в магнитном поле линейно поляризовано. Предсказанный нами эффект поляризации света был обнаружен В. А. Домбровским (11) и независимо подтвержден М. А. Вашакидзе (12).

По данным В. А. Домбровского, процент поляризации колеблется от 9 до 15%, по М. А. Вашакидзе превышает 20%. Однако наиболее удивительным является то, что поляризация имеет приблизительно одинаковое направление для всех частей М 1, которое с направлением наибольшей протяженности и совпадающим с ним направлением галактического экватора составляет угол в 20°. В некоторых местах поляризация особенно велика (12). Известно, что важный вопрос о причине поляризации света звезд не может считаться решенным. Некоторые авторы приписывают поляризацию самому излучению звезд (13), другие — действию межзвездной среды (14). Для звезд в настоящее время трудно указать эксперименты, которые могут привести к непосредственному решению вопроса. Поэтому особый интерес представляет его решение для М 1.

Мы предлагаем простой способ, который может привести к однозначному определению источника поляризации. Суть его заключается в следующем. До настоящего времени измерения поляризации радиоизлучения М 1 не велись. Считалось общепринятым, что магнитное поле в туманностях связано с турбулентным движением материи и поэтому имеет неупорядоченный характер (15). Разрешающая сила современных радиотелескопов не позволяет выделить отдельные участки туманности и исследовать поляризацию их излучения. Считалось поэтому, что попытка измерения поляризации заведомо обречена на неудачу. Однако новые данные о том, что поляризация света имеет одинаковое направление для всей туманности, заставляют ожидать, что ее интегральное радиоизлучение должно обнаружить поляризацию, если механизм радиоизлучения таков, как и механизм излучения света. Поляризация радиоизлучения в этом случае должна быть выше, так как оно обусловлено только излучением «радиоэлектронов», тогда как в оптической области имеется значительное излучение в линиях и тепловое излучение газа. Поляризация излучения может быть легко измерена, и настоятельно необходимо произвести эти измерения.

III. В заключение мы хотели бы провести предварительное обсуждение возможных результатов. Если наблюдения обнаружат поляризацию радиоизлучения такого же характера, как и оптического излучения, это будет исчерпывающим доказательством двух фундаментальных фактов:

1. В туманности имеются релятивистские электроны с протяженным непрерывным спектром и интегральной энергией $\approx 10^{51}$ эрг.

2. В туманности имеется магнитное поле, имеющее приблизительно одинаковое направление и не обнаруживающее никаких признаков ра-

диальной симметрии. В этом случае вряд ли магнитное поле связано с турбулентным движением малых вихрей. Здесь мы имеем, очевидно, пример упорядоченных магнитных полей большого масштаба, наличие которых предугадали Г. А. Шайн и В. Ф. Газе ([16]), исходя из форм открытых ими волокнистых структур туманностей. В этом случае нет оснований ограничивать плотность магнитной энергии условием равенства плотности кинетической энергии, что, возможно, заставит пересмотреть вопрос о напряженности магнитного поля и энергии релятивистских (космических) частиц. Для объяснения такой «намагниченности» в М 1 можно применить следующие соображения. Если Сверхновая конденсировалась из протозвездной материи, обладающей высокой проводимостью, происходило «адиабатическое сжатие» магнитного поля. При «выбросе» оболочки произошел обратный процесс, и поле в М 1 является как бы несколько «конденсированным» полем Галактики. Такая картина будет свидетельствовать о колоссальных магнитных полях в недрах Сверхновых до вспышки.

Если радиоизлучение поляризации не обнаружит, это будет первым непосредственным и достоверным доказательством поляризации света межзвездной средой. В этом случае трудно переоценить наличие в туманности особенно сильно поляризованных участков ([12]). Это будет свидетельствовать о наличии сильно намагниченных, оптически анизотропных и обладающих малой протяженностью облаков космической пыли.

Мы надеемся, что указанный эксперимент будет произведен возможно скорее и его результаты подведут прочный фундамент под наши представления о механизме излучения остатков Сверхновых и о поляризации света межзвездной средой.

Пользуюсь случаем выразить благодарность действительному члену АН УССР Н. П. Барабашеву за обсуждение результатов, а также С. Б. Пикельнеру, которому я обязан соображениями о «сжатии» магнитного поля.

Поступило
10 VI 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] И. М. Гордон. ДАН, **94**, 413 (1954). [2] И. М. Гордон, ДАН, **97**, № 4 (1954). [3] И. С. Шкловский, Астр. журн., **30**, 15 (1953). [4] И. С. Шкловский, ДАН, **90**, 983 (1953); ДАН, **91**, 475 (1953). [5] В. Л. Гинзбург, ДАН, **92**, 727 (1953). [6] В. Л. Гинзбург, ДАН, **92**, 1133 (1953). [7] R. Minkowski, Ap. J., **96**, 199 (1942). [8] R. Minkowski, J. Greenstein, ibid., **118**, 1 (1953). [9] В. Л. Гинзбург, Усп. физ. наук, **101**, 343 (1953). [10] И. М. Гордон, ДАН, **94**, 813 (1954). [11] В. А. Домбровский, ДАН, **94**, 1021 (1954). [12] М. А. Вашакидзе, Астр. цирк., март (1954). [13] W. Hiltner, Ap. J., **114**, 241 (1951); J. Hall, Publ. Nav. Obs., **17**, 1 (1950). [14] В. А. Домбровский, Астр. журн., **30**, 6 (1953). [15] Проблемы космической аэродинамики. 1953, стр. 179. [16] Г. А. Шайн, В. Ф. Газе, Изв. АН СССР, сер. физ., **7**, 114 (1953).