

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
МАТЕМАТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА АСТРОФИЗИКИ

# Магнитные поля планетарных туманностей

**Автор:**

Студент 591 группы

Живанович Иван

Санкт-Петербург 2013

# Введение

Планетарные туманности были обнаружены в XVIII веке. Шарль Мессье при составлении своего каталога туманностей в 1764 году занес планетарную туманность Гантель в каталог под номером M27. В 1784 году Уильям Гершель при составлении своего каталога выделил отдельный класс туманностей (class IV nebulae) и предложил для них термин "планетарная туманность". В 1956 году И. С. Шкловский предположил, что планетарные туманности в прошлом были красными гигантами. По сравнению с приведенными выше датами, открытие магнитного поля в исследуемых объектах было сделано совсем недавно, например, одно из первых наблюдений, которое подтвердило присутствие магнитного поля в планетарных туманностях было выполнено в 2005 году Стефаном Джорданом и др.[1]

Планетарные туманности образуются при сбросе внешних слоев красных гигантов и сверхгигантов на завершающей стадии их эволюции. Предшественники планетарных туманностей относятся к звездам промежуточных масс: это интервал от 0.8 до 8  $M_{\odot}$ . Характерным представителем звезд-предшественников планетарных туманностей является Солнце.

Рассмотрим некоторые физические характеристики планетарных туманностей. Типичный представитель данного рода астрономических объектов имеет протяженность от 0.003 до 0.3 пк. Плотность вещества в туманностях составляет около 1000 частиц на  $\text{см}^3$ .

На сегодняшний день в нашей Галактике известно примерно 1500 планетарных туманностей. Причиной обнаружения относительно небольшого числа ПТ обуславливается их краткой по сравнению со звездной продолжительностью жизни.

По своим формам и структурам планетарные туманности можно разделить на симметричные, биполярные и асимметричные. Большинство планетарных туманностей симметричны. Порядка 10% туманностей биполярны, и лишь малое их число являются асимметричными.

Несмотря на тот факт, что большинство туманностей имеют симметричные формы, множество очень сложных форм присутствует во многих туманностях. Таким образом, сферических туманностей очень малое количество, подавляющее большинство туманностей представляют собой симметричные и почти сферические структуры со сложными элементами.

# Теории формирования планетарных туманностей



Рис. 1: Планетарная туманность NGC 6302<sup>2</sup>. Данная туманность является примером симметричной туманности со сложной структурой.



Рис. 2: Планетарная туманность IC 3568<sup>3</sup>. Для данной туманности характерна видимая сферическая форма<sup>1</sup>.

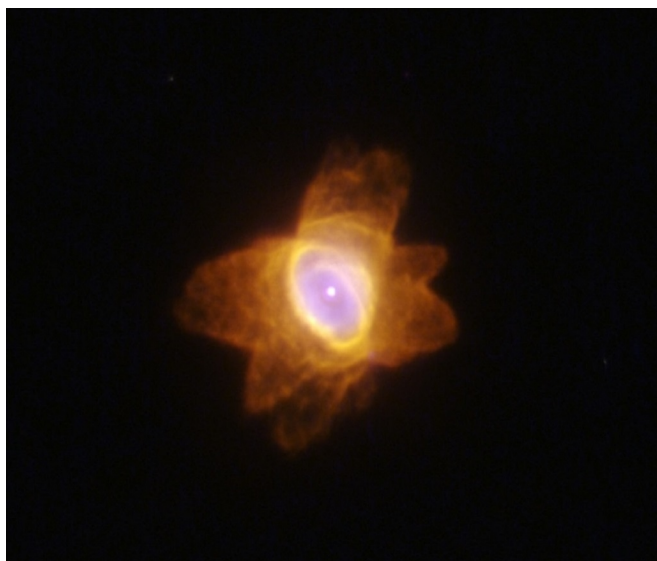


Рис. 3: Планетарная туманность Henize 2-47<sup>4</sup>. Здесь ярко выраженная сложная несимметричная структура.

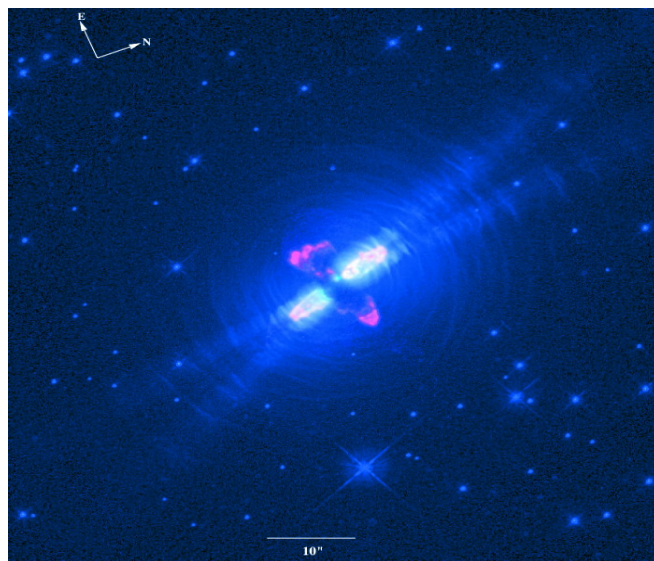


Рис. 4: Планетарная туманность CRL 2688<sup>5</sup>. В данном случае ярко выражена биполярная структура.

На рис. 1 - 4 приведены примеры планетарных туманностей с различными структурами. Сразу отметим следующий факт: на рис. 2 мы видим сферическую планетарную туманность.

<sup>1</sup>Эта туманность может не быть сферической. Этот факт объясняется в тексте статьи после рис. 4.

<sup>2</sup><http://www.waid-observatory.com/ngc6302-2012-07-22-HLA-2015.html>

<sup>3</sup><http://www.spacetelescope.org/static/archives/images/screen/opo9738c.jpg>

<sup>4</sup><http://annesastronomynews.com/wp-content/uploads/2012/02/Henize-2-47.jpg>

<sup>5</sup><http://iopscience.iop.org/1538-4357/492/2/L163/fulltext/975581.text.html>

Однако это зависит еще и от того, как мы смотрим на туманность. Если биполярные компоненты планетарной туманности будут лежать на луче зрения, то вполне возможно, что мы будем видеть туманность сферической формы, при этом не наблюдая данные биполярные структуры.

Для примера возьмем планетарную туманность CRL 2688 (рис. 4). Для нее характерны 4 симметричных выброса. В данном случае мы их видим. Если представить ситуацию, когда два выброса направлены к наблюдателю, и еще два соответственно направлены от наблюдателя, в таком случае планетарная туманность закроет два выброса, направленные от наблюдателя, а выбросы, направленные на наблюдателя не будут различимы на фоне туманности.

Таким образом, физически сферических планетарных туманностей меньше, чем видимых сферических туманностей. Явно заметно преобладание сложных структур в планетарных туманностях. Предпринималось множество различных попыток объяснить разнообразие сложных форм туманностей, что привело к созданию нескольких теорий формирования планетарных туманностей.

Можно выделить несколько теорий формирования туманностей:

- теория "двух ветров";
- формирование планетарных туманностей в тесных двойных системах;
- влияние магнитного поля на структуру планетарных туманностей.

Для начала рассмотрим планетарные туманности с тесными двойными системами. Здесь следует отметить малое количество таких объектов в сравнении с общим количеством планетарных туманностей со сложной формой. Так как теория применима только к малому числу планетарных туманностей, рассматривать ее не совсем оправдано при исследовании Планетарных туманностей в целом. Вполне вероятно, что в таких туманностях могут присутствовать магнитные поля, которые также оказывают влияние на форму и структуры планетарной туманности.

Теперь подробнее рассмотрим две оставшиеся теории формирования туманностей.

## Теория двух ветров

Рассмотрим некоторые особенности теории "двух ветров". Данная теория основывается на факте истечения вещества от звезды на различных этапах эволюции звезды.

Данная теория рассматривает два ветра: медленный и быстрый. Определим некоторые физические характеристики двух ветров. Медленный ветер - это выброс вещества из центральной звезды планетарной туманности, происходящий на стадии АВГ (асимптотическая ветвь гигантов).

- медленный ветер:  $V \approx 10 \text{ km/sec}$ ,  $\mathfrak{M} \approx 10^{-5} M_{\odot}/\text{yr}^1$ ;
- быстрый ветер:  $V \approx 1000 \text{ km/sec}$ ,  $\mathfrak{M} \approx 10^{-7} M_{\odot}/\text{yr}$ ;

---

<sup>1</sup> $V$  - скорость удаления выброшенного вещества по отношению к звезде,  $\mathfrak{M}$  - темп потери массы центральной звезды планетарной туманности.

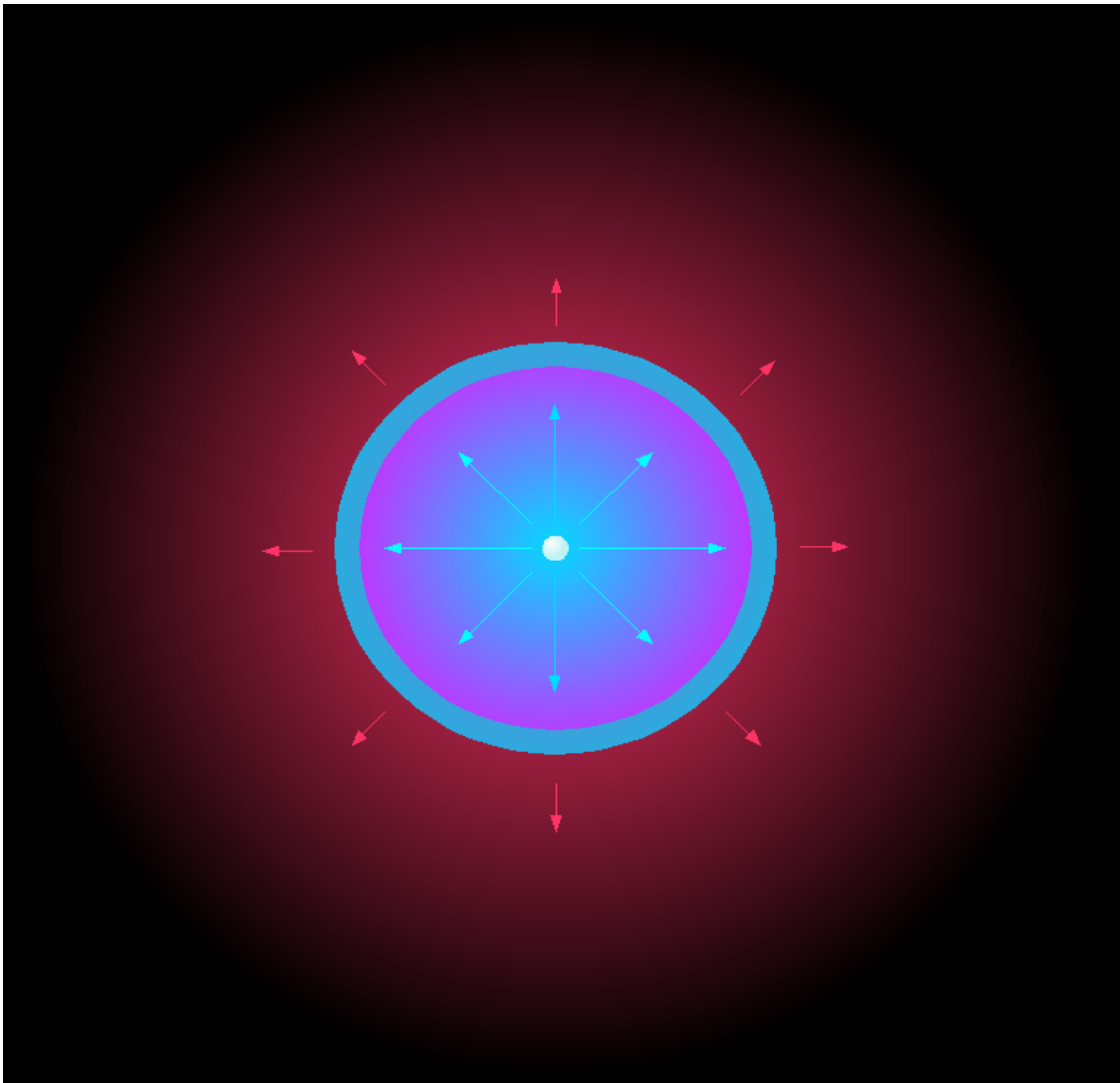


Рис. 5: Модель теории "двух ветров"<sup>1</sup>

На рис. 5 представлена модель теории "двух ветров". Для начала, отметим некоторые области на данном рисунке.

- внутренняя область (фиолетовая область на рисунке 5) соответствует области быстрого ветра, синими стрелками показано направление распространения вещества в данной области;
- внешняя область, отмеченная красным, соответствует области медленного ветра, соответственно красными стрелками отмечено направление распространения вещества в данном случае
- между областями медленного и быстрого ветра (синяя область на картинке) соответствует зоне столкновения вещества, движущегося с более быстрой скоростью, и догнавшего выброшенное ранее вещество.

---

<sup>1</sup><http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planetary.Nebula.Formation.png>

Таким образом, в данной модели рассматривается 3 области вокруг звезды. Отметим также тот факт, что импульсы вещества из областей быстрого и медленного ветров равны:

$$P_{\text{б. в.}} = \mathfrak{M}_{\text{б. в.}} V_{\text{б. в.}} = 1000 \text{ km/sec} \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{yr} = 10^{-4} \frac{M_{\odot} \times \text{km}}{\text{yr} \times \text{s}}$$

$$P_{\text{м. в.}} = \mathfrak{M}_{\text{м. в.}} V_{\text{м. в.}} = 10 \text{ km/sec} \times 10^{-5} M_{\odot}/\text{yr} = 10^{-4} \frac{M_{\odot} \times \text{km}}{\text{yr} \times \text{s}},$$

где  $P$  - импульсы,  $\mathfrak{M}$  - темпы потери массы звездой,  $V$  - скорости движения сброшенного вещества, индексы м.в. и б.в. - медленный и быстрый ветер соответственно.

В области столкновения возникает ударная волна, которая является следующим этапом формирования планетарной туманности, ведь именно ударная волна влияет на форму туманности.

Теперь рассмотрим следующий вопрос, весьма важный для формирования планетарной туманности, точнее для ее итоговой формы. Как можно заметить, на рис. 5 представлено симметричное распределение вещества, то есть сферическое. Таким образом дальнейшее развитие формы будет происходить симметрично во всех направлениях относительно центральной звезды. Как итог, получится сферическая туманность. То есть в случае изначальной сферической формы распространения вещества получится сферическая туманность.

Что же произойдет, если изначальное распределение вещества в фазе медленного или быстрого ветра изменится? Во-первых, чтобы значительно изменилось распределение вещества в фазе быстрого ветра по отношению к фазе медленного ветра, должны происходить сильные изменения в физике звезды. Более вероятен тот случай, когда распределение вещества в этих двух фазах имеет схожую структуру.

Тогда можно предположить, что выбросы вещества звезды неравномерны по всей поверхности, тогда у нас возникает несферическое распределение вещества в рамках модели "двух ветров", что приводит не к сферической, а к более сложной форме планетарной туманности. Однако довольно сложно предсказать, каким должно быть распределение выбрасываемого звездой вещества в случае сложных форм планетарных туманностей.

Таким образом, данная модель является зависимой от начальных условий. На данный момент ведется изучение начальных параметров модели для их применения к сложным несимметричным формам планетарных туманностей.

## Магнитные поля планетарных туманностей

### п.1. Галактическое магнитное поле

Итак, как было выяснено ранее, большинство туманностей имеют биполярную структуру. Отметим, что не было обнаружено планетарных туманностей с количеством областей повышенной яркости, равным трем или одной. Четко выраженная биполярность ПТ указывает на магнитную природу этого свойства.

Чтобы исключить возможность влияния магнитного поля Галактики, рассмотрим некоторые факты. Регулярное магнитное поле Галактики, действуя на сильно ионизованное вещество

туманности, может вызвать перераспределение этого вещества, в результате чего распределение плотности вещества по различным сечениям туманности станет неодинаковым. Учитывая данную гипотезу, следует ожидать заметной корреляции между направлением магнитных силовых линий магнитного поля Галактики и направлением большой оси биполярной планетарной туманности.

Рассмотрим некоторые результаты работы [8]. В данном обзоре представлены пять планетарных туманностей: четыре биполярные и одна кольцеобразная. Все они сосредоточены в сравнительно небольшой околоэкваториальной<sup>1</sup> области на южной полусфере неба. К сожалению так совпало, что на момент написания данной работы не было информации о поляризации звезд на этом участке небесной сферы, так что у авторов не было информации о направлении магнитных силовых линий.

Однако даже отсутствие этой информации не повлияло на некоторые заключения, сделанные в работе. А именно, расположение всех этих туманностей относительно экватора не показывает никакой общей тенденции. Следующее замечание, которое было сделано в обзоре: отсутствие корреляции между направлениями биполярных областей четырех планетарных туманностей и Галактическим экватором. Также присутствие кольцеобразной туманности говорит о том, что биполярные области образовались из-за частных источников магнитного поля и никак не связаны с Галактическим магнитным полем.

Тут возникает следующий вопрос: что, если туманности разбросаны вдоль луча зрения на разных расстояниях, где магнитные поля могут иметь различные направления и величины? Авторы дают следующий ответ на данный вопрос: звезды, в отношении которых проводились поляризметрические наблюдения (на другом участке неба) разбросаны по лучу зрения на различных расстояниях, однако в таком случае плоскости колебания электрического вектора почти параллельны плоскости Галактического экватора.

Как итог работы можно вынести следующее: форма планетарных туманностей не зависит от Галактического магнитного поля. Этот факт подтверждается наличием типичных биполярных планетарных туманностей на больших галактических высотах<sup>2</sup>.

## **п.2. Магнитное поле звезды**

Рассмотрим возможность влияния магнитного поля звезды на форму планетарной туманности и ее развитие. Для начала предположим, что магнитное поле звезды - дипольное. В данном случае работает кубический закон затухания дипольного поля с расстоянием:

$$H \sim \frac{1}{R^3},$$

где  $H$  - напряженность магнитного поля,  $R$  - расстояние от ядра звезды.

Это приводит к тому, что магнитное поле в области повышенной яркости достигает порядка  $10^{-10}$  гаусс, если допустить напряженность магнитного поля на поверхности звезды порядка  $10^6$  гаусс.

---

<sup>1</sup>имеется в виду экваториальная плоскость Галактики.

<sup>2</sup>Например биполярная планетарная туманность NGC 3587,  $b = +58^\circ$ .

### п.3. Собственное магнитное поле

Из пунктов 1 и 2 сделаем вывод о том, что существенное влияние Галактического магнитного поля и дипольного поля центральной звезды на структуру и форму планетарной туманности исключается. Вместе с тем трудно сомневаться в том, что биполярность планетарных туманностей связана с наличием магнитного поля. Отсюда можно сделать вывод о наличии у туманности своего магнитного поля, независимого от поля центральной звезды и Галактического магнитного поля.

Магнитное поле планетарной туманности не может быть однородным, т. е. иметь одинаковую по величине и направлению напряженность, иначе поле бы везде оставило одинаковый по характеру и величине эффект и, соответственно, ни о каком перераспределении материи внутри туманности не могло бы быть и речи. Исходя из этих же соображений, сделаем вывод, что поле не может быть хаотичным. Биполярность формы планетарных туманностей является указанием на то, что поле должно быть симметричным относительно одной из осей туманности. Этим требованиям удовлетворяют, например, дипольные и тороидальные магнитные поля.

Как же влияет магнитное поле на распределение вещества? Тороидальное поле сдерживает потоки вещества в экваториальной плоскости, перенаправляя их вдоль полюсов. Вследствие этого наблюдаются симметричные выбросы вещества из полюсов туманности. Дипольное магнитное поле способно создавать плотный тор вокруг центральной звезды.

#### Магнитогидродинамическое динамо

Судя по форме некоторых планетарных туманностей (например это справедливо для планетарной туманности CRL 2688, рис. 6), в которых присутствуют симметричные выбросы в полярных областях, а также присутствует плотный тор, можно предположить, что в таких туманностях присутствуют два вида магнитного поля.

Исходя из данного предположения, Блэкман разработал модель магнитогидродинамического динамо (МГД-динамо, динамо-эффект), применимую к планетарным туманностям. Ниже мы опишем некоторые особенности его работы.

Однако для начала следует ввести некоторые определения, рассматриваемые в данной модели.

- **Тороидальное магнитное поле** - магнитное поле, направленное вдоль параллелей объекта.
- **Полоидальное магнитное поле** - магнитное поле, направленное вдоль меридианов исследуемого объекта. Пример полоидального поля - дипольное магнитное поле.
- **Альфа-эффект ( $\alpha$ -эффект)** - процесс преобразования тороидальных магнитных полей в полоидальные магнитные поля.
- **Омега-эффект ( $\Omega$ -эффект)** - намотка тороидального поля вследствие дифференциального вращения вещества.



Теперь определимся с тем, что же такое динамо-эффект. В общих чертах, мгд-динамо можно определить следующим образом - это эффект самогенерации магнитного поля при определенном движении проводящей жидкости.



Рис. 6: Планетарная туманность CRL 2688, она же планетарная туманность "Яйцо"<sup>1</sup>. Для нее характерны 4 выброса из полярных областей, сгруппированных по 2, а также присутствует плотный тор вокруг центральной звезды

В астрономии данная теория весьма оправдана. Известно, что магнитное поле в любой проводящей (за исключением сверхпроводящей) среде со временем быстро затухает и даже если во время образования астрономические объекты имели магнитное поле, то к настоящему времени его зачастую нельзя было бы зарегистрировать. Тем не менее магнитные поля у астрономических объектов наблюдаются. Одним из возможных объяснений и является теория мГД-динамо.

Чтобы избежать некоторой путаницы, определимся с некоторыми разновидностями динамо-эффекта.

Отметим модель, которой пытаются объяснить магнитные поля планет. В данном случае магнитное поле возникает в результате переноса веществом вмороженных линий магнитных линий и в результате конвекции. Эта модель удовлетворительно описывает особенности магнитного поля планет земной группы, а также объясняет отсутствие магнитного поля Венеры.

Однако нам предстоит познакомиться с другим видом динамо-эффекта, а именно с солнечным динамо. Именно на его основе Блэкман получил свою модель поддержания магнитного поля в планетарных туманностях.

Рассмотрим солнечное динамо. В ходе наблюдений магнитных полей на Солнце, которые, к слову, велись с начала XX века, было выявлено, что напряженность магнитных полей меняется,

<sup>1</sup>[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e3/Egg\\_Nebula.jpg?uselang=ru](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e3/Egg_Nebula.jpg?uselang=ru)

причем изменения носят циклический характер с периодом в 22 года. Этот процесс принято разделять на 11-летние циклы. В начале 11-летнего цикла крупномасштабное магнитное поле Солнца является преимущественно полоидальным, имея дипольную конфигурацию. В максимуме цикла оно сменяется тороидальным полем, которое в конце цикла вновь сменяется полоидальным, с тем отличием, что теперь направление поля противоположно тому, что наблюдалось в начале цикла (11 лет назад)<sup>1</sup>. За 22 года поле вновь будет полоидальным с тем же направлением. Таким образом 22 года - полный цикл смены крупномасштабной структуры на Солнце.

Разберемся с механизмами преобразования магнитного поля в полоидальное и тороидальное более подробно. Вследствие дифференциального вращения, изначально полоидальное поле, увлекаемое вращающейся плазмой, растягивается вдоль параллелей, приобретая тороидальную компоненту ( $\Omega$ -эффект). Однако для выполнения механизма МГД-динамо необходимо, чтобы тороидальное поле преобразовывалось в полоидальное (т. е. имел место  $\alpha$ -эффект). В 1955 году Паркер показал, что поднимающиеся объемы солнечной плазмы должны вращаться под действием сил Кориолиса, и как следствие этого, увлекаемые ими тороидальные магнитные поля могут преобразовываться в полоидальные. Таким образом, выстроилась модель самоподдерживающегося солнечного динамо. В настоящее время существуют модели солнечного динамо существенно усложненные, однако основные принципы сохраняются.

На рис. 7 приведена схема  $\alpha$ - и  $\Omega$ -эффектов. Точнее для  $\alpha$ -эффекта соответствуют рисунки 7 d, 7 e и 7 f. На рисунке 7 d изображено тороидальное магнитное поле. Рисунок 7 e соответствует стадии, на которой под воздействием перемещения вещества происходят изменения магнитного поля, которые ведут к преобразованию в полоидальное магнитное поле, представленное на рис. 7 d.

Теперь определимся с рисунками 7 a - 7 c. Эти рисунки схематично представляют  $\Omega$ -эффект. На рисунке 7 a представлено типичное полоидальное поле. Далее на рисунке 7 b представлено "закручивание" полоидального поля, вследствие чего происходит преобразование в полоидальное магнитное поле, представленное 7 c.

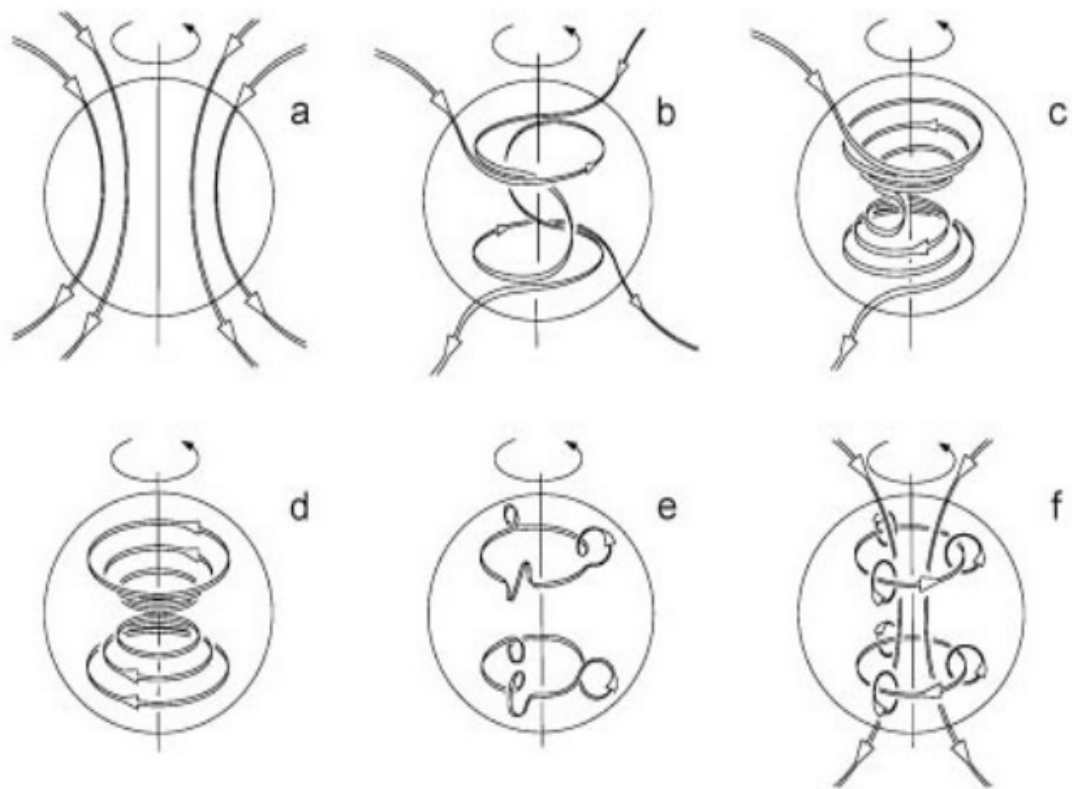
Теперь вернемся к модели Блэкмана. Как уже говорилось ранее, Блэкман использовал модель динамо-эффекта для описания возможности существования и поддержания в течение длительного времени магнитного поля в планетарных туманностях. Выше мы описывали модель для Солнца.

Заметим, что в планетарной туманности совсем другие условия, нежели на Солнце. Рассмотрим необходимые условия, которые необходимы для выполнения модели МГД-динамо.

Во-первых, для осуществления  $\alpha$ -эффекта необходима конвективная зона. Она присутствует в глубоких слоях вещества планетарной туманности. Во-вторых, для  $\Omega$ -эффекта необходимым условием является дифференциальное вращение. Согласно работе [2], его нам обеспечивает сжатие ядра и расширение оболочки звезды.

---

<sup>1</sup>закон Хейла



Love, J. J., 1999. *Astronomy & Geophysics*, 40, 6.14-6.19.

Рис. 7: Схема  $\alpha$ - и  $\Omega$ -эффектов.<sup>1</sup>

Таким образом, все необходимые условия для существования модели МГД-динамо выполнены в случае планетарных туманностей. Осталось уточнить некоторые детали насчет численного моделирования. Его Блэкман выполнил следующим образом: использовалась модель динамо-эффекта, применяемая к белым карликам. Эта модель основана на анализе основных уравнений для магнитного поля и динамо. Солнечное динамо относится к этому же типу, что позволило использовать период динамо для Солнца и амплитуду колебаний магнитного поля в течение процесса динамо на Солнце получить некоторую калибровку. После этого откалиброванная модель применялась к планетарным туманностям.

<sup>1</sup>Love, J. J., 1999, *Astronomy & Geophysics*, 40, 6.14-6.19

# Наблюдения магнитных полей в планетарных туманностях

Напомним, что одно из первых наблюдений, подтвердивших наличие магнитного поля в планетарных туманностях, было выполнено в 2005 году Стефаном Джорданом и др.[1].

Теперь рассмотрим некоторые наблюдательные результаты, полученные разными авторами. Итак, начнем с радионаблюдений. Околосветная оболочка исследуется в радиодиапазоне в трех мазерах: OH, H<sub>2</sub>O, SiO. Вот полученные результаты[5]:

- мазер OH: расстояние от центра звезды - 1000 - 10000 а. е.,  $B_{\parallel} \sim 5 - 20$  mG;
- мазер H<sub>2</sub>O: расстояние от центра звезды -  $\sim 100$  а. е.,  $B_{\parallel} \sim 100$  mG;
- мазер SiO: расстояние от центра звезды - 5 - 10 а. е.,  $B_{\parallel} \sim 5 - 10$  G.

Итак, отметим следующий факт: расстояния до центра звезды при данных наблюдениях изменяются на 1 порядок ( $\sim 10$  а.е.  $\rightarrow \sim 100$  а.е.  $\rightarrow \sim 1000$  а.е.), в то время как магнитные также изменяются на 1 порядок ( $\sim 1$  G  $\rightarrow \sim 100$  mG  $\rightarrow \sim 10$  mG).

Таким образом получается зависимость напряженности магнитного поля от расстояния следующего вида:

$$H \sim \frac{1}{R}$$

Полученная зависимость не соответствует закону убывания напряженности магнитного поля для звезды ( $H \sim \frac{1}{R^3}$ ). Это еще одно наблюдательное свидетельство существования магнитного поля в самой планетарной туманности, а не только у центральной звезды.

Далее приведем примеры обзора наблюдений 4 планетарных туманностей[4], а именно NGC 6537, NGC 7027, CRL 2688 (рис. 4) и NGC 6302(рис. 1).

## NGC 6302

Рассмотрим результаты наблюдений, выполненных Сабиним и пр[4]. Начнем с планетарной туманности NGC 6302. Эта туманность - характерный представитель туманностей типа "бабочка", называемых так из-за их внешней схожести с бабочками. Для этой туманности характерны биполярные выбросы и темная полоса в центре (все это отчетливо видно на рис. 1). Наблюдения туманности проводились на инструменте SCUBA (Submillimetre Common-User Bolometer Array).

Наблюдения показали, что большая ось имеет направление, совпадающее с направлением север-юг, с расширением в направлении юг-юго-восток. Также наблюдения показали наличие в центре туманности эллиптического радиоисточника.

По изменениям колебаний вектора поляризации были сделаны выводы о магнитном поле. Как итог, для данной туманности получились следующие результаты: не было обнаружено корреляции между магнитным полем и структурами планетарной туманности. С другой стороны, магнитное поле хорошо ассоциируется с радиоисточником в центре туманности.

## CRL 2688

Туманность CRL 2688 (рис. 4) выделяется 4 выбросами, причем они симметричны по 2 относительно линии запад-юг планетарной туманности (на рис. 4 в левом верхнем угле есть отметка для направлений на север-восток).

Для данной туманности было получено наибольшее количество векторов поляризации. По результатам их изменения был сделан вывод о магнитном поле: в восточной части туманности поле имеет направление по "долготе", а в западной части туманности поле уже перпендикулярно относительно поля в восточной части. Этот факт может быть признаком того, что происходит изменение вида магнитного поля (с тороидального на полоидальное или наоборот).

## NGC 7027 и NGC 6537



Рис. 8: Планетарная туманность NGC 7027<sup>1</sup>.      Рис. 9: Планетарная туманность NGC 6537<sup>2</sup>.

Для туманности NGC 7027 (рис. 8) были получены следующие результаты: магнитное поле расположено в экваториальной плоскости. Для степени поляризации имеются такие данные: в северо-восточной части туманности степень поляризации составляет  $8.9 \pm 0.9\%$ , в юго-западной части -  $7.6 \pm 1.3\%$ .

Теперь рассмотрим результаты наблюдений туманности NGC 6537 (рис. 9). Для данной туманности сделаны выводы: магнитное поле лежит в экваториальной плоскости и является тороидальным.

### Выводы

Рассмотрим выводы, которые можно сделать из приведенных выше наблюдений планетарных туманностей. Для начала отметим, что были исследованы биполярные туманности. Так, что делать вывод для других видов туманностей по этим результатам - нельзя. Также все исследованные туманности имеют молекулярную оболочку.

Таким образом, полученный вывод: магнитные поля присутствуют при эволюции массивной звезды в стадию биполярной планетарной туманности, и магнитные поля можно обнаружить, пока присутствует молекулярная оболочка.

<sup>1</sup><http://www.astronet.ru/db/msg/11635611>

<sup>2</sup>[http://www.astronet.ru/db/msg/1169945/ngc6537\\_hst\\_big.jpg.html](http://www.astronet.ru/db/msg/1169945/ngc6537_hst_big.jpg.html)

## Список литературы

- [1] Stefan Jordan, Klaus Werner and Simon J. O'Toole, **“Discovery of magnetic fields in central stars of planetary nebulae”**, A&A 432(2005), pp. 273-279, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0501040>
- [2] Eric G. Blackman, Adam Frank, J. Andrew Markiel, John H. Thomas & Hugh M. van Horn, **“Dynamos in asymptotic-giant-branch stars as the origin of magnetic fields shaping planetary nebulae”**, Nature 409, pp. 485-487
- [3] Ting-Hui Lee, Letizia Stanghellini, Lilia Ferrario & Dayal Wickramasinghe, **“High-resolution spectra of bright central stars of bipolar planetary nebulae and the question of magnetic shaping”**, The Astronomical Journal 133 (2007), pp. 987-999, <http://clck.ru/8x3Y5>
- [4] L. Sabin, Albert A. Zijlstra & J. S. Greaves, **“Magnetic fields in planetary nebulae and post-AGB nebulae”**, MNRAS 376(2007), pp. 378-386, <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/0701054v1.pdf>
- [5] Fabrice Herpin, A. Baudy, E. Josselin, C. Thum & H. Wiesemeyer, **“Magnetic fields in AGB stars and (proto-) Planetary Nebulae”**, Proceedings to the International Astronomical Union/Volume 4/Symposium S259/November 2008, pp. 47-52, <http://clck.ru/8x3Xi>
- [6] Eric G. Blackman, **“Magnetic fields in Planetary Nebulae: paradigms and related MHD frontiers”**, Proceedings of the International Astronomical Union/Volume 4/Symposium S259/November 2008, pp. 35-46, <http://clck.ru/8x3XN>
- [7] Г. А. Гурадзян, **“Планетарные туманности”**, Государственное издательство физико-математической литературы, Москва, 1962
- [8] Evans D., Thackeray A., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 110, p. 249, 1950