

По форме этой тени после специальной математической обработки сигнала можно восстановить направление прихода фотонов относительно маски и их энергию. На космической гамма-обсерватории ИНТЕГРАЛ (телескоп IBIS) этим методом получены изображения гамма-источников с угловым разрешением порядка 10 угловых минут. Спектральное разрешение для линий в гамма-диапазоне (спектрометр SPI обсерватории ИНТЕГРАЛ) достигает  $\sim 2.2$  кэВ на энергиях 1.33 МэВ.

Еще более жесткое гамма-излучение можно регистрировать и наземными приемниками света. Оптическое излучение, детектируемое фотоумножителями, рождается при прохождении атмосферы быстрыми частицами, образованными при взаимодействии жесткого гамма-кванта с атомами атмосферы (черенковское излучение). Крупнейшая действующая установка для регистрации сверхжесткого гамма-излучения с энергией свыше 100 ГэВ — H.E.S.S.<sup>4</sup> — состоит из 4 телескопов для регистрации черенковского излучения от космических ливней, порождаемых такими фотонами в атмосфере Земли. Полная площадь каждого зеркала, состоящего из 382 60-сантиметровых сегментов, порядка 100 кв. м. Установка находится в Намибии в 100 км от столицы — г. Виндхука.

### 3.7. Поляризационные наблюдения

Еще один важный канал информации в астрономии представляют поляризационные наблюдения. Измерение поляризации излучения производят во всех спектральных диапазонах — от радиоволн до рентгеновского излучения.

Различают линейную и круговую (в общем случае — эллиптическую) поляризацию. Линейная поляризация характеризуется выделенной плоскостью (плоскостью поляризации), в которой колеблется вектор напряженности электрического поля  $\mathbf{E}$  электромагнитной волны. При круговой (эллиптической) поляризации происходит вращение вектора  $\mathbf{E}$  в плоскости, перпендикулярной лучу зрения. При оптических поляризационных наблюдениях излучение пропускается через вращающийся анализатор поляризации (полярироид), и после регистрации излучения выделяется переменная составляющая, пропорциональная степени его поляризации. Посколь-

---

<sup>4</sup>От англ. High Energy Stereoscopic System, а также в честь физика Виктора Гесса, открывшего космические лучи в 1912 году.

ку сам оптический инструмент (и атмосфера) также может вносить небольшую поляризацию, параллельно наблюдается стандартный источник, поляризация которого заранее известна (или известно, что она отсутствует). Степень поляризации излучения определяется как максимальное значение относительного изменения сигнала при двух взаимно перпендикулярных направлениях плоскости анализатора. Как правило, степень поляризации космических источников не превышает нескольких процентов.

Механизмы, вызывающие поляризацию излучения, могут быть различными. Наиболее распространенная причина — это рассеяние на частицах с размером меньшим длины волны, например, на мелкой пыли в межзвездном пространстве, на аэрозолях в атмосферах планет, на электронах в ионизованном газе (томсоновское рассеяние). Поляризация излучения далеких звезд связана с прохождением света через межзвездную среду, содержащую несферические пылинки, ориентация которых не хаотична, а имеет преимущественное направление, что обусловлено межзвездным магнитным полем. Такие пылинки по-разному поглощают свет с различной плоскостью поляризации, что и приводит к превращению первоначально неполяризованного излучения звезд в частично поляризованное, причем тем в большей степени, чем (в среднем) большее поглощение испытывает свет. По распределению направлений плоскости поляризации света в различных областях галактического диска можно построить общую геометрическую картину линий магнитной индукции в Галактике. В среднем, плоскости поляризации света звезд, а, следовательно, линии магнитной индукции, оказались ориентированными параллельно плоскости диска Галактики.

Другой пример — поляризация оптического излучения, возникающая в некоторых звездах или в их непосредственной окрестности. Так, небольшая линейная поляризация (вследствие рассеяния света) должна быть у излучения, исходящего из различных точек диска горячей звезды (В. В. Соболев, С. Чандрасекар), причем максимальная поляризация соответствует краю диска. Хотя поляризация интегрального излучения звезды при этом остается нулевой, остаточная поляризация будет наблюдаться при отклонении формы звезды от сферы, при затмении части излучения звезды более холодным компонентом (в затменно-переменных звездах, см. главу 7), при отражении света горячей звезды от атмосферы более холодного спутника или при рассеянии света звезды несферической газовой оболоч-

кой. Эти эффекты действительно наблюдаются в двойных звездных системах. Эллиптическая поляризация возникает в некоторых компактных звездах, обладающих особенно сильными магнитными полями, например, в магнитных белых карликах (полярах) и нейтронных звездах. Ее измерение используется для оценки напряженности магнитного поля в окрестности этих объектов.

Локальные магнитные поля на Солнце также оценивают, используя поляризацию излучения, но не в непрерывном спектре, а в компонентах некоторых абсорбционных линий, возникающих при расщеплении линии в магнитном поле (эффект Зеемана). Сильно поляризованным оказывается нетепловое излучение рентгеновских вспышек на Солнце, что связано с магнитными полями, в которых оно рождается. Поляризованным является также излучение внешней атмосферы Солнца — солнечной короны, но уже по иной причине. Вследствие высокой температуры корона представляет собой ионизованный газ, и линейная поляризация возникает в результате томсоновского рассеяния солнечного света электронами плазмы.

Измерения поляризации света планет, производимые как с Земли, так и с космических аппаратов, позволяют исследовать оптические свойства и химический состав атмосфер и аэрозолей, образующих облака, которые рассеивают падающий на них солнечный свет. Так по поляризационным исследованиям было найдено присутствие аэрозолей серной кислоты в облачном слое Венеры. Частичная поляризация происходит и при отражении света от твердой поверхности планет.

Солнечный свет, рассеиваемый веществом комет и межпланетной пылью (т. н. зодиакальный свет) также оказался частично поляризованным из-за наличия мелких вытянутых пылинок с упорядоченной ориентацией.

Изначально поляризованным является синхротронное излучение, рождаемое релятивистскими электронами в упорядоченных магнитных полях. Поляризационное измерение синхротронного радиоизлучения позволяет построить карты магнитных полей не только в нашей, но и в других галактиках.

Обычно синхротронное излучение наблюдается в радиодиапазоне, хотя в некоторых случаях с синхротронным механизмом связано и оптическое свечение, которое в этом случае имеет значительную степень поляризации. Такое свечение впервые было обнаружено в остатке сверхновой звезды — Крабовидной туманности, где его

линейная поляризация в среднем близка к 10%, а в отдельных областях значительно выше.

По вращению плоскости поляризации синхротронного радиоизлучения далеких радиоисточников оценивают напряженность межзвездного магнитного поля в среде, в которой распространяется радиоволна (эффект Фарадея, см. подробнее о мере вращения в разделе 4.10). Заметно поляризованным (иногда до нескольких десятков процентов) оказалось оптическое излучение активных ядер галактик, квазаров, лацертид (см. главу 11), что указывает на синхротронный механизм их излучения.

Поляризованным оказывается не только синхротронное излучение. Сильная круговая поляризация (почти до 100%) наблюдается, например, в дециметровых радиолиниях гидроксила OH (мазерное излучение, приходящее от некоторых компактных и холодных молекулярных облачков).

Таким образом, измерение поляризации света позволяет получить важную информацию как о свойствах источников и механизмах их излучения, так и о той среде, которая поглощает или рассеивает электромагнитные волны.