

среднеквадратическое значение  $\Delta\varphi_{\text{расс}}$ . Вблизи горизонта оно равно примерно  $1''$ . В диапазоне сантиметровых радиоволн эту величину надо примерно удвоить. Положив  $\Delta\varphi_{\text{расс}} \approx 2'' \approx 10^{-5}$  рад, найдем  $\Delta r \approx X_{\text{min}} \Delta\varphi_{\text{расс}} \approx 1,8$  км и получим среднее значение коэффициента усиления  $\langle K \rangle \approx 30$ . Переход от  $K$  к  $\langle K \rangle$  объясняется тем, что угол отклонения луча, а вместе с ним и  $\Delta r$  являются случайными величинами.

К сожалению, от усиления в десятки тысяч раз ничего не осталось, но и найденное значение  $\langle K \rangle$  все равно является завышенным. Дело в том, что наряду со сравнительно мелкомасштабными флуктуациями коэффициента преломления, которые вызывают рассеяние лучей, существуют более сильные изменения, нарушающие сферическую симметрию линзы. Воздух над океанами и над сушей, днем и ночью имеет разные метеорологические параметры, и вместе с ними меняется коэффициент преломления  $n(r, t)$ . За счет этих изменений угол оптической рефракции вблизи горизонта отличается в разных местах в течение года более чем на  $30''$ . Если принять эту величину за  $\Delta\varphi_{\text{расс}}$ , то  $\langle K \rangle$  снизится до 1.

Эта цифра окончательно губит все фантастические проекты, но не устраняет саму возможность наблюдения линзового эффекта. Взгляните снова на рисунок 4. Если бы не было преломления и рассеяния лучей в атмосфере, то точка  $X_{\text{min}}$  находилась бы в тени Земли, и ни один луч сюда бы не попал. В оптический прибор наблюдатель увидел бы только темный диск Земли. За счет линзового эффекта и рассеяния лучей вокруг темного диска возникает светлый ореол, который при  $\langle K \rangle \sim 1$  дает освещенность в точке  $X_{\text{min}}$  почти такую же, как и в исходном световом потоке. Для радиосвязи здесь открываются возможности передачи сигналов от одного космического корабля к другому, даже если радиолиния заэкранирована Землей, при условии, конечно, что корабли находятся достаточно далеко от Земли.

Линзовый эффект должен наблюдаться и в атмосферах других планет. В атмосфере Венеры это явление было замечено еще М.В. Ломоносовым в 1761 году во время прохождения планеты по диску Солнца. Он увидел светлый выступ вокруг темного пятна вблизи края солнечного диска и правильно объяснил его наличием у Венеры атмосферы.

### Как затмения космических радиоисточников Солнцем используются для изучения солнечной короны

Из Солнца непрерывно вытекают потоки плазмы, создавая так называемый солнечный ветер. Плазма заполняет окосолнечное и межпланетное пространства. Область ее влияния охватывает огромные расстояния, значительно превосходящие радиус орбиты Земли. Плазменная корона состоит в основном из протонов и электронов. Электронная концентрация по мере удаления от Солнца спадает сначала очень быстро: от  $10^8 \text{ см}^{-3}$  до  $10^4 \text{ см}^{-3}$  на расстоянии в несколько  $R_{\odot}$  (так обозначают радиус Солнца). Далее концентрация

убывает намного медленнее: обратно пропорционально квадрату расстояния, и на орбите Земли составляет примерно  $5 - 10 \text{ см}^{-3}$ .

На оптическое излучение межпланетная плазма практически не влияет, но в диапазоне радиоволн, особенно на метровых и более длинных волнах, это влияние становится весьма заметным. Оно проявляется в виде регулярной рефракции и рассеяния на случайных неоднородностях короны. Наблюдая затмения Солнцем радиоисточников, извлекают много полезных сведений о распределении электронной концентрации в межпланетной среде.

Метод затменных наблюдений, или метод радиопросвечивания, был предложен независимо советским астрономом В.В. Виткевичем и английским ученым А.Хьюишем. В качестве «передатчика» чаще всего используется один из наиболее мощных источников, а именно Крабовидная туманность, или ЗС-144 (название источника указывает, что он занесен под номером 144 в третий каталог Кембриджского университета). Затмения ЗС-144 происходят каждый год. Максимальная фаза приходится на 15 июня, когда Солнце проходит очень близко от Краба.

Первые наблюдения, проведенные в 1951–1953 годах, дали неожиданные результаты: было обнаружено существенное ослабление интенсивности излучения на таких больших расстояниях от Солнца, где поглощение в плазме заведомо отсутствует. Только в 1955 году удалось объяснить причину уменьшения интенсивности. Она заключается не в поглощении, а в том, что окосолнечная плазма имеет неоднородную структуру. Радиоволны рассеиваются на неоднородностях, что воспринимается как увеличение угловых размеров источника.

Далее, надо иметь в виду, что наблюдения проводились с помощью радиоинтерферометра, состоящего из далеко разнесенных друг от друга антенн. Такая система хорошо регистрирует только точечные источники, что позволяет подавить фоновые излучения Галактики и самого Солнца, которые являются в данном случае помехами. Если угловые размеры источника превышают ширину лепестковых диаграмм направленности интерферометра  $\varphi \sim \lambda/d$  (где  $d$  – расстояние между антеннами), то отклик интерферометра уменьшается. Поэтому увеличение угловых размеров источника за счет рассеяния до величины  $\sigma_{\varphi} \geq \lambda/d$  приводит к кажущемуся ослаблению интенсивности, хотя на самом деле она не меняется. Так была обнаружена неоднородная структура солнечной короны на очень больших расстояниях от Солнца. Раньше эти области короны были недоступны для изучения.

Конечной целью затменных экспериментов является определение плотности частиц (электронов)  $N$  в корональной плазме. Ее можно представить в виде суммы двух компонентов:  $N = \langle N \rangle + \delta N$ . Первое слагаемое  $\langle N \rangle$  представляет собой регулярную составляющую электронной плотности. Приблизительно можно считать, что величина  $\langle N \rangle$  зависит только от расстояния до Солнца и монотонно убывает с ростом  $r$  (сферически симметричная корона). Второе слагаемое  $\delta N$  – это