

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**О ПРОИСХОЖДЕНИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ****Я. П. Терлецкий**

Со времени открытия космических лучей в 1909 г. наиболее загадочным всегда представлялся сам факт их существования. После окончательного установления неземной природы космического излучения было сделано много попыток объяснения их зарождения в космосе. Однако почти все выдвигавшиеся гипотезы вскоре отвергались либо вследствие обнаруживавшейся надуманности и несостоятельности исходных теоретических предпосылок, либо в силу их противоречия известным экспериментальным фактам. В таком неудовлетворительном положении находился вопрос о происхождении космических лучей почти сорок лет. В результате у некоторых физиков даже сложилось предвзято-скептическое отношение к любым новым теориям происхождения космических лучей.

Однако в последние годы, после надёжных экспериментальных исследований, установивших основные свойства первичной компоненты космического излучения¹, а также после ряда астрофизических наблюдений электромагнитных свойств космических объектов, вопрос о происхождении космического излучения значительно прояснился. Сейчас уже можно считать твёрдо установленным, что развитая в последние годы «теория космических индукционных ускорителей»² позволяет объяснить основные свойства первичной компоненты.

В активе этой теории содержится не только объяснение ранее известных фактов, но и предсказание нового явления — присутствия ионов тяжёлых элементов в составе первичной компоненты. Теория предсказала³ это явление до его открытия в 1948 г.⁴

Согласно этой теории некоторые космические объекты индуцируют в окружающем пространстве весьма протяжённые электрические поля, ускоряющие окружающие ионы и электроны до энергий космических частиц. Эти космические объекты по аналогии с лабораторными ускорителями можно назвать «космическими индукционными ускорителями»*), откуда и происходит название теории.

*) В дальнейшем сокращено «КИУ».

Теория КИУ исходит из представления о существовании магнитных полей, связанных с космическими объектами (звёздами, облаками межзвёздной материи и т. п.), и об индуцировании протяжённых электрических полей при движении этих космических объектов или при изменении связанных с ними магнитных полей.

Эти исходные представления опираются на твёрдо установленные экспериментальные факты о магнетизме Земли, Солнца и звёзд. При этом особо важное значение для теории КИУ имело открытие в 1947 г. намагниченных звёзд⁵, поскольку это открытие подтвердило ранее выдвигавшиеся гипотетические предположения о распространённости намагниченных космических объектов во вселенной⁶.

Анализ процесса ускорения частиц в теории КИУ основывается на общих теоретических положениях о движении зарядов в электромагнитных полях, развитых С. А. Богуславским⁷.

Таким образом, теория КИУ опирается на твёрдо установленные экспериментальные факты и совершенно надёжные теоретические положения.

Теория КИУ может рассматриваться как глава космической электродинамики, т. е. теории электромагнитных процессов в космических объектах. Иначе говоря, устанавливается, что возникновение космических лучей полностью обуславливается электромагнитными процессами в космосе.

Несмотря, однако, на очевидные успехи теории КИУ, она не может ещё считаться окончательно завершённой. Действительно, хотя уже и выяснено с достаточной убедительностью, что космические частицы ускоряются некоторыми КИУ, однако до сих пор не ясно, какие же из известных КИУ играют главную роль в процессе генерирования космических лучей. Различные авторы на первый план выдвигают различные космические объекты в качестве главных КИУ. Например, одни авторы^{8,9} считают главным КИУ Солнце с окружающим его особым вида магнитным полем; другие¹⁰ — движущиеся намагниченные облака межзвёздной материи; третьи³ — намагниченные звёзды. В настоящее время автор склоняется к предположению, что главными КИУ являются звёзды с изменяющимися магнитными полями, как первоисточники космических частиц, и намагниченные облака межзвёздной материи, как КИУ, перераспределяющие энергию частиц по спектру (подробнее об этом см. ниже).

Здесь следует также заметить, что другие гипотезы происхождения космических лучей, кроме гипотез КИУ, в последние годы вообще физиками не рассматриваются seriously.

Прежде чем перейти к изложению основных положений теории КИУ, остановимся на главных экспериментальных фактах относительно первичной компоненты космических лучей.

1. ПРИРОДА ПЕРВИЧНОЙ КОМПОНЕНТЫ

Согласно последним надёжным экспериментам¹ поток космических частиц, влетающих из окружающего пространства в земную атмосферу, т. е. первичная компонента космических лучей, состоит в основном из протонов. Кроме протонов в состав первичной компоненты входят ионы других элементов приблизительно в той же пропорции, в которой они присутствуют на звёздах. Протоны и ионы первичной компоненты имеют очень большие энергии. Средняя энергия протонов около 10^{10} эв, а средние энергии ионов приблизительно в Z раз больше энергии протонов, где Z — атомный номер элемента. Энергетический спектр космических частиц, или функция распределения частиц по энергиям, сравнительно медленно убывает с ростом энергии. Можно считать, что для энергий, больших 10^9 эв, среднее число частиц $F(\mathcal{E}) d\mathcal{E}$ в заданном интервале энергий от \mathcal{E} до $\mathcal{E} + d\mathcal{E}$ выражается степенным законом:

$$F(\mathcal{E}) d\mathcal{E} \sim \mathcal{E}^{-\gamma} d\mathcal{E}, \quad (1)$$

где γ — положительное число, лежащее между 2 и 3. В соответствии с этим в первичной компоненте обнаруживаются частицы, имеющие очень большую энергию, порядка $10^{15} - 10^{17}$ эв, создающие в атмосфере так называемые сверхливни Оже.

Почти все наблюдения, включая самые последние¹, указывают на полную пространственную изотропность первичной компоненты. До сих пор не удалось выделить какое-либо преимущественное направление в галактике для космических частиц. Космические частицы приходят на Землю равномерным потоком со всех сторон.

Интенсивность потока космических частиц составляет примерно одну частицу на один квадратный сантиметр поверхности в минуту. С энергетической точки зрения, поскольку частицы имеют очень большую энергию, эта интенсивность довольно велика: она равна примерно интенсивности света, излучаемого всеми звёздами. Таким образом, если считать (как это предполагается в теории КИУ), что энергия космических частиц черпается из общего энергетического источника звёзд, то необходимо предположить, что в среднем каждая звезда расходует на излучение света примерно столько же энергии, сколько тратится ею на ускорение космических частиц.

Всякая теория происхождения космических лучей обязана объяснить перечисленные выше факты, а именно:

- 1) в основном протонный состав первичной компоненты;
- 2) наличие ионов тяжёлых элементов и их процентное содержание в первичной компоненте;
- 3) большую энергию космических частиц, в среднем, порядка 10^{10} эв и достигающую $10^{15} - 10^{17}$ эв для сверхливней Оже;

- 4) энергетический спектр первичной компоненты, выражаемый формулой (1);
- 5) пространственную изотропность первичной компоненты;
- 6) значительную интенсивность потока первичной компоненты.

2. РАЗЛИЧНЫЕ ГИПОТЕЗЫ ПРОИСХОЖДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Для объяснения происхождения первичной компоненты и её свойств было выдвинуто, в разное время, большое количество гипотез. Нет возможности сколько-нибудь подробно остановиться на содержании всех выдвигавшихся гипотез. Остановимся поэтому только на общей характеристике содержания этих гипотез, объединяя при этом однотипные гипотезы в отдельные группы.

В первую группу можно объединить гипотезы, допускающие, что космические лучи являются остатками от некоторого исходного дозвёздного состояния вселенной.

Обычно эти гипотезы органически связаны с теорией расширяющейся вселенной и исходят из допущения, что космические лучи зародились из начального, бесконечно плотного состояния вселенной, допускаемого этой теорией, и не поглотились межзвёздной материей до настоящего времени.

Эти гипотезы с кажущейся лёгкостью «объясняют» любые свойства первичной компоненты (например, пространственную изотропность), однако, по существу не вскрывают причин возникновения космических лучей, так как предлагают решение проблемы перенесением её в другую неизвестную область. С другой стороны, допуская даже произвольное дозвёздное состояние вселенной, весьма трудно согласовать подобные гипотезы с неизбежным непрерывным поглощением энергии космических частиц при их столкновениях с межзвёздной материей. Согласно оценке, приведённой Ферми¹⁰, среднее время полной потери энергии первичными протонами составляет $6 \cdot 10^7$ лет, т. е. значительно меньше времени существования Земли.

Ко второй группе можно отнести гипотезы, допускающие, что первичное космическое излучение зарождается при актах превращения вещества в излучение.

Согласно этим «аннигиляционным» гипотезам, для объяснения больших энергий космических частиц (порядка 10^{10} эв и выше) допускаются акты одновременного превращения в излучение целых ядер и даже кусочков вещества, содержащих большое количество атомов, поскольку полная энергия отдельного протона составляет всего лишь 10^9 эв. При этом предполагается, что подобные превращения происходят не внутри звёзд, а где-то в межзвёздном пространстве, так как жёсткая космическая радиация не может проникнуть даже через верхние слои звёздных атмосфер.

Подобные допущения не имеют сколько-нибудь удовлетворительного экспериментального или теоретического оправдания и могут быть приняты только после радикального изменения теории элементарных частиц, не диктуемого пока что какими-либо экспериментальными фактами.

«Аннигиляционные» гипотезы встречаются с непреодолимыми трудностями при попытке объяснения наличия тяжёлых ионов с энергиями 10^{10} эв в составе первичной компоненты. Если даже допустить, что некоторая совокупность атомов превратилась каким-то образом в излучение, то не представляется возможным объяснить, каким образом выделившаяся энергия может быть передана целому тяжёлому ядру без разрушения его на отдельные нуклеоны.

Таким образом, «аннигиляционные» гипотезы являются слишком искусственным построением, не оправдываемым теоретически или экспериментально.

Особую группу составляют гипотезы, связывающие зарождение космических лучей со вспышками новых и сверхновых звёзд.

Хотя эти гипотезы на первый взгляд легко объясняют изотропность первичной компоненты и её протонно-ионный состав, однако сам механизм ускорения частиц до энергий порядка 10^{10} эв и выше не разъясняется авторами этих гипотез. Здесь попросту молчаливо предполагается, что одно грандиозное явление — взрыв новой звезды, является причиной другого необычайного явления — ускорения частиц до сверхвысоких энергий.

Не исключено, что при взрывах новых и сверхновых звёзд действительно генерируются частицы с энергиями космических лучей путём каких-либо электромагнитных процессов, ускоряющих ионы; однако нет пока оснований считать эти гипотетические процессы основным источником космических лучей.

Остановимся, наконец, на гипотезах, исходящих из допущения ускорения зарядов электрическими полями.

В этих «ускорительных» гипотезах предполагается, что космические частицы суть ионы или электроны, ускоренные до энергий порядка 10^{10} эв и выше космическими электрическими полями.

Ускорительные гипотезы встречают серьёзные возражения, если они исходят из допущения космических электростатических полей потенциального характера и, следовательно, предполагают существование разности потенциалов порядка 10^{10} эв и выше между Землёй и другими космическими объектами или отдельными точками мирового пространства. Не говоря уже о теоретических затруднениях, мы не имеем каких-либо астрофизических данных, указывающих на возможность существования подобных потенциальных полей и неизбежно связанных с ними больших электрических зарядов в окружающей нас вселенной.

Подобные возражения отсутствуют для «ускорительных» гипотез, исходящих из допущения существования в космическом пространстве вихревых электрических полей, обусловленных электромагнитной индукцией. Вихревые электрические поля, могущие ускорять заряженные частицы до энергий порядка 10^8 эв, индуцируются общим магнитным полем Солнца⁶, а также возникающими магнитными полями солнечных пятен. После открытия намагниченных звёзд с магнитным полем, превышающим на поверхности звезды 1000 гаусс⁵, представление о существовании индуцируемых электрических полей, могущих ускорять заряды до энергий 10^{10} эв и выше, получило надёжную экспериментальную основу. Таким образом, в мировом пространстве существуют реальные объекты, являющиеся КИУ, создающими потоки зарядов с энергиями космических частиц. Следовательно, имеются реальные основания полагать, что вся первичная компонента генерируется определённого типа КИУ. В работе³ так же, как и в работах⁶, КИУ, генерирующие первичную компоненту, отождествлялись с намагниченными звёздами, у которых направление магнитного момента наклонено к оси вращения. В этой работе было показано, что подобная простейшая модель позволяет объяснить: большую энергию космических частиц (10^{10} эв и выше), в основном протонный состав первичной компоненты и наличие в ней тяжёлых ионов. Таким образом, было показано, что некоторые основные особенности первичной компоненты, не объясняемые без искусственных допущений другими гипотезами, являются прямым следствием простейшего варианта теории КИУ.

Веские аргументы в пользу развитой теории были получены также в результате исследования состава ионной составляющей первичной компоненты, предсказанной теорией. Эксперименты показали¹¹, что кинетическая энергия ядер, присутствующих в первичной компоненте, пропорциональна их заряду Z , а также, что зависимость процентного содержания ионной составляющей от Z совпадает с относительной распространённостью элементов во Вселенной, полученной по астрофизическим данным. Первый факт непосредственно следует, а второй хорошо качественно согласуется с представлением, что частицы, образующие первичную компоненту, вырываются электрическими полями из звёздных атмосфер.

Приведённые существенные аргументы в пользу теории КИУ подтверждают правильность её основной идеи, но не являются ещё решающими для принятия простейшего её варианта.

Этот вариант теории хорошо объясняет только некоторые основные свойства первичной компоненты — её состав и средние энергии космических частиц. Для объяснения большой интенсивности первичной компоненты необходимо либо допущение о солнечном происхождении космических лучей^{8,9} при наличии дополнительного магнитного поля, удерживающего частицы внутри сол-

нечной системы, либо предположение, что энергия электромагнитных полей, ускоряющих космические частицы, черпается из ядерных процессов, происходящих внутри звёзд. Как будет показано ниже, гипотеза о солнечном происхождении космических лучей не выдерживает серьёзной критики. Следовательно, из возможных типов КИУ надо выбирать такие, которые создают переменные магнитные поля за счёт внутризвёздных процессов.

Ниже будут рассмотрены некоторые возможные типы КИУ, среди которых можно указать некоторые КИУ, отвечающие вышеуказанным требованиям.

Далее, теория должна объяснить изотропность первичной компоненты и специфический степенной закон распределения частиц по энергиям (формула (1)). Оба эти факта удовлетворительно объясняются при допущении, что космические частицы, проходя через межзвёздное пространство, рассеиваются движущимися намагниченными облаками межзвёздной материи¹⁰.

Таким образом из всех рассмотренных гипотез только теория КИУ даёт удовлетворительное объяснение всех основных особенностей первичной компоненты.

Поскольку теория КИУ основывается на электромагнитных свойствах космических объектов и теории движения зарядов в космических электромагнитных полях, мы сначала остановимся на обзоре космических электромагнитных полей и вопросов космической электроники.

3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В последние годы было установлено, что намагниченность космических объектов весьма распространённое явление во вселенной. Существование общего магнитного поля установлено для Земли, Солнца и некоторых звёзд. Сильные магнитные поля (до 5000 эрстед) связаны с солнечными пятнами. Вполне допустимо также существование «звёздных пятен», подобных солнечным пятнам. У некоторых переменных звёзд недавно было открыто существование переменного магнитного поля очень большой амплитуды¹³.

При движении вышеуказанных намагниченных объектов или при изменении связанных с ними магнитных полей должны возникать электрические поля, вызываемые электромагнитной индукцией.

Электромагнитные поля, создаваемые Землёй, Солнцем, звёздами, а также солнечными и звёздными пятнами, приблизительно могут рассматриваться как поля, создаваемые отдельными магнитными диполями или совокупностями таких диполей. В общем случае магнитные моменты μ таких диполей изменяются как по абсолютной величине (возникающие и исчезающие солнечные пятна, звёзды с переменным магнитным моментом), так и по направлению (вращение Земли, Солнца и звёзд). Вследствие малости

периодов изменения электромагнитное поле рассматриваемых диполей может рассчитываться в квазистационарном приближении. Таким образом, в общем случае можно полагать, что в пространстве, окружающем космический магнитный диполь, имеющий магнитный момент μ и вращающийся с угловой скоростью ω в инерциональной системе отсчёта, связанной с центром диполя, существует электромагнитное поле:

$$\mathbf{H} = -\operatorname{grad} \frac{(\mu \mathbf{r})}{r^3} = -\frac{3 \mathbf{r} (\mu \mathbf{r}) - \mu r^2}{r^5}, \quad (2)$$

$$\mathbf{E} = \frac{1}{cr^3} [\mathbf{r} \dot{\mu}] - \operatorname{grad} \varphi, \quad (3)$$

где \mathbf{r} — радиус-вектор, проведённый из центра диполя, c — скорость света,

$$\dot{\mu} = \frac{d\mu}{dt} = \frac{\mu}{r} \frac{dr}{dt} + [\omega \mu], \quad (4)$$

φ — потенциал электрического поля, создаваемого униполярной индукцией.

Если рассматривать магнитный диполь как однородно намагниченный шар радиуса r_0 , вращающийся вокруг произвольной оси с угловой скоростью ω , то строгий расчёт¹³ даёт:

$$\varphi = \frac{r_0^2}{5c} (\omega \mathbf{H}) \quad (5)$$

для области $r > r_0$.

Таким образом в общем случае электрическое поле вращающегося космического диполя выражается как

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 = \frac{1}{cr^3} [\mathbf{r} \dot{\mu}] \frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dt} + \frac{1}{cr^3} [\mathbf{r} [\omega \mu]] - \\ - \operatorname{grad} \left\{ \left(\frac{r_0^2}{5c} \right) \frac{3 (\mathbf{r} \omega) (\mathbf{r} \mu) - (\mu \omega) r^2}{r^5} \right\}. \quad (6)$$

Первый член этого выражения (\mathbf{E}_1) обусловлен изменением магнитного момента по абсолютной величине, второй и третий члены обусловлены вращением диполя. Поле \mathbf{E}_2 , выражаемое вторым членом, вызывается вращением компоненты магнитного момента, перпендикулярной к оси вращения, и отлично от нуля только в случае несовпадения направления магнитного момента и оси вращения. Поле \mathbf{E}_3 , выражаемое третьим членом, обусловлено униполярной индукцией и может быть представлено как поле электрического квадрупольного поля.

Заметим, что поля \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 , обусловленные обычной электромагнитной индукцией, убывают с расстоянием от центра диполя

как $\frac{1}{r^2}$, в то время как поле E_z униполярной индукции убывает как $\frac{1}{r^4}$.

Самые общие теоретические соображения приводят к заключению, что магнитные поля должны существовать также у других космических объектов. Поскольку на звёздах и в межзвёздном пространстве вещество сильно ионизовано, постольку оно должно обладать большой электропроводностью. Но в больших объёмах очень электропроводного вещества затухание электрических токов весьма замедленно. Так, например, для шара радиуса R , имеющего электропроводность λ , время релаксации τ выражается как:

$$\tau \approx \frac{4 \lambda R^2}{\pi c^2} \quad (7)$$

Но при больших временах релаксации токи и связанные с ними магнитные поля могут рассматриваться как «замороженные» в веществе. Следовательно, перемещаясь, вещество будет переносить и связанное с ним магнитное поле.

Очевидно, вследствие вышесказанного, вещество, выбрасываемое намагниченными звёздами в пространство, будет долгое время оставаться намагниченным. Таким образом, в пространстве, окружающем некоторые звёзды, будут существовать магнитные поля, связанные с облаками ионизованного газа.

Допустимо полагать, что вообще облака межзвёздной материи, ионизованные вследствие излучения звёзд, несут на себе «замороженные» магнитные поля. При движении таких облаков будут индуцироваться электрические поля, способные ускорять электрические заряды.

Характерной особенностью вышеуказанных космических электромагнитных полей является их большая протяжённость и почти однородность в относительно больших объёмах.

4. КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Для исследования движения заряда в электромагнитном поле космического объекта мы будем исходить из релятивистских уравнений движения, пренебрегая реакцией излучения. Таким образом, уравнения движения частицы с зарядом e и массой покоя m в электромагнитном поле \mathbf{E} и \mathbf{H} запишем в виде:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{m\mathbf{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) = e \left\{ \mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{vH}] \right\}, \quad (8)$$

где \mathbf{v} — скорость частицы, c — скорость света.

Периоды изменения электромагнитных полей космических объектов измеряются сутками и, самое меньшее, — часами. Рас-

смаатриваемые же нами частицы (электроны, протоны, ионы) могут быть ускорены до предельной скорости за очень короткие промежутки времени, так как имеют весьма малую массу. Следовательно, в уравнениях движения (8) можно пренебречь зависимостью E и H от времени и считать их зависящими только от координат. Этим упрощением мы в дальнейшем будем пользоваться повсюду, т. е. будем представлять себе электромагнитное поле как бы застывшим.

Точное решение уравнений (8) в случае электромагнитного поля вида (2), (3) не представляется возможным, поскольку массу частицы при наличии электрического поля нельзя считать постоянной, и поэтому задача становится несравненно сложнее соответствующей задачи Штёрмера для постоянного неподвижного магнитного диполя. Последняя задача, как известно, в общем случае решается только численным интегрированием. Аналогичные затруднения должны возникнуть также при попытке точного решения уравнений (8) в случае полей, создаваемых облаками межзвёздной материи. Для исследования вопроса о возможности ускорения зарядов электромагнитными полями космических объектов нет необходимости, однако, обязательно искать точные решения уравнений движения. Для этой цели с успехом можно воспользоваться приближёнными решениями, возможными вследствие большой протяжённости электромагнитных полей космических объектов⁶.

В пространственных облаках, линейные размеры l которых малы по сравнению с размерами намагниченных объектов, электромагнитное поле может рассматриваться как практически однородное. Общее решение уравнений (8) в произвольном однородном электромагнитном поле было исчерпывающе исследовано С. А. Богуславским⁷. В случае $E < H$ это решение может быть представлено как движение заряда по растягивающейся спирали, навивающейся на эллиптический цилиндр, с ускорением вдоль оси цилиндра, причём весь цилиндр движется с постоянной скоростью u в направлении, перпендикулярном E и H , а ось цилиндра лежит в плоскости, параллельной E и H , между этими векторами.

Вследствие квазистационарного характера космических электромагнитных полей в большинстве случаев можно полагать:

$$E \ll H. \quad (9)$$

В этом случае описанное решение несколько упрощается и может быть изображено как движение заряда по растягивающейся спирали, навивающейся на цилиндр с осью, параллельной H и имеющей радиус

$$\rho = \frac{cp_n}{eH}, \quad (10)$$

где p_n — составляющая импульса частицы, перпендикулярная \mathbf{H} . Весь цилиндр движется со скоростью:

$$u = c \frac{|\mathbf{E}\mathbf{H}|}{H^2}. \quad (11)$$

Спираль растягивается вследствие ускорения заряда вдоль оси цилиндра под действием составляющей электрического поля, параллельной \mathbf{H} . Если электромагнитное поле достаточно протяжённо, и размеры l областей почти однородных участков поля достаточно велики так, что можно считать

$$\rho \ll l, \quad (12)$$

то заряды, ускоренные уже до релятивистских скоростей, можно приближённо рассматривать как движущиеся по спиральным траекториям, навивающимся на магнитные силовые линии поля. Смещением траектории со скоростью u можно в этом случае пренебречь, так как согласно (9) и (11), $u \ll c$. Этой картиной движения релятивистских частиц можно пользоваться в любых неоднородных полях при соблюдении условия (12) вдоль магнитных силовых линий.

При движении вдоль магнитной силовой линии заряд будет попадать в участки с различными значениями напряжённости магнитного поля, вследствие чего радиус спирали также будет изменяться. Изменение радиуса спирали можно оценить, исходя из предположения сохранения адиабатического инварианта при изменении магнитного поля. Согласно этому предположению, легко получить соотношение

$$\rho \sqrt{H} = \text{const}. \quad (13)$$

Условие (12) может быть сформулировано математически более определённо. Можно считать, что движение заряда в неоднородном магнитном поле имеет спиралевидный характер, если радиус кривизны ρ , определяемый соотношением (10), относительно мало изменяется при мысленном обращении частицы по окружности радиуса ρ . Отсюда вместо (12) получаем условие вида:

$$p_n \ll p_{\text{крит}} = \frac{e}{c} \frac{H^2}{|\nabla H|}. \quad (14)$$

В случае не строго перпендикулярных полей \mathbf{E} и \mathbf{H} , что имеет место в большинстве случаев вследствие большой протяжённости полей, частицы на относительно малых пространственных интервалах приобретают релятивистскую энергию, т. е. скорость, близкую к c . Полагая частицы уже имеющими скорость, близкую к c , можно считать, что при $p_n \ll p_{\text{крит}}$ траектория заряда имеет вид растягивающейся спирали, навивающейся на магнитную силовую линию. Если же $p_n \gg p_{\text{крит}}$, то траектория приближается к прямолинейной.

Применяя эти рассуждения к движению заряда в поле изменяющегося магнитного диполя (2), (3), мы можем приближённо рассматривать траекторию частицы как спираль, навивающуюся на магнитную силовую линию, для областей, близких к центру диполя, где $p_n \ll p_{\text{крит}}$ и полагать, что траектория уходит в бесконечность, если частица попадёт в область, где $p_n > p_{\text{крит}}$. Следовательно, условие

$$p_n > p_{\text{крит}} \quad (15)$$

грубо может рассматриваться как критерий отрыва частицы от поля магнитного диполя.

В случаях, когда $E > H$, описанная картина движения зарядов уже не верна. Такие случаи могут иметь место, когда переменное магнитное поле проходит через нулевое значение при изменении знака. В этих случаях заряды будут относительно слабо отклоняться магнитным полем и двигаться с ускорением по траекториям, имеющим малый радиус кривизны. При этом движение зарядов в достаточно однородных участках поля при достижении релятивистских энергий будет приближаться к движению вдоль электрических силовых линий.

Особый характер имеет ускорение зарядов при столкновении с намагниченными облаками межзвёздной материи. В этом случае заряды, попадая в движущееся облако, выталкиваются из него, приобретая такую энергию, какую приобрели бы частицы, сталкивающиеся с бесконечно тяжёлым упругим телом. К такому заключению легко прийти, рассматривая столкновение заряда с облаком в системе координат, движущейся вместе с последним. В этой системе отсутствует электрическое поле, и, следовательно, после столкновения изменяется только направление движения частицы, но не её энергия.

5. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ, ГЕНЕРИРУЮЩИХ ПЕРВИЧНУЮ КОМПОНЕНТУ

В последнее время в ряде работ, развивающих теорию КИУ 8, 9, 10, обсуждаются две противоположные точки зрения на вопрос о пространственном расположении источников, генерирующих первичную космическую радиацию, проникающую в земную атмосферу. Согласно первой точке зрения, космические частицы прилетают на Землю из межзвёздного пространства, и, следовательно, основные источники космической радиации расположены вне пределов солнечной системы. Согласно же второй точке зрения, подавляющая доля частиц первичной компоненты генерируется вблизи Солнца и удерживается некоторым магнитным полем внутри окружающей области, сравнимой по величине с размерами солнечной системы.

Основным аргументом в пользу представления о расположении космических ускорителей вне пределов солнечной системы всегда был известный факт изотропности первичной компоненты, а также отсутствие резко выраженной зависимости интенсивности космической радиации от расположения Солнца и солнечной активности. Отмечаемая¹⁴ слабая зависимость общей интенсивности космической радиации от деятельности Солнца ещё не может быть существенным аргументом в пользу представления о зарождении всей первичной компоненты внутри солнечной системы. Этот факт с большим основанием может рассматриваться как подтверждающий, что Солнце является космическим индукционным ускорителем, генерирующим, однако, только мягкую часть первичной компоненты (частицы с энергиями 10^8 эв, согласно теории⁶, и с энергиями 10^9 эв, согласно теории, учитывающей униполярную индукцию¹⁵), в то время как главная, более жёсткая часть, приходит из областей, лежащих вне пределов солнечной системы.

Основное возражение, выдвигаемое против первой точки зрения, опирается на факт очень большой интенсивности первичной компоненты. Как указывают Рихтмайер и Теллер⁸, для объяснения наблюдающейся интенсивности первичной компоненты, при допущении, что космические лучи испускаются звёздами, пришлось бы предполагать, что более 10^{-4} всей энергии, излучаемой звёздами, испускается ими в виде космической радиации, а не в виде света. Это допущение указанные авторы считают невероятным и выбирают вторую точку зрения, полагая, что вся первичная компонента зарождается вблизи Солнца и космические заряженные частицы, прежде чем попасть на Землю, в течение огромных промежутков времени странствуют в пределах солнечной системы, удерживаясь некоторым магнитным полем. Для обоснования последнего предложения его авторам приходится допускать существование в пределах солнечной системы некоторого дополнительного поля порядка 10^{-5} гаусс, не обусловленного магнитным моментом Солнца. Следует, однако, заметить, что последнее допущение не спасает рассматриваемую гипотезу. Дело в том, что магнитные силовые линии любого допустимого поля будут либо упираться своими концами в поверхность Солнца, либо уходить в бесконечность. Случай замкнутых силовых линий возможен лишь как исключение при маловероятном допущении существования стабильных замкнутых токов в межпланетном пространстве. Следовательно, согласно общей картине движения зарядов в космических полях (см. раздел 4), частицы, вышедшие с поверхности Солнца, будут неминуемо и очень быстро на него возвращаться или уходить в бесконечность. Таким образом, ни о каких длительных блужданиях зарядов в пределах солнечной системы не может быть речи, за исключением, быть может, некоторых исключительных траекторий.

Гипотезу Рихтмайера и Теллера конкретизирует в своих работах Алфен⁹. Он предполагает, что находящиеся вокруг Солнца ионы движутся в магнитном поле Солнца по почти замкнутым траекториям и многократно ускоряются, проходя через выбрасываемые Солнцем намагниченные потоки ионизованной материи. Однако магнитное поле Солнца не в состоянии удержать движущиеся заряды вблизи Солнца сколько-нибудь продолжительное время, и поэтому Алфен допускает, что солнечная система находится в магнитном поле, «замороженном» в гигантском облаке ионизованной материи. Чтобы объяснить многократные возвраты частиц в солнечную систему, Алфен допускает, что силовые линии «замороженного» поля, пронизывающие солнечную систему, замыкаются в виде гигантских колец, имеющих размеры, намного превосходящие диаметр солнечной системы.

Искусственность гипотезы Алфена очевидна. Предлагаемая Алфеном конфигурация «замороженного» поля может осуществляться только при счастливом стечении обстоятельств, на короткое время. Движение солнечной системы относительно облака с «замороженным» полем неминуемо нарушит эту благоприятную ситуацию.

Все дискуссионные гипотезы солнечного происхождения первичной компоненты могут, очевидно, исходить лишь из представления об ускорении зарядов с поверхности Солнца полями типа (6) и движении их на Землю приблизительно вдоль магнитных силовых линий. При этом, однако, не видно механизмов, которые обеспечивали бы почти идеальную изотропность первичной компоненты и ускоряли бы частицы до энергий, значительно больших 10^9 эв. Итак, только представление о распределении основных источников первичной компоненты вне солнечной системы остаётся пока что удовлетворяющим простейшим следствиям космической электроники. Возражения, связанные с фактом большой интенсивности первичной компоненты, будут устранены, если указать распространённый во вселенной тип КИУ, способного генерировать мощные потоки быстрых заряженных частиц.

Перейдём к рассмотрению других, более продуманных типов КИУ.

6. УСКОРЕНИЕ ЗАРЯДОВ В ПОЛЕ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЗВЁЗД

Если считать, что магнитный момент вращающейся звезды приблизительно совпадает по направлению с осью вращения, то вследствие униполярной индукции, согласно формулам (5) — (9), в пространстве, окружающем звезду, должно существовать электрическое поле с потенциалом

$$\varphi = \frac{\omega \mu r_0^2}{5c} \frac{3 \sin \vartheta - 1}{r^3}, \quad (16)$$

где ϑ — угол между \mathbf{r} и плоскостью экватора. Согласно этому выражению, потенциал обоих полюсов звезды равен $+2\omega\mu/5cr_0$, а потенциал экватора равен $-\omega\mu/5cr_0$. Знак потенциалов изменится на обратный, если μ и ω антипараллельны.

На возможность ускорения зарядов полем униполярной индукции Солнца и звёзд указывал ряд авторов. Остановимся только на наиболее последовательной и завершённой теории¹⁵. Согласно¹⁵, заряды, вышедшие с поверхности звезды вдали от полюсов, будут двигаться приблизительно вдоль магнитных силовых линий (согласно разделу 4), сначала ускоряясь, а затем вновь замедляясь и в конце концов возвращаясь на поверхность звезды. Только заряды, вырвавшиеся вблизи полюсов, согласно условию (15), могут окончательно покинуть звезду. Поскольку оба полюса звезды заряжены одноимённо, а вблизи экватора заряды не могут отрываться от звезды, будучи возвращаемы магнитным полем, то звезда в целом должна заряжаться вследствие потери зарядов одного знака, вырывающихся с полюсов. Таким образом, первоначально незаряженная звезда должна с течением времени приобрести отрицательный заряд, если её μ и ω параллельны (в случае антипараллельных μ и ω знаки всех зарядов и потенциалов должны быть заменены на обратные). Очевидно, в рассматриваемом мысленно процессе звезда может заряжаться до потенциала, близкого к $-2\omega\mu/5cr_0$, после чего от звезды начнут отрываться также отрицательные заряды, вырывающиеся с небольших кольцевых площадок, окружающих полюса звезды. В результате может установиться равновесие, когда от звезды, вблизи её полюсов, будет отрываться одинаковое количество как отрицательных, так и положительных зарядов, уходящих в мировое пространство. При этом звезда будет иметь заряд, близкий к

$$Q = -\frac{2\omega\mu}{5c}. \quad (17)$$

Проведённые расчёты показали, что часть общего потока зарядов, испускаемых звездой, должна содержать частицы с весьма большими энергиями (около 10^9 эв для Солнца и 10^{13} эв для звезды 78 Девы), определяемыми разностью потенциалов между полюсами и экватором. Совершенно очевидно, что звезда будет испускать также ионы тяжёлых элементов, если таковые присутствуют в её атмосфере.

Энергия частиц, испускаемых рассматриваемой звездой, сообщается им за счёт работы сторонних электродвижущих сил униполярной индукции, действующих внутри звезды, т. е. в конечном итоге за счёт энергии вращения звезды.

Итак, звёзды с параллельными или антипараллельными ω и μ , действуя подобно униполярной машине, должны генерировать потоки зарядов с энергиями космических частиц.

Если ось магнитного диполя звезды наклонена к её оси вращения под углом θ , как это имеет место в случае Земли или Солнца, то в пространстве, окружающем звезду, индуцируется вихревое электрическое поле E_2 наряду с полем униполярной индукции E_3 (см. формулу (6)).

Если поле E_3 и поле, создаваемое общим зарядом звезды, не препятствуют отрыву частицы с зарядом e от заданной точки на поверхности звезды (точки, не лежащей вблизи полюса), то частица начнёт двигаться с ускорением, навиваясь на магнитную силовую линию, и вновь попадает на поверхность звезды в некоторую противоположную точку. Приобретаемая при этом энергия уже не будет равна нулю, как в предыдущем случае, когда $\theta = 0$, а выражается в виде:

$$\mathcal{E} = \frac{8}{5} \frac{e}{c} \frac{\omega \mu}{r_0} \sin \theta \cos \psi_0 \sin 2\vartheta_0, \quad (18)$$

где ϑ_0 — угол магнитной широты, отсчитываемый от магнитного экватора, ψ_0 — угол магнитной долготы, отсчитываемый от меридиана, проходящего через магнитные и географические полюса, для точки на поверхности звезды, из которой вырвался рассматриваемый заряд. Заряды, выходящие с поверхности звезды вблизи магнитных полюсов, так же как и в предыдущем случае (при $\theta = 0$), вследствие удаления магнитных силовых линий на большее расстояние от звезды, в силу условия (15), смогут отрываться от звезды и уходить в мировое пространство.

Описанный индукционный эффект ($\theta \neq 0$) существенно отличается от чистого эффекта униполярной индукции ($\theta = 0$) тем, что в случае ($\theta \neq 0$) энергию будут приобретать как заряды, вышедшие с поверхности звезды, так и заряды, попавшие в поле звезды из бесконечности и вновь ушедшие в бесконечность, поскольку поле E_2 — вихревое; в случае же $\theta = 0$ заряды, движущиеся из бесконечности в бесконечность, не будут приобретать энергию вследствие потенциального характера поля E_3 вне тела звезды. Таким образом, индукционный эффект даёт больше возможностей ускорения зарядов, чем чистый эффект униполярной индукции. В частности, заряд, пролетевший на расстоянии L от звезды с $\theta \neq 0$, может изменить свою энергию на величину порядка:

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{e \omega \mu}{c L} \sin \theta. \quad (19)$$

Так же как и при $\theta = 0$, энергия ускоряемых индукционным эффектом частиц будет черпаться из общей энергии вращения звезды.

7. СОЛНЕЧНЫЕ И ЗВЁЗДНЫЕ ПЯТНА КАК ИНДУКЦИОННЫЕ УСКОРИТЕЛИ

На возможность ускорения зарядов в поле солнечных и звёздных пятен впервые обратил внимание Свани¹⁶. Однако он не дал правильной картины ускорения зарядов. Мы рассмотрим этот вопрос с точки зрения теории движения зарядов в космических полях, изложенной выше.

Если отвлечься от вращения солнечных (или звёздных) пятен вместе с поверхностью Солнца (или звезды), то электрическое поле вблизи пятна или пары пятен, возникающее при их появлении или уничтожении, будет выражаться полем E_1 , согласно формуле (6). Поскольку E_1 перпендикулярно H , определяемому формулой (2), то, согласно приближённой картине движения зарядов (раздел 4), мы не должны ожидать существенного их ускорения полем E_1 . Однако, если учесть, что вблизи возникающего пятна или дипольной пары пятен уже присутствует поле других пятен или просто общее поле Солнца (или звезды), то электрическое поле не будет строго перпендикулярно магнитному и, следовательно, будет действовать рассмотренный выше механизм ускорения зарядов. Очевидно, ускорение и отрыв зарядов от пятен будут иметь место главным образом в момент их возникновения, когда магнитное поле возникающего пятна ещё мало, по сравнению с уже существующими полями, а электрическое поле достаточно велико благодаря быстрому изменению μ . Энергию, приобретаемую зарядом, ускоряющимся в поле возникающей пары пятен, грубо можно оценить по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{e}{c} \frac{\dot{\mu}}{r_1} \approx \frac{e}{2c} \frac{a^3}{r_1} \dot{H}_m, \quad (20)$$

где r_1 — расстояние от центра магнитного диполя до ближайших участков траектории заряда, a — расстояние между центрами пары полярных пятен (или длина магнитного диполя), \dot{H}_m — максимальное значение магнитного поля на поверхности пятен.

До наибольших энергий будут, очевидно, ускоряться заряды, первоначально расположенные вблизи пятен, т. е. в случае $r_1 \approx a$. Однако выходящие из этой области магнитные силовые линии, как правило, не будут удаляться на значительные расстояния от Солнца и, следовательно, ускоренные частицы в основном будут возвращаться на его поверхность. Для зарядов, первоначально расположенных в удалённых от возникающих пятен участках солнечной поверхности, например вблизи полюсов, условия отрыва от Солнца будут более благоприятны. Однако максимальная энергия ускоряемых частиц соответственно уменьшится в $\frac{a}{r_1}$ раз. Для заряда, выходящего вблизи полюса Солнца, грубая оценка по формуле (20) даёт энергию порядка 10^7 эв.

Таким образом, Солнце в периоды возникновения солнечных пятен должно испускать потоки быстрых заряженных частиц, могущие достигать Земли. Возможно, что магнитные бури и полярные сияния обусловлены именно этими потоками.

Учитывая, что на звёздах магнитные поля могут значительно превышать магнитное поле солнечных пятен и допуская для них более интенсивную пятнообразовательную деятельность, можно предполагать, что описанный механизм генерирования потоков быстрых частиц является ответственным за создание части первичной компоненты космических лучей.

8. ЗВЁЗДЫ С ПЕРЕМЕННЫМИ МАГНИТНЫМИ МОМЕНТАМИ КАК КОСМИЧЕСКИЕ ИНДУКЦИОННЫЕ УСКОРИТЕЛИ

Исследования магнитного поля звезды BD-18° 3789 показали¹², что магнитное поле на её поверхности периодически изменяется от +7800 гаусс до —6500 гаусс с периодом в 9,295 дней. Иначе говоря, эта звезда имеет переменный магнитный момент. Следовательно, так же, как и в случае возникающих солнечных пятен, вокруг такой звезды индуцируется вихревое электрическое поле, могущее ускорять заряженные частицы.

Если считать, что поле звезды является полем переменного магнитного момента, то вследствие перпендикулярности \mathbf{E} и \mathbf{H} мы не можем ожидать значительного ускорения зарядов в те моменты времени, когда $E \ll H$ (так же, как в случае солнечных пятен). Однако в моменты, когда μ проходит через нуль, H также равно нулю, в то время как E имеет максимальное значение (см. формулы (2), (6)). Следовательно, в течение небольших отрезков времени в окрестности звезды $E > H$. При выполнении этого условия, как уже указывалось в разделе 4, заряды будут слабо отклоняться магнитным полем и двигаться с ускорением по траекториям, имеющим малый радиус кривизны и выходящим за пределы звезды. Считая траекторию приблизительно прямолинейной, а μ изменяющимся по закону синуса, можно оценить энергию, сообщаемую ускоряемому заряду, согласно (20), по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{\pi e}{c} \frac{r_0^2 H_m}{T}, \quad (21)$$

где r_0 — радиус звезды, H_m и T — максимальное значение магнитного поля и период его изменения. Согласно этой формуле, для звезды BD-18° 3789 получаем $\mathcal{E} = 7 \cdot 10^{12}$ эв, полагая $r_0 = 1,6 \cdot 10^{11}$ см, $T = 8 \cdot 10^5$ сек., $H_m = 7000$ гаусс, согласно¹². При рассматриваемом механизме ускорения интенсивность потоков отрывающихся от звезды частиц не ограничивается, очевидно, условиями отрыва от магнитного поля звезды. Эта интенсивность может быть очень большой.

Если предположить, что магнитное поле переменных звёзд создаётся не одним единственным магнитным диполем, а имеет более сложную структуру, так что **Е** и **Н** вообще не перпендикулярны, то ускорение зарядов до энергий указанного порядка допустимо и в другие периоды времени.

Таким образом, переменные магнитные звёзды рассмотренного типа также являются КИУ, могущими генерировать космические лучи.

Существенное отличие ускорителей, рассмотренных в разделах 7 и 8, от ускорителей, рассмотренных в разделе 6, состоит в том, что во втором случае энергия ускоренных частиц черпается из механической энергии вращения звезды, в то время как в первом случае эта энергия черпается из источника, создающего изменяющиеся магнитные поля, т. е. в конечном счёте за счёт энергии, создаваемой ядерными реакциями, поддерживающими активность звёзд. Следовательно, переменные магнитные звёзды и звёзды с интенсивной пятнообразовательной деятельностью могут быть наиболее мощными и почти неисчерпываемыми источниками космической радиации.

Если допустить, что большинство переменных звёзд обладает переменными магнитными полями, или предположить, что звёзды с интенсивной пятнообразовательной деятельностью весьма распространены во вселенной, то эти звёзды вполне можно рассматривать как основные первоисточники космических лучей.

Подобная гипотеза позволяет объяснить не только состав и энергию частиц первичной компоненты, но и большую интенсивность потока космических лучей. Однако наблюдаемый энергетический спектр космических частиц и изотропность первичной компоненты не вытекают ещё из этой гипотезы.

9. УСКОРЕНИЕ ЗАРЯДОВ ОБЛАКАМИ МЕЖЗВЁЗДНОЙ МАТЕРИИ

Энергетический спектр первичной компоненты (формула (1)) и её изотропность наилучшим образом объясняются, исходя из выдвинутого Ферми¹⁰ *) допущения, что испущенные первоисточниками космические частицы дополнительно ускоряются при многократных столкновениях с хаотически движущимися намагниченными облаками разрежённой межзвёздной материи. Полагая среднюю скорость облаков около 30 км/сек и, соответственно, считая, что при каждом столкновении протон приобретает энергию порядка 10 эв при допущении возможности очень большого числа столкновений, Ферми вывел закон распределения энергии протонов, подобный

*) Подробное изложение теории Ферми см. также в статье В. С. Вавилова¹⁷.

экспериментально наблюдаемому закону распределения для первичной компоненты (1). Ферми считает предложенный механизм основным в образовании первичной компоненты. Однако последнее предположение ошибочно, как это можно видеть из подсчётов самого же Ферми. Согласно этим подсчётам соударения с облаками могут ускорять только достаточно быстрые частицы, поскольку при малых скоростях потери на ионизацию межзвёздного газа превышают приращение энергии вследствие столкновений с движущимися облаками. Для каждого сорта ионов можно указать минимальную энергию частицы, ниже которой соударения с облаками не приводят к ускорению. Как показали подсчёты Ферми, эта пороговая энергия резко возрастает с ростом атомного номера частицы. Так, например, для протонов эта энергия составляет около $2 \cdot 10^8$ эв, для α -частиц около 10^9 эв, для ядра кислорода около $2 \cdot 10^{10}$ эв, для ядра железа порог составляет $3 \cdot 10^{11}$ эв. Следовательно, механизм ускорения путём столкновения с облаками не может быть основным для тяжёлых ионов, так как требуется, чтобы их начальная энергия была выше средней энергии космических частиц. Этот механизм мог бы быть принят основным только в том случае, если бы первичная компонента состояла только из протонов и в ней отсутствовали бы тяжёлые ионы. Предположение же что протоны и ионы ускоряются разными механизмами, крайне искусственно. Таким образом, предположение Ферми об основном охарактере механизма столкновений с облаками в процессе ускорения космических частиц несостоятельно, так как оно не может объяснить именно тот факт (наличие тяжёлых ионов), который явился решающим аргументом в пользу теории КИУ.

Вышесказанное не означает однако, что теория Ферми целиком ошибочна. Учёт столкновений с облаками межзвёздной материи наиболее естественным образом объясняет изотропность первичной компоненты. Если же облака движутся, то и механизм ускорения, предложенный Ферми, имеет место и он может обеспечить правильное спектральное распределение. Не следует однако отводить этому механизму главную роль. Если предположить, что основными первоисточниками являются звёзды (например, звёзды типа рассмотренных в разделах 7 и 8), ускоряющие протоны в среднем до энергий порядка 10^{10} эв и, соответственно, ионы до энергий в Z раз больших, а столкновения с облаками главным образом перераспределяют эту энергию по спектру, то основное затруднение теории Ферми отпадает.

Итак, мы можем считать движущиеся ионизованные облака межзвёздной материи особого вида КИУ, перераспределяющими по спектру энергию космических частиц, испущенных первичными КИУ. Столкновения с облаками обеспечивают также изотропность первичной компоненты.

10. ОБЩАЯ КАРТИНА ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Проведённый выше анализ различных гипотез происхождения космических лучей приводит к заключению, что наиболее правильным является представление о зарождении первичных космических частиц в атмосферах звёзд галактической системы, обладающих значительными магнитными полями и являющихся КИУ.

Ускорение частиц до энергий 10^{10} эв и выше может быть обусловлено любым из механизмов, рассмотренных в разделах 6, 7, 8, или каким-нибудь новым индукционным механизмом. Каждый из этих механизмов может вносить определённый вклад в общий поток первичной компоненты. Однако наибольшее предпочтение можно отдать механизмам, описанным в разделах 7 и 8, так как эти механизмы не прекращают своего действия с уменьшением кинетической энергии вращения.

Далее, космические частицы, попадая в межзвёздное пространство, многократно сталкиваются с хаотически движущимися ионизованными намагнитченными облаками разрежённой межзвёздной материи. В результате столкновений с облаками частицы рассеиваются и дополнительно ускоряются, распределяясь при этом по энергетическому спектру согласно закону (1).

Пространственная изотропность первичной компоненты обуславливается как приблизительно равномерным распределением звёзд КИУ в ближайших частях галактики, так и рассеянием на намагнитченных облаках межзвёздной материи. Даже очень слабо намагнитченные, но весьма протяжённые облака межзвёздной материи должны вызывать значительные искривления траекторий движущихся зарядов. Таким образом, движение космических частиц через межзвёздное пространство подобно диффузии очень лёгкого газа через чрезвычайно нагретый, очень тяжёлый «газ», отдельными «молекулами» которого являются облака межзвёздной материи.

Очевидно, эффективное поперечное сечение рассеяния космических частиц при столкновениях с намагнитченным облаком будет зависеть от величины среднего магнитного поля облака и от энергии частицы. При решении задачи о распределении частиц по энергиям это обстоятельство будет способствовать более медленному спадаанию функции распределения $F(E)$ с возрастанием энергии, поскольку для частиц с большими энергиями величина отклонения магнитным полем облака уменьшается и, следовательно, уменьшается поперечное сечение рассеяния; таким образом, частицы с большими энергиями смогут достигать Земли из более удалённых областей галактики, не поглощаясь межзвёздным газом.

Механизм ускорения Ферми может рассматриваться как своеобразное «нагревание» «холодного», лёгкого газа космических частиц в «горячем» тяжёлом «газе», состоящем из космических облаков.

Преобладание в первичной компоненте протонов и приблизительное совпадение процентного содержания ионов других элементов с относительной распространённостью во вселенной объясняется зарождением первичных частиц в атмосферах звёзд.

При движении в магнитных полях космических облаков заряженные частицы должны излучать электромагнитные волны¹⁸. При этом электроны, вследствие малой массы, будут терять энергию на излучение гораздо быстрее, чем протоны и ионы тяжёлых элементов. Этим можно объяснить практическое отсутствие в составе первичной компоненты электронов с энергиями 10^{10} эв и выше, поскольку имеющие большую энергию электроны растратят её прежде всего на излучение электромагнитных волн и, следовательно, не донесут её от звёзд до Земли.

Повидимому, большая часть радиоизлучения галактики может быть объяснена электромагнитным излучением космических частиц, движущихся в магнитных полях облаков разреженной межзвёздной материи.

Проведённый выше анализ возможных типов космических индукционных ускорителей показывает, что не существует принципиальных препятствий для объяснения большой интенсивности общего потока первичной компоненты в рамках принятой нами общей картины возникновения космической радиации. Если полная энергия, которая может быть сообщена космическим частицам ускорителями типа вращающихся звёзд, ограничена запасом кинетической энергии вращения этих звёзд, то в случае ускорителей типа переменных звёзд подобное ограничение отсутствует, поскольку в этих случаях энергия ускоряемых частиц черпается изнутри ядерных процессов, поддерживающих общую активность звёзд. Таким образом, достаточная распространённость во вселенной магнитных переменных звёзд может обеспечить очень большую интенсивность потока космических частиц в межзвёздном пространстве.

Допущение излучения звёздами мощных потоков ускоренных частиц находится в соответствии с представлением о существовании интенсивных корпускулярных излучений звёзд, принимаемым последнее время астрофизиками¹⁹. Простейшим механизмом, обеспечивающим общее корпускулярное излучение звёзд, может быть тот же, что и механизм ускорения космических частиц. Можно полагать поэтому, что переменные магнитные поля на поверхности звёзд не представляют исключительного явления лишь для специальных классов звёзд, а органически связаны с деятельностью большинства звёзд.

Итак, энергия космических частиц черпается главным образом из ядерных процессов, протекающих внутри звёзд. Однако эта энергия сообщается частицам не непосредственно, а через цепь промежуточных превращений. Выделяющаяся внутри звёзд ядерная энергия при определённых условиях возбуждает механические перемещения звёздной материи. Перемещение больших масс хорошо проводящей внутризвёздной материи при наличии «замороженных» магнитных полей может возбуждать мощные магнитные поля, выходящие за пределы поверхности звезды. Возникшие таким образом переменные магнитные поля ускоряют ионы и электроны атмосферы звезды до средней энергии космических частиц, которые вылетают в межзвёздное пространство. Кроме частиц, ускоренных до очень больших энергий, переменные магнитные поля выбрасывают потоки более медленных частиц²⁰, составляющие основную массу корпускулярного излучения звёзд и образующие в дальнейшем намагниченные облака межзвёздной материи.

Излучённые звёздами быстрые частицы, взаимодействуя далее с намагниченными облаками, ещё более ускоряются за счёт кинетической энергии облаков и приобретают характерное для первичной компоненты распределение по энергиям.

Итак, проблема происхождения космических лучей, успешно решаемая теорией космических индукционных ускорителей, является частью космической электродинамики и электроники и органически связана с проблемой магнетизма звёзд и других космических объектов.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Д. В. Скобельцын, УФН, **42**, вып. 3, 331 (1950).
2. Я. П. Терлецкий, ЖЭТФ, **19**, 1059 (1949).
3. Я. П. Терлецкий, Вестник Моск. Университета № 1, 75 (1948).
4. Freier, Lofgren, Ney, Oppenheimer, Bradt and Peters, Phys. Rev., **74**, 213 (1948).
5. H. W. Babcock, Astrophys. Journ., **105**, 105 (1947).
6. Я. П. Терлецкий, ЖЭТФ, **16** 403 (1946); ДАН, **47**, 104 (1945).
7. С. А. Богуславский, Пути электронов в электромагнитных полях; Москва, 1929.
8. R. D. Richtmeyer and E. Teller, Phys. Rev., **75**, 1729 (1949).
9. H. Alfvén, Phys. Rev., **75**, 1732 (1949); Phys. Rev., **77**, 375 (1950).
10. E. Fermi, Phys. Rev., **75**, 1169 (1949).
11. Freier, Lofgren, Ney and Oppenheimer, Phys. Rev., **74**, 1818 (1948).
12. H. W. Babcock, Phys. Rev. **74**, 488 (1948).
13. В. Д. Кривченко, Вестник Моск. Университета № 2, 75 (1949).

- 14. J. W. Broxon, Phys. Rev., **75**, 612 (1949).
 - 15. Г. П. Дишкант, ЖЭТФ, **20**, 206 (1950).
 - 16. W. F. Swanp, Phys. Rev., **43**, 217 (1933).
 - 17. В. С. Вавилов, УФН, **39**, 612 (1949).
 - 18. Д. Иваненко и И. Померанчук, ДАН, **44**, 343 (1944).
 - 19. В. Г. Фесенков, ДАН, **64**, 795 (1949).
 - 20. П. Е. Колпаков и Я. П. Терлецкий, ДАН, **76**, 185 (1951).
-