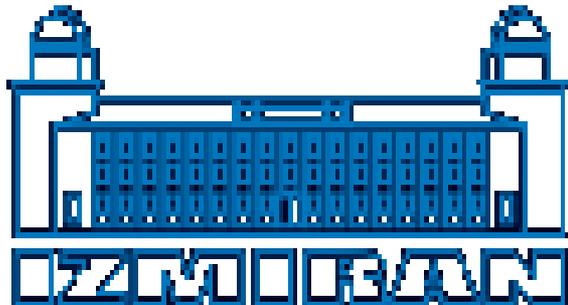


Некоторые замечания к процессам ускорения космических лучей

© 2022 Л.И. Мирошниченко (ИЗМИРАН),
Ю.И. Стожков (ФИАН)



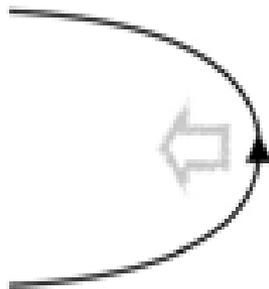
Москва, НИИЯФ МГУ, 37-ая Всероссийская
Конференция по Космическим Лучам

Абстракт

- Авторы исходят из простого постулата, что ускорение заряженных частиц идёт всюду, где имеются электрические поля любой природы. Нами обсуждаются некоторые сомнения в общепринятой картине ускорения частиц в космических условиях. Если рассматривать упругие взаимодействия частиц с магнитными облаками, то при диффузии частиц из Галактики к орбите Земли космические лучи (КЛ) должны приобретать энергию, т.к. в гелиосфере встречных столкновений с магнитными облаками будет больше, чем догоняющих. Если же перейти к электрическим полям, которые изменяют энергию частицы, то процесс ускорения происходит всегда, когда имеет место усиление напряженности магнитного поля или сжатие магнитного облака. В противном случае частица теряет энергию. При диффузии частиц в гелиосфере к орбите Земли космические лучи распространяются в расширяющемся межпланетном магнитном поле, т.е. частицы теряют энергию.
- Что касается ускорения частиц на фронте ударной волны (УВ) или непосредственно перед ее фронтом (например, УВ от вспышки сверхновой), то такой процесс ускорения будет происходить на возникающих магнитных неоднородностях (или магнитных облаках [1, 2]), которые перед фронтом всегда испытывают сжатие, т.е. образуются вихревые электрические поля. Важно, чтобы размеры неоднородности (облака) были больше ларморовского радиуса частицы. Чем больше оборотов сделает частица в облаке, тем большую энергию она приобретет.
- Неважно, под каким углом попадёт частица в неоднородность. Необходимо только увеличение напряженности магнитного поля. В целом в Галактике космические лучи большую часть времени проводят в расширяющихся магнитных облаках, т.е. они теряют энергию...

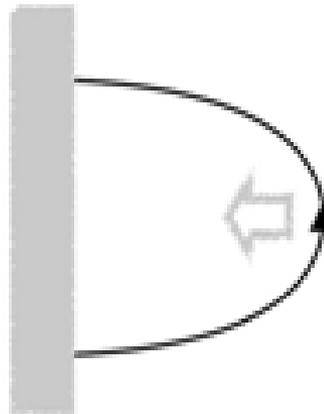
Modern Kinematic Scheme of Particle Reflection and Geometry of the Fermi Acceleration

A curved magnetic field line as in the original illustration by Fermi (1949)



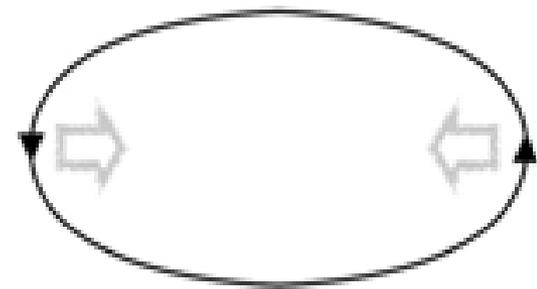
a

A line-tied version



b

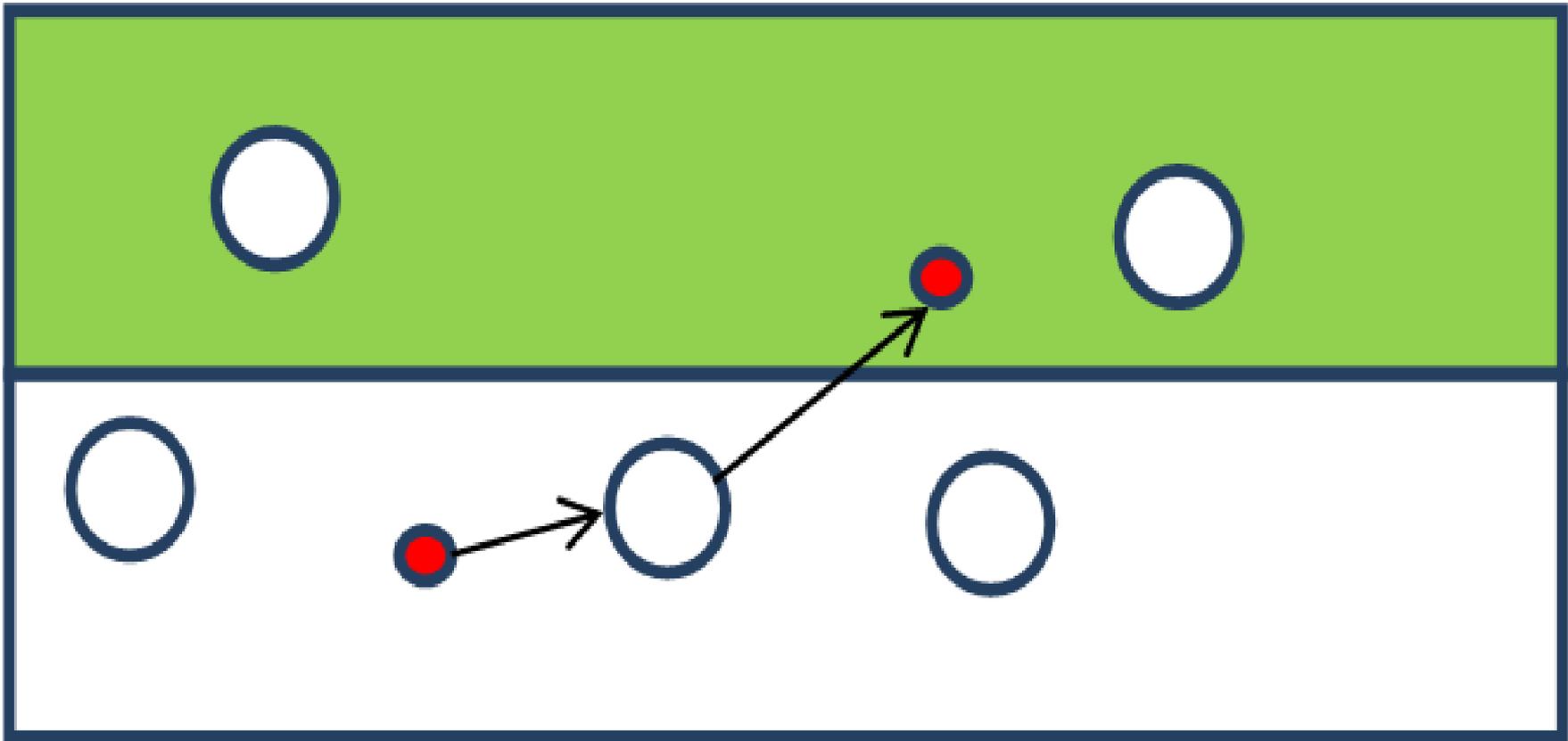
A magnetic island version.



c

The initial “push” to start energizing the particle can occur on a curved section of the field line and/or at the reflection points.

Shear mechanism



В чем суть сдвигового (shear) механизма ускорения частиц?

- Имеем 2 плазменных потока с магнитными неоднородностями (белые кружки). Течение в потоках 1 и 2 ламинарное. Поток 2 (белый) движется относительно потока 1 (темный) с большей скоростью, $V_2 > V_1$. Неоднородности в потоке 1 движутся со скоростью V_1 , а в потоке 2 - со скоростью V_2 . Пусть частица (красный кружок) в потоке 2 имеет скорость v и рассеивается упруго на неоднородности с магнитным полем (белые кружки), После рассеяния частица попадает в поток 1. Тогда в потоке 1 частица будет двигаться навстречу другой неоднородности со скоростью v , а неоднородность будет двигаться навстречу частице со скоростью $(V_1 - V_2)$, где $V_2 > V_1$. Согласно механическому рассмотрению, частица будет ускоряться (встречные соударения). Но в этой картине неоднородности не сжимаются и не расширяются, течение в каждом слое ламинарное, т.е. электрические поля не возникают, $(d\mathbf{B}/dt) = 0$. Частица не ускоряется и не замедляется. **Частица будет приобретать энергию только при пересечении слоя, который разделяет потоки 1 и 2** (схема Е.Г. Бережко [8], см. также [9]). Неоднородности только рассеивают частицы.

Дискуссия-Discussion-1

• 2. Модель Паркера и ошибка Альфвена

- В книге Паркера [3] есть информация о потерях энергии КЛ при прохождении их к орбите Земли. Обоснование этого с утверждения содержится в статьях 1950-1970-ых гг. Потери энергии обязательно будут, так как солнечный ветер и ММП расширяются и, согласно уравнению Максвелла, появляется вихревое электрическое поле, против которого вращаются частицы КЛ. Всегда, когда магнитное поле уменьшается, энергия КЛ в этом поле падает. И, наоборот, когда магнитное поле усиливается, энергия КЛ возрастает. Поэтому «механическое» описание процесса ускорения иногда дает «сбои».
- Таким образом, мы приходим к представлениям, согласно которым наблюдаемые вариации КЛ объясняются действием магнитных полей, выталкиваемых из Солнца солнечной корпускулярной радиацией (солнечным ветром). Как отметил Паркер [3], в развитии таких представлений, по-видимому, дальше всех продвинулся Альфвен [4]. Он предположил, что КЛ замедляются в индуцированном электрическом поле $\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}/c$ солнечной плазмы, в которую вморожено магнитное поле \mathbf{B} , перпендикулярное направлению движения \mathbf{v} .
- Однако Паркер [3] считает, что в гипотезе Альфвена [4] имеется фундаментальная теоретическая ошибка. Её суть заключается в следующем. Вихревое электрическое поле $\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}/c$ появляется в результате того, что в системе отсчёта, движущейся вместе с плазмой, отсутствует электрическое поле \mathbf{E} . Это последнее поле имеет вид $\mathbf{E} = (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}/c)/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$.
- Иными словами, в системе отсчёта, движущейся вместе с плазмой, изменения энергии частицы не происходит. Из принципа ковариантности следует, что этот вывод справедлив для любой другой инерциальной системы. Единственный возможный эффект – это небольшое ускорение частиц КЛ типа Ферми [3] 2-го порядка при их отражении от движущейся плазмы, однако этим эффектом в данном случае можно пренебречь.
-

Дискуссия-Discussion-2

- В корректных расчётах для фиксированной системы отсчёта, согласно Паркеру [4], необходимо, прежде всего, учитывать тот факт, что электрическое поле \mathbf{E} возникает в результате обычного электрического дрейфа $\mathbf{u} = c\mathbf{E} \times \mathbf{B}/B^2$. При $\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}/c$ и $\mathbf{B} \perp \mathbf{v}$ мы получаем $\mathbf{u} = \mathbf{v}$, т.е. частицы КЛ дрейфуют вместе с потоком, подобно всем другим частицам в плазме. В этом случае общая лоренцева сила, действующая на частицу КЛ, равна не $e\mathbf{E}$, как предполагает Альфвен [4], а $e(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}/c)$, что соответствует нулю в системе отсчёта, движущейся вместе с плазмой. При отсутствии лоренцевой силы не может происходить ни прирост, ни потеря энергии, каким бы ни был дрейф частиц КЛ [6, 7] в неоднородном магнитном поле \mathbf{B} .
- Таким образом, ответ на вопрос, обозначенный в начале заметки, сводится, по-видимому, к корректному учёту дрейфа КЛ в гелиосфере, с учётом всех её структурных особенностей и физических свойств.
- Двигаясь в магнитном поле, заряженная частица сохраняет свою траекторию и всегда «работает» против изменения магнитного поля. Если поле убывает, частица замедляется, т.е. теряет энергию. При усилении поля частица ускоряется, т.е. приобретает энергию.
- Следует отметить, что в первоначальном варианте своей гипотезы Ферми [1] не рассматривал магнитные ловушки. В этом смысле автор гипотезы сам себя критикует и уточняет свою модель в другой своей статье [2], где он пишет: «Частица, оказавшаяся между двумя такими областями (с усиленным магнитным полем – МЗ), будет захвачена на участке силовой линии, заключенной между ними. Когда это произойдет, энергия частицы будет меняться со временем гораздо быстрее, чем обычно. Она будет уменьшаться или увеличиваться в зависимости от того, отодвигаются ли края ловушки друг от друга или движутся навстречу друг другу». Иными словами, автор [1] начал сам развивать свою гипотезу с учётом новых данных о магнитных полях в космосе и новых представлений об их динамике [2].

И.Н. Топтыгин

- Близкое объяснение эффекта даёт также И.Н. Топтыгин [5]. Как отмечено в его книге (см. с.24), наряду с магнитным полем, в межпланетном пространстве существует крупномасштабное электрическое поле. Если в системе отсчёта, движущейся вместе с солнечным ветром, электрическое поле $\mathbf{E}^* = 0$ (приближение бесконечной проводимости), то в неподвижной системе в силу преобразований Лоренца поле имеет вид $\mathbf{E} = -[\mathbf{u}, \mathbf{B}]/c$. При радиальном направлении \mathbf{u} и магнитном поле паркеровского типа вектор \mathbf{E} имеет только θ -компоненту, которая по порядку величины составляет долю $u/c \ll 1$ от напряжённости магнитного поля.

Магия теории ускорения

- Автор [10] провёл очень тщательный сравнительный анализ процессов ускорения на УВ (модель DSA – Diffusive Shock Acceleration) и стохастического ускорения с теоретической точки зрения. Было показано, что ускорение на ударных волнах и стохастическое ускорение имеют много общего между собой. Частота пересечений фронта УВ при механизме DSA эквивалентна частоте рассеяний частицы при стохастическом ускорении. Как написал автор [10], «магия» теории ускорения на УВ состоит в следующем: параметры α (темп ускорения) и T (время ускорения) связаны таким образом, что их произведение αT зависит только от степени сжатия плазмы σ в УВ. При этом астрофизические УВ, как правило, являются сильными, т.е. имеют такие степени сжатия, чтобы обеспечить формирование наблюдаемых степенных спектров ускоренных частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, несмотря на более чем 100-летнюю историю исследований [11], в проблеме ускорения КЛ остаются неясные вопросы и, соответственно, содержатся новые возможности для развития теории.

Литература

- 1. E. Fermi. On the origin of cosmic radiation. 1949. *Phys. Rev.*, 75, 1169-1174.
- 2. Fermi E (1954). Galactic magnetic fields and the origin of cosmic radiation. *Astrophys. J.* 119(1):1-6.
- 3. Е. Паркер. *Динамические процессы в межпланетной среде*. М., «Мир», 1965, 362 с.
- 4. Х. Альфвен. *Космическая электродинамика*. М., ИЛ, 1952, 290 с.
- 5. И.Н. Топтыгин. *Космические лучи в межпланетных магнитных полях*. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 304 с.
- 6. Alfven, H. On the origin of cosmic radiation. *Tellus*, 1954, 6, No.3, p.232-253.
- 7. Alfvén H. Magnetic storm effect on cosmic radiation. 1954. *Physical Review*. 94, No.4, p.1082-1084. DOI: [10.1103/PhysRev.94.1082](https://doi.org/10.1103/PhysRev.94.1082)
- 8. Е.Г. Бережко. Ускорение заряженных частиц в сдвиговых течениях космической плазмы. Письма в ЖЭТФ, 1981, т.33, вып.8, с.416-419.
- 9. [Frank M. Rieger](#), [Valentí Bosch-Ramon](#) & [Peter Duffy](#). Fermi acceleration in astrophysical jets. *Astrophysics and Space Science*, v.309, p.119–125 (2007).
- 10. F.C. Jones. A theoretical review of diffusive shock acceleration. *Astrophys. J. Suppl.*, 1994, v.90, p.561-565.
- 11. М.И. Панасюк, Л.И. Мирошниченко. Ускорение частиц в космосе: Универсальный механизм? – *Успехи физических наук*, 2022, т.192, №4, с.413-442. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.07.039022> - для русской версии, <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.07.039022> - для английской версии.

Благодарности

- Авторы признательны Г.Ф. Крымскому и С.А. Стародубцеву за обсуждение вопроса о сдвиговом механизме ускорения.

Artist illustration of a coronal mass ejection. Image credit: NASA/MSFC



**Fundamental
Problem:
Flare-CME,
Physical
and/or
Topological
Links**