

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



26/IX-77

с345л

9 - 10772

X-303

3883/2-77

М.С.Хвастунов

ИНДУКЦИОННЫЙ МЕТОД УСКОРЕНИЯ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Часть I

1977

9 - 10772

М.С.Хвастунов

ИНДУКЦИОННЫЙ МЕТОД УСКОРЕНИЯ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
Часть I

Направлено в "Nuclear Instruments and Methods"



Хвастунов М.С.

9 - 10772

Индукционный метод ускорения заряженных частиц. (Часть I)

Предложен метод ускорения заряженных частиц, заключающийся в том, что эти частицы пропускают через области пространства с изменяющимся магнитным потоком. При этом изменение магнитного потока производят путем перемещения магнитного поля, а движение магнитного поля осуществляется вращением магнитов (электромагнитов) или с помощью многофазных обмоток, питаемых системой многофазных токов.

На основе данного метода предложен новый ускоритель - индукционный ускоритель с бегущим полем.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

1. ИДЕЯ МЕТОДА

Суть метода заключается в том, что заряженные частицы пропускают через области пространства с изменяющимся магнитным потоком. Причем магнитный поток зависит от времени и от координат:

$$\Phi = \Phi(t, \vec{r}(t)). \quad /1/$$

Поэтому производная магнитного потока по времени может быть записана в виде

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\partial\Phi}{\partial t} + \text{grad}\Phi \cdot \vec{u}, \quad /2/$$

$$\text{где } \vec{u} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

Временная компонента производной /2/ определяет вихревое электрическое поле:

$$E_t = - \frac{\partial\Phi}{\partial t}, \quad /3/$$

$$\text{rot } \vec{E}_t = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad /4/$$

Для вычисления пространственной компоненты производной /2/ удобно перейти от вектора \vec{B} магнитной индукции к векторному потенциалу \vec{A} и воспользоваться теоремой Стокса:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_L \vec{A} \cdot d\vec{l}. \quad /5/$$

Пользуясь правилами векторной алгебры, можно получить

$$\text{grad } \Phi \cdot \vec{u} = \int_L (\vec{B} \times \vec{u}) \cdot d\vec{\ell} . \quad /6/$$

При этом предполагалось, что контур, вернее его прямолинейный активный участок, находящийся в магнитном поле, перемещается в направлении, перпендикулярном самому себе: $\vec{u} \perp d\vec{\ell}$.

Величина \vec{u} - скорость перемещения контура L относительно неподвижного поля. Далее будем считать контур L неподвижным, а магнитное поле перемещающимся относительно контура со скоростью $-\vec{u}$. Тогда электродвижущая сила в неподвижном контуре будет определяться соотношением

$$\mathcal{E}_u = \int_L \vec{E}_u \cdot d\vec{\ell} = -\text{grad } \Phi \cdot (-\vec{u}) = \int_L (\vec{B} \times \vec{u}) \cdot d\vec{\ell} . \quad /7/$$

Напряженность электрического поля в контуре L в соответствии с выражением /7/ равна

$$\vec{E}_u = -\vec{u} \times \vec{B} . \quad /8/$$

Поле \vec{E}_u возникает в результате движения со скоростью \vec{u} магнитного поля \vec{B} и, по сути дела, должно определяться на основании преобразований Лоренца. Действительно, если в системе отсчета K' , движущейся относительно лабораторной системы K со скоростью \vec{u} вдоль оси, например X, есть магнитное поле \vec{B}' , ориентированное, например, по оси Z, то в лабораторной системе будут наблюдаться магнитное поле $\vec{B} = \gamma \vec{B}'$, где γ - лоренц-фактор системы K' , и электрическое поле \vec{E}_u , определяемое соотношением /8/. При этом все величины, \vec{u} , \vec{E}_u и \vec{B} , измерены в лабораторной системе отсчета / \vec{u} - в м/с, \vec{E}_u - в В/м и \vec{B} - в В с/м²/Тесла//. Формулу /8/ можно применять при любых скоростях $u \leq c$.

Как известно, вихревое поле \vec{E}_t знакопеременно /см. выражения /3/ и /4//, а поле движения \vec{E}_u может иметь постоянный знак.

Вихревое поле \vec{E}_t используется в ускорителях /бета-трон, линейный индукционный ускоритель/, а поле движения \vec{E}_u , насколько нам известно, ранее не применялось в ускорительной технике. Следует, однако, отметить, что в космическом пространстве это поле, по-видимому, "работает" на ускорение частиц^{/1/}. В условиях космического пространства возможно существование движущихся плазменных образований с замороженными магнитными полями. В условиях высокой проводимости плазмы электрические поля в плазменном облаке практически отсутствуют и в этом облаке существует только магнитное поле \vec{B} . Если это облако движется со скоростью \vec{u} относительно частицы с зарядом q в направлении, перпендикулярном траектории частицы, то на эту частицу действует сила $q\vec{E}_u$ и частица будет ускоряться^{/1/}.

Представляется весьма целесообразным использовать обсуждаемый механизм ускорения частиц в земных условиях.

2. ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ РЕАЛИЗАЦИИ

В результате проведенного анализа вырисовывается следующая схема индукционного ускорителя, в котором в качестве ускоряющего поля используется поле движения \vec{E}_u .

Движущееся магнитное поле может быть получено путем вращения магнитов или электромагнитов, а также с помощью многофазных обмоток, питаемых системой многофазных токов, аналогично тому, как это делается в электрических машинах*. Устройство для получения движущегося магнитного поля известно в электротехнике и называется индуктором бегущего магнитного поля. Такой индуктор может быть использован в качестве ускоряющего элемента нового ускорителя /назовем его индукционным ускорителем с бегущим полем/.

* Подробнее этот вопрос будет обсужден в последующих работах.

Магнитное поле \vec{B} в индукторе движется в направлении, перпендикулярном траектории ускоряемых частиц, а поле движения \vec{E}_u - ускоряющее поле - ориентировано вдоль первоначального направления движения частиц. Движение частиц в индукторе происходит в скрещенных электрическом и магнитном полях.

Траектория частицы в общем случае - винтовая линия с увеличивающимся шагом или /если $\vec{v} \perp \vec{B}$ / - трохоида.

В ускорителе может быть несколько индукторов, расположенных друг за другом вдоль траектории ускоряемых частиц. Отклонения частиц в магнитных полях отдельных индукторов могут быть взаимно скомпенсированы. Кроме того, магнитные поля индукторов могут быть использованы для обеспечения многократного прохождения ускоряемых частиц через одни и те же индукторы. В соответствии с изложенным обсуждаемый метод может быть реализован:

1/ в линейном /или спиральном/ ускорителе частиц /преимущественно ионов/ с большим приростом энергии на единицу длины;

2/ в циклическом ускорителе.

Кинетическая энергия T частиц с зарядом q на выходе ускорителя определяется выражением

$$T = T_0 + m \cdot q \cdot \sum_{i=1}^n E_{ui} \cdot l_i \quad /10/$$

где T_0 - начальная кинетическая энергия частиц, m - число проходов частицами ускоряющей системы /число оборотов/, n - число индукторов в ускорителе, E_{ui} - ускоряющее поле в i -м индукторе, l_i - длина i -го индуктора вдоль направления движения частиц перед этим индуктором.

3. ОСНОВНОЕ ПРЕИМУЩЕСТВО МЕТОДА

Основным преимуществом обсуждаемого метода по сравнению с известными является возможность создания

на его основе ускоряющего элемента непрерывного действия, в котором ускоряющее поле \vec{E}_u всегда имеет одно и то же направление /см. п. 1/, как в электростатических ускорителях. Однако в отличие от последних обсуждаемый ускоряющий элемент может проходиться ускоряемыми частицами многократно. Следует отметить, что в условиях космического пространства существование ускоряющего элемента непрерывного действия, аналогичного обсуждаемому, вряд ли возможно.

4. КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Предложен метод ускорения частиц в электрическом поле, возникающем при движении магнитного поля в направлении, перпендикулярном траектории ускоряемых частиц. При этом движение магнитного поля осуществляется вращением магнитов /электромагнитов/ или с помощью многофазных обмоток, питаемых системой многофазных токов.

На основе данного метода ускорения предложен новый индукционный ускоритель - ускоритель с бегущим полем.

Автор выражает искреннюю благодарность М.Д.Шафранову, И.А.Шелаеву, А.Г.Бонч-Осмоловскому, А.Ф.Писареву, Э.А.Перельштейну, С.Б.Рубину и А.Б.Кузнецову за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. Изд. Наука, М., 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 июня 1977 года.