Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

С. Варламов, Механизм излучения ускоренно движущегося заряда, *Квант*, 2021, номер 11, 24–26

DOI: <https://doi.org/10.4213/kvant20211104>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.172.240.79

26 апреля 2023 г., 14:09:40

ренциальное уравнение в частных производных, поскольку все искомые величины (скорость смещения, упругая деформация, давление – в случае водопровода и ток, плотность заряда, разность потенциалов – в случае кабеля) зависят от двух переменных – времени и координаты. (Эти уравнения можно свести к одному, названному по вполне понятной причине «уравнением телеграфистов».) Правда, и без этих уравнений понятно, что при наличии повреждений на месте гидроудара трубопровода (говоря политкорректно, «при несанкционированном отборе») или при пробое электрокабеля на дне океана отраженный сигнал и время его появления будут сильно отличаться от безаварийного случая (рис. 3).

Любопытно сопоставить и судьбы двух великих людей – Уильям Томсон получил (1892) от королевы Виктории титул «барон Кельвин», после чего его стали называть лордом Кельвином, а профессор Н.Е. Жуковский основал (1918) знаменитый Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), который справедливо носит имя ученого.

А вот что еще сообщает академик А.Н. Крылов: «Многие работы Жуковского имели непосредственное практическое зна-

Рис. 3. Схематичное изображение распространения сигналов, посланных из A и отраженных в точке B. Вверху – в случае «здоровой» линии, внизу – испорченной в точке D; штриховые линии – искаженный сигнал

чение, и если бы он, подобно лорду Кельвину, разрабатывал их до практических деталей и брал бы патенты, то и он имел бы и свою яхту, и виллы, и замки.... Жуковский же никогда ничего не патентовал, предоставляя все свои открытия в общее пользование, видя в науке не средство для личной наживы, а средство приумножения блага для человечества...» (см. ссылку 2).

Так что, если у вас есть мысли – срочно патентуйте, господа!

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТАТИВ

Механизм излучения ускоренно движущегося заряда

С.ВАРЛАМОВ

*Я оглянулся посмотреть,
не оглянулась ли она,
Чтоб посмотреть,
не оглянулся ли я.*

М.Леонидов

Если в некоторой инерциальной системе отсчета (ИСО) электрически заряженный

предмет движется поступательно с постоянной скоростью, то просто выбором другой ИСО можно добиться того, чтобы этот предмет находился в покое. В таком случае он (предмет) создает в пространстве вокруг себя стационарное электрическое поле (электростатическое поле). Плотность энергии этого поля остается неизменной в любом месте пространства, т.е. никаких электромагнитных волн заряженный предмет не излучает.

Когда на такой предмет действует внешняя сила и заставит его двигаться с ускорением, электрическое поле в пространстве вокруг этого предмета будет изменяться, что приведет к появлению магнитного поля, которое, в свою очередь, тоже будет изменяться, порождая изменяющееся электрическое поле, и т.д. Эта ситуация образно отражена в известной песне со словами, вынесенными

в эпиграф. Связанные друг с другом изменения полей, возникшие в тот промежуток времени, когда заряженный предмет двигался с ускорением, «путешествуют в пространстве со временем», т.е. появляется электромагнитная волна, убегающая от предмета в разные стороны.

Мы уже выбрали ИСО, в которой до воздействия силы предмет покоился. Разумно поставить вопрос: почему действие силы на предмет не только изменяет его кинетическую энергию, которая после прекращения действия силы становится равной $mv^2/2$, но и приводит к появлению электромагнитной волны, которая тоже несет с собой энергию?

Для ответа на такой вопрос рассмотрим модельную ситуацию, в которой заряженный предмет представляет собой гантель из двух одинаковых шариков очень малых размеров, заряженных одинаковыми зарядами q и q (суммарный заряд равен $2q$) и имеющих суммарную массу m . Эти шарики соединены жестким невесомым стержнем длиной L . Сила действовала на эту конструкцию в направлении вдоль стержня и сообщала шарикам ускорение a . Время действия силы $\tau = L/c$, где c — это скорость света. Промежуток времени специально выбран таким, чтобы в течение него внешнее электрическое поле, в котором находился каждый заряженный шарик, не успело измениться.

Каждый из шариков переместился на расстояние $a\tau^2/2$, при этом один (первый) шарик приблизился к тому месту, где находился второй до момента начала действия силы, а второй шарик удалился на такое же расстояние от того места, где первоначально находился первый. Суммарная потенциальная энергия взаимодействия каждого из шариков с внешним для него полем изменилась на величину

$$\Delta E = kq^2 \left[\frac{1}{L + \frac{a\tau^2}{2}} - \frac{1}{L} \right] - kq^2 \left[\frac{1}{L \cdot \frac{a\tau^2}{2}} - \frac{1}{L} \right] \approx kq^2 \frac{a^2\tau^4}{4L^3} \approx kq^2 \frac{a^2\tau}{4c^3}.$$

Если полученную энергию разделить на промежуток времени τ , то мы получим формулу, которая соответствует (по входящим в нее физическим величинам) известной формуле Лармора

$$W = \frac{2kq^2a^2}{3c^3}$$

для суммарной мощности излучения по всем направлениям, которая «уходит» от ускоренно движущегося заряда. В этой формуле ускоренно движется один заряд q и безразмерный множитель равен $2/3$.

Конечно, в модельной и очень упрощенной ситуации получить точный численный множитель было бы огромной удачей, но не точные вычисления являются целью нашего рассмотрения. Цель — показать «на пальцах», откуда берется энергия излучения и куда девается.

Продолжим наше модельное рассмотрение. Сила перестала действовать, и каждый из зарядов вновь оказался в таком же, как и до действия силы, внешнем для него электрическом поле, т.е. суммарная потенциальная энергия электростатического взаимодействия вернулась к прежнему (до силового воздействия) значению. Но энергия просто так не пропадает! Возникшая добавочная энергия не связана с зарядами, двигавшимися какое-то время ускоренно, она «оторвалась» от них и существует в виде энергии, распространяющейся в пространстве электромагнитной волны. Поскольку заряды выбраны одного знака, то поля, созданные ими, на больших расстояниях от конструкции за счет интерференции сложатся и обратно энергия уже не возвратится.

А если взглянуть на полученную формулу и заменить знак одного из зарядов на противоположный, то получится, что изменение потенциальной энергии зарядов стало отрицательным. Однако поля, созданные каждым из зарядов, теперь на большом расстоянии от конструкции за счет интерференции «погасят друг друга» и энергия возникшего изменения электромагнитного поля вернется к диполью. Иными словами, в случае, когда суммарный электрический заряд равен нулю, поле излучения на больших расстояниях от ускоренно движущейся конструкции будет отсутствовать.

Теперь вернемся к описанию поведения нашей конструкции. Она движется с уско-

рением, а внешняя сила за счет своей работы создает и кинетическую энергию предметов (шариков), и энергию поля. Это означает, что действующая на конструкцию внешняя сила по величине больше, чем ma ! Получается, что на заряды действует не только внешняя механическая сила, но и направленная навстречу ускорению сила со стороны электромагнитного поля излучения. Эту силу называют «силой радиационного торможения». Мощность силы, как известно (по определению), равна скалярному произведению силы на скорость движения точки приложения силы. В данном случае мощность, развиваемая силой радиационного торможения, действующей на заряды, отрицательна, а сила, действующая со стороны заряда на поле, положительна. Второй закон Ньютона будет иметь вид

$$m\vec{a} = \vec{F}_{\text{внеш}} + \vec{F}_{\text{рад. торм.}}$$

Самое существенное в рассмотренной ситуации заключается в том, что для возникновения излучения заряженный и движущийся ускоренно предмет должен иметь конечный, т.е. не равный нулю, размер. И хотя этот размер L в полученную формулу для излучения и не вошел, но он сыграл свою роль, обеспечив время задержки L/c , через которое заряды, распределенные в пространстве, почувствуют произошедшие изменения поля, созданного для них другими зарядами. В частности, из этого рассмотрения и из того факта, что заряженные частицы – электроны и протоны – излучают, если движутся с ускорением, следует, что эти частицы не могут быть точечными, т.е. они как-то распределены в пространстве! Характерные размеры такого распределения могут быть очень малыми, но не равными нулю.

Сила радиационного торможения существует только в том случае, когда есть внешняя сила, обеспечивающая движение заряженного тела с ускорением. Если внешней силы нет, то нет и не может быть силы радиационного торможения. Поэтому будет некорректно записать второй закон Ньютона для движения заряженного тела в приведенном выше виде, считая, что внешняя сила просто равна нулю. Тем не менее, некоторые теоретики, написав формально такое уравнение, находят в числе возможных решений движение с увеличивающимся ускорением.

Это, конечно, неправильно. Дело в том, что при этом причину – движение с ускорением – и следствие – возникновение радиационной тормозящей силы – поменяли местами. Это противоречит логике.

Формула Лармора справедлива для излучения заряженных частиц, движущихся со скоростями, которые значительно меньше скорости света. Конечно, физики нашли формулы и для любых возможных скоростей движения частиц, но это уже другая – не школьная, а более серьезная физика.

На этом, пожалуй, и следовало бы закончить рассказ об излучении, возникающем при ускоренном движении заряженных частиц. Однако нужно помнить, что теория без решения задач «суха».

А вот и задачи:

1. Протон разгоняется, двигаясь по прямой траектории из точки с потенциалом $\varphi_0 = 0$ и с начальной нулевой скоростью в точку с потенциалом $\varphi = -10^6$ В. Оцените энергию излучения, возникшего во время этого движения. Точка старта находится от точки финиша на расстоянии $L = 1$ м. Электрическое поле однородное.

2. Электрон приближается к протону с расстояния 1 м до расстояния 10^{-10} м. Начальная скорость электрона равна нулю. Какая энергия перейдет в излучение?

3. Протон движется в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,1$ Тл, причем его скорость перпендикулярна магнитному полю. Начальный радиус кривизны траектории протона $R = 1$ м. Через какое время этот радиус станет равным $R/2$?

4. Электрон влетает со скоростью $v = c/20$ в область с однородным магнитным полем с индукцией $B = 1$ Тл. Сделав половину оборота, электрон покидает эту область. На сколько уменьшилась его скорость к моменту вылета из области с магнитным полем?