

УДК 537.533.7, 531.611

Аналогия между движением заряженных частиц в электростатическом поле и движением тела, брошенного под углом к горизонту

The analogy between the movement of charged particles in an electrostatic field and the movement of a body thrown at an angle to the horizon

Саулебеков А.О., Камбарова Ж.Т., Тусупбекова А.К.

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: saulebekov@mail.ru)

Мақалада электростатикалық өрістегі зарядталған бөлшектер қозғалысы мен көкжиекке бұрышпен лақтырылған дененің қозғалысы салғастырыла зерттелген. Бұл әдіс оқушыларға материалдар құрамын спектрлік талдауында қолданылатын спектрометрлер мен спектрографтардың жұмыс істеу принципін терең түсінуге мүмкіндік береді. Екі жағдайда да кинетикалық энергия симметрия осіндегі траектория проекциясынан функция түрінде алынған. Көкжиекке бұрышпен лақтырылған дене жағдайы спектрограф режиміне ұқсас екендігі көрсетілген. Зарядталған бөлшектердің талдауы кезінде жеткілікті дабыл тіркелу үшін таралатын ағындар өткізіліп, кейін тоғысталатындығында айырмашылық байқалған.

An analogy between the movement of charged particles in an electrostatic field and the movement of a body thrown at an angle to the horizon was shown. This analogy gives ability to students to more deeply understand the principle of work of spectrometers and spectrographs that used for spectral analysis of composition of materials. The kinetic energy in both cases was obtained as a function of the projection of the trajectory on the symmetry axis. There are shown that case of a body thrown at an angle to the horizon, is similar to the spectrograph. The difference lies in the fact that the analysis of charged particles is passed divergent streams, which are then focused for to get a sufficient signal for recording.

Совершенствование технологий обработки поверхности конструкционных материалов и создание новых микросхем немислимы без контроля компонентного и послойного состава образцов. Измерение энергетических распределений электронов и ионов, рассеянных исследуемым материалом, дает возможность ответить на вопросы о химическом составе и профиле концентраций в приповерхностных слоях. Термин «спектроскопия» в школьном учебнике физики относится только к оптическим явлениям. Спектром называют распределение испускаемой в единицу времени с единицы поверхности световой энергии по частотам ν или длинам волн. Важной деталью спектрометра является энергоанализатор — устройство, позволяющее определять плотность тока ионов (или электронов) с энергиями в выбранном интервале от E до $E + \Delta E$. Энергоанализатор позволяет установить, как заряженные частицы в потоке распределены по энергиям. Аналогом энергоанализатора в оптике является, например, призма, разлагающая падающий на нее свет в спектр, что и позволяет исследовать распределение светового потока по длинам волн [1].

В работе [2] проведена оптико-механическая аналогия в изложении для школьников. Оптико-механическая аналогия — это сходство траектории движения частицы в потенциальном силовом поле с траекторией лучей в оптически неоднородной среде. Траектория материальной точки и траектория светового луча совпадают при определенном соответствии потенциальной энергии и переменного в пространстве показателя преломления среды.

Рассмотрим экспериментальную схему спектрометра, представленную на рисунке 1. Данная схема включает источник заряженных частиц — электронную пушку (ЭП) и некоторый датчик-

приемник (Д-П), регистрирующий приход частиц в определенную точку пространства (при рассматриваемом одномерном случае — в точку x_1) в зависимости от отрицательного потенциала ϕ_1 , который подан на отражающий металлический экран (Э). Причем потенциалы ϕ_2 и ϕ_3 равны по абсолютной величине. После вылета из пушки под некоторым углом α к горизонту с начальной скоростью \vec{V} электроны продолжают движение в электростатическом поле отражающего экрана, которое отклоняет их вниз, после чего они либо попадают на рабочую поверхность датчика-приемника и фиксируются им, либо проходят мимо него. Первый случай говорит о наличии у электронов некоторой расчетной скорости, а значит, и кинетической энергии; второй — об обратном. Это дает возможность классифицировать частицы по энергиям. При неизменном угле вылета электронов из пушки их энергию можно будет определять, зная только расстояние от точки вылета из пушки до датчика-приемника x_1 и потенциал экрана ϕ_1 , чье поле отклоняет пучок частиц от первоначального направления движения. Следовательно, при постоянном потенциале отражающего экрана ϕ_1 измерения сведутся к нахождению только x_1 .

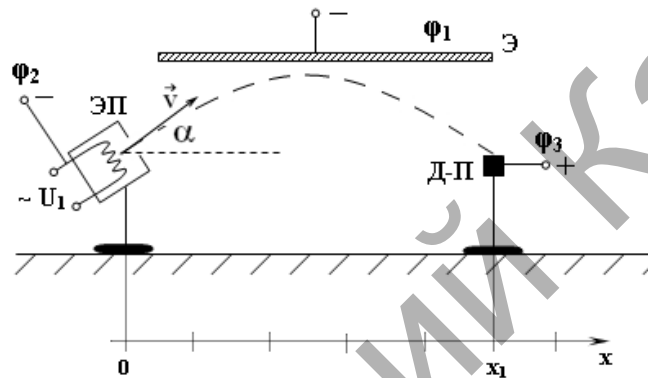


Рис. 1. Экспериментальная схема спектрометра

Для того чтобы процесс был более понятен, предлагается механическая аналогия с движением тела, начальная скорость которого направлена под углом к горизонту. Оба поля, и электростатическое и поле Земли, являются потенциальными и с математической точки зрения описываются аналогично. В данной аналогии поле тяготения Земли будет действовать аналогично электростатическому полю отражающего экрана, потенциал которого постоянен (ускорение свободного падения $g=9,8 \text{ м/с}^2$). Будет меняться только абсолютная величина скорости, что позволит говорить об обладании бросаемым телом различной кинетической энергией от опыта к опыту. Как и в первом случае, с частицами при различных кинетических энергиях тело пролетит по горизонтали различные расстояния. Таким образом, можно будет без труда определять величину кинетической энергии, необходимую для преодоления требуемого расстояния при неизменном угле бросания тела.

Перейдем к рассмотрению механической аналогии. Движение тела, брошенного под углом к горизонту, описывается формулами

$$y = h = h_{0y} + V_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}, \quad V_y = V_{0y} + g_y t. \quad (1)$$

Так как $V_{0x} = V_0 \cos \alpha$, $V_{0y} = V_0 \sin \alpha$ и $g_y = -g$, то

$$x = V_0 t \cos \alpha; \quad y = V_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}. \quad (2)$$

а) В конце полета тела координата $y=0$. Время t полета найдем по формуле для y :

$$V_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2} = 0.$$

Решая это квадратное уравнение относительно t , найдем:

$$t_1 = 0; \quad t_2 = \frac{2V_0 \sin \alpha}{g}.$$

Значение t_1 соответствует началу полета (в этот момент y тоже равен нулю), а t_2 — это искомое время полета.

$$t = \frac{2V_0 \sin \alpha}{g}. \quad (3)$$

б) Время движения до высшей точки траектории вдвое меньше всего времени движения, т.е. $\tau = \frac{V_0 \sin \alpha}{g}$. Максимальная высота подъема h_{\max} — это значение координаты y , которое получится, если в выражение для координаты y вместо t подставить найденное значение времени подъема:

$$h_{\max} = V_0 \sin \alpha \frac{V_0 \sin \alpha}{g} - \frac{g}{2} \left(\frac{V_0 \sin \alpha}{g} \right)^2 = \frac{V_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}. \quad (4)$$

в) Дальность полета $L(x_1)$ — это максимальное значение координаты x . Его мы получим, если в формулу для координаты x подставим вместо t время полета: $t = \frac{2V_0 \sin \alpha}{g}$.

$$L = x_1 = x_{\max} = V_0 t \cos \alpha, \quad (5)$$

или

$$L = V_0 \cos \alpha \frac{2V_0 \sin \alpha}{g} = \frac{2V_0^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g}, \quad L = \frac{V_0^2 \sin 2\alpha}{g}. \quad (6)$$

Отсюда видно, что дальность L будет наибольшей, если $\sin 2\alpha = 1$. Это значит, что $2\alpha = 90^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$. При неизменном угле бросания (как в первом случае), но с разными начальными скоростями и, значит, кинетическими энергиями получается результат, представленный на рисунке 2.



Рис. 2. Движение тел, брошенных с разными начальными энергиями при неизменном угле

От измерения расстояния полета по горизонтали перейдем к определению энергии. Помножим обе части выражения $L = \frac{V_0^2 \sin 2\alpha}{g}$ на $\frac{m}{2}$ и получим

$$\frac{mL}{2} = \frac{mV_0^2 \sin 2\alpha}{2g}.$$

Известно, что кинетическая энергия

$$\frac{mV_0^2}{2} = E_k,$$

тогда

$$\frac{mL}{2} = E_k \frac{\sin 2\alpha}{g},$$

откуда

$$E_k = \frac{mgL}{2 \sin 2\alpha}.$$

Однако при изложенных выше условиях

$$\frac{mg}{2 \sin 2\alpha} = const,$$

значит, имеем

$$E_k = \text{const} \cdot L.$$

Для самого распространенного в электронной спектроскопии цилиндрического электростатического зеркального анализатора пучков заряженных частиц зависимость кинетической энергии частиц от проекции траектории на ось симметрии определяется следующим образом:

$$L = 2ctg\alpha(1 + 2p\theta).$$

Согласно [3] $p = \sqrt{\frac{E_k}{qU} \ln \frac{r_1}{r_0}} \sin \alpha$ — параметр отражения цилиндрического зеркала, где E_k — кинетическая энергия заряженных частиц; q — заряд частиц; U — отклоняющий потенциал; r_1 и r_0 — радиусы внешнего и внутреннего цилиндрических электродов; $\theta(p) = e^{p^2} \int_0^{p^2} e^{-x^2} dx$.

И в этом случае мы получаем зависимость $E_k = \text{const} f(L)$.

Таким образом, при обозначенных выше условиях, зная положение тела (электрона) после его падения, несложно определить кинетическую энергию тела (электрона) в начале движения. И наоборот, зная кинетическую энергию тела (электрона), можно определить, на каком расстоянии оно (он) упадет (будет зафиксирован). Нас интересует первая задача. В спектроскопии потоков заряженных частиц основной и главной задачей является определение энергии частиц. Зная распределение по энергии частиц, можно получать информацию о состоянии и параметрах исследуемого образца.

В случае тела, брошенного под углом к горизонту, все достаточно просто, в отличие от анализа заряженных частиц по энергии. Продолжим построение наших аналогий.

В первом случае можно считать, что поле Земли работает в режиме «спектрографа». Потенциал не меняется, а фиксация объектов осуществляется как бы координатным детектором (рис. 2). Если не менять угол входа в отклоняющее поле и величину отклоняющего потенциала, то фиксировать частицы, приходящие в разные точки, необходимо координатным детектором (рис. 3). Это и есть режим спектрографа. Ожидается, что в связи с резким удешевлением соответствующих систем регистрации — координатно-чувствительных детекторов (например, ПЗС-матриц) — будет осуществлен постепенный переход от спектрометров к спектрографам как приборам, обеспечивающим несравнимо более высокую чувствительность анализа. К тому же в режиме «спектрографа» регистрируется сразу определенный интервал энергий. Например, для упомянутого выше цилиндрического зеркального анализатора (рис. 4) этот интервал составляет 30 %, что существенно повышает экспрессность анализа, а это особенно важно в случае изменений условий эксперимента.



Рис. 3. Траектории заряженных частиц в электростатическом поле

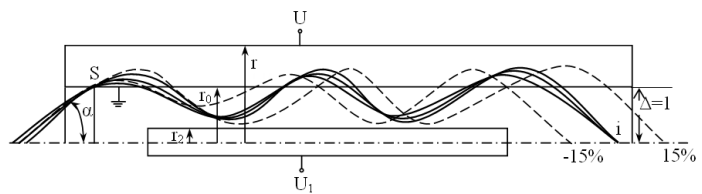


Рис. 4. Схема угловой фокусировки в системе цилиндрических зеркал, работающих в режиме «спектрографа»

На настоящий момент распространенным является режим спектрометра, когда угол остается неизменным, но меняется величина отклоняющего потенциала, и частицы разной энергии последовательно собираются в точку. Таким образом, получается спектр. По оси ординат откладывается интенсивность фокусируемых частиц, а по оси абсцисс — их кинетическая энергия.

Зафиксировать брошенное под углом к горизонту тело (допустим, камень, мячик, спортивную гранату) не составляет труда. Зафиксировать же отдельную элементарную частицу — задача трудно-выполнимая, поэтому специальными диафрагмами вырезается расходящийся пучок заряженных частиц, который затем надо сфокусировать (собрать) в точку (идеальная фокусировка) или пятно небольшого размера (рис. 4). Таким образом, возникает необходимость фокусировки заряженных частиц, что приводит, в свою очередь, к необходимости введения так называемых электронно-оптических параметров (фокусировка первого, второго и т.д. порядков, светосила, разрешение по энергии, дисперсия по энергии и т.д.).

Таким образом, проведена аналогия между движением заряженных частиц в электростатическом поле и движением тела, брошенного под углом к горизонту. Практическое значение данной аналогии связано с использованием ее в электронной оптике, которая занимается формированием и фокусировкой пучков электронов (или ионов) для получения с их помощью изображений и созданием на этой основе новых электронных и ионных устройств.

References

1. *Afanas'ev V.P.* Electron and ion spectroscopy of solids // *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal*. — 1999. — № 2. — P. 110–116.
2. *Trifonov E.D.* Optical-mechanical analogy in exposition in students // *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal*. — 1997. — № 10. — P. 133–137.
3. *Zashkvara V.V., Korsunski M.I., Kosmachev O.S.* The focusing properties of electrostatic mirror with a cylindrical field // *Journal of technical physics*. — 1966. — Vol. 36. — № 1. — P. 132–138.

Репозиторий Карту