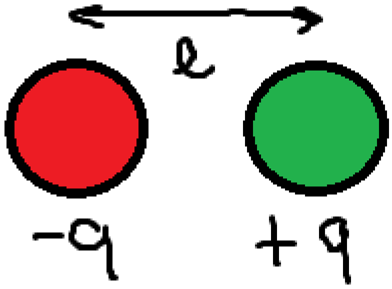
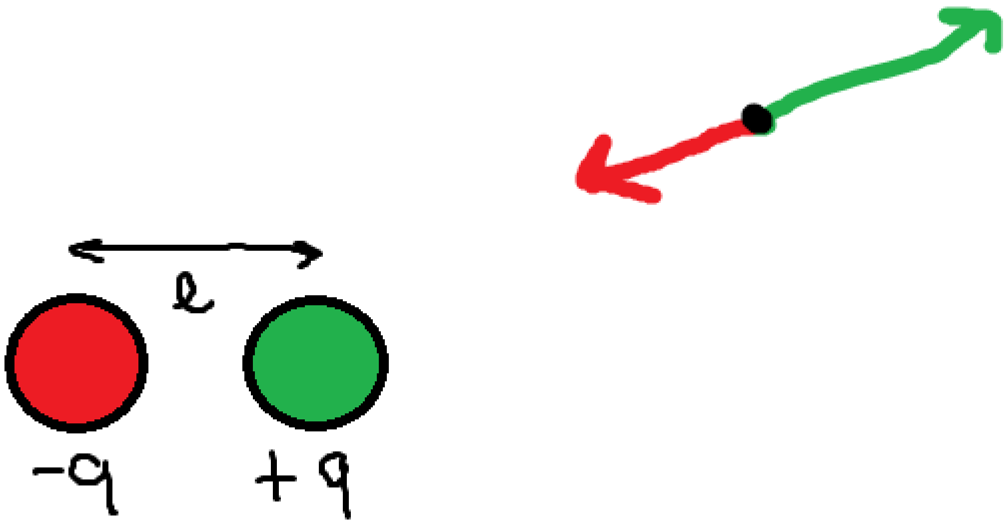
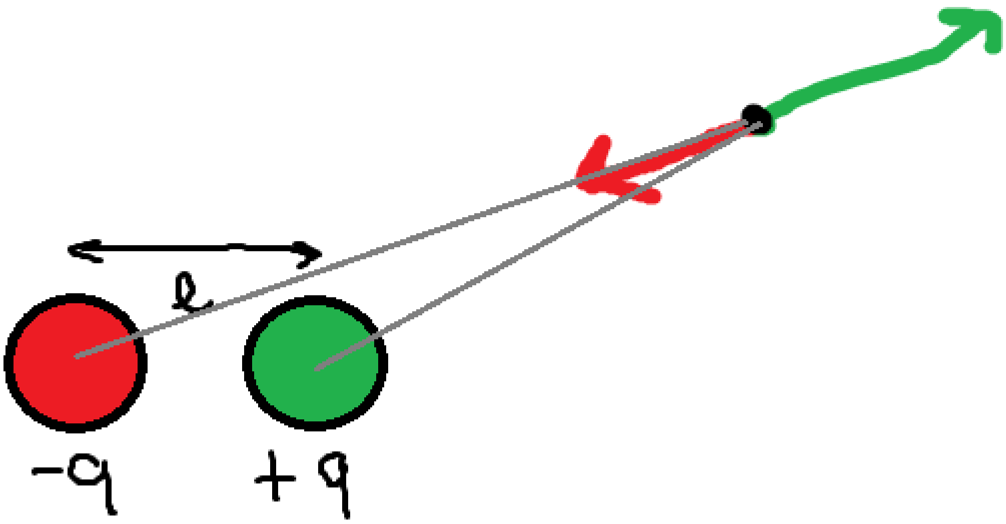
Диполь (не идеальный) – это два заряда, одинаковых по модулю, но противоположных по знаку, на расстоянии l друг от друга:



Рассмотрим точку вдали от системы и пробный заряд. Видно, что две напряжённости борются друг с другом:



Причём ненулевой результат будет получаться как раз в силу того, что заряды –q и +q разнесены в пространстве.



А что, если мы начнём q увеличивать, а заряды сближать? Тогда итоговая напряжённость будет вроде как падать (т.к. заряды будут сближаться, разность длин серых отрезков уменьшается), но в силу роста q вроде как увеличиваться.

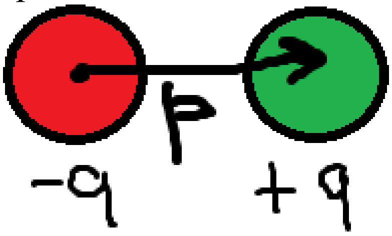
Оказывая, если устремить

$$q \to \infty, l \to 0$$

так, чтобы величина $ql = p$ (которая называется дипольным моментом) оставалась постоянной, то напряжённость будет записываться формулой

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) = C * \frac{3(\boldsymbol{pr})\boldsymbol{r} - r^2\boldsymbol{p}}{r^5}$$

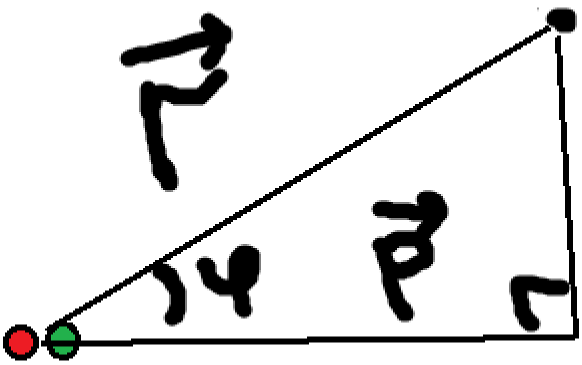
(вектор $\boldsymbol{p}$ дипольного момента направлен по прямой, соединяющей заряды, от отрицательного к положительному):



Для потенциала формула окажется красивее:

$$\varphi(\boldsymbol{r}) = C * \frac{\boldsymbol{pr}}{r^3}$$

Ответ получится красивей, если ввести угол между $\boldsymbol{p}$ и $\boldsymbol{r}$:



Тогда

$$\varphi(\boldsymbol{r}) = C * \frac{p\cos\varphi}{r^2}$$

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) = C * \frac{p}{r^3}\left(3\boldsymbol{e_r}\cos\varphi - \boldsymbol{e_p}\right)$$

Потенциал у диполя падает как $\frac{1}{r^2}$, а напряжённость как $\frac{1}{r^3}$. Так что если вы увидите что-то, чей потенциал в зависимости от расстояния зависит как $\frac{1}{r^2}$ - вероятно, это диполь ☺

Лаборант: Я вижу нечто! У нас нечто в комнате! У нечто есть потенциал!
Профессор: И какой?
Лаборант: Как $\frac{1}{r}$!
Профессор: Это заряд, успокойся.
Лаборант: Я вижу другое нечто! У него уже как $\frac{1}{r^2}$!
Профессор: Значит, диполь.

Замечание. В случае $q \to \infty, l \to 0$, как легко понять, сила Кулона будет возрастать как $\frac{1}{r^4}$. Что же будет удерживать заряды от аннигиляции?
У нас два выхода:

1) Вместо $q \to \infty, l \to 0$ устремить $r \to \infty$. Тогда расстояние l будет конечным, важно лишь $l \ll r$.
2) В реальных системах на маленьких расстояниях уже начнут действовать квантовые силы, которые будут препятствовать дальнейшему сближению. См., например, квадрупольный момент в ядрах.

Заключительное замечание: есть две буквы для обозначения дипольного момента, d («диполь» же, «д») и p. Даже я в своих методичках применяю оба обозначения. Ну, знайте, что порядка и однообразия тут нет ☺

Прежде чем мы продолжим говорить о диполе, давайте немного поговорим о философии электрического поля.

Вообще всё начиналось с закона Кулона в 8-м классе:
$$F = Cq_1q_2/r_{12}^2$$
Заметьте, что в нём нет поля – казалось бы, оно и не нужно.

В 10-м классе (или 11-м, у кого как) мы познакомились с напряжённостью:
$$F = Eq, E = \frac{Cq}{r^2}$$
Т.е. взаимодействие зарядов у нас происходит не напрямую, а через поле. Вопрос: а зачем оно нам нужно, если можно напрямик?

1) В дальнейшем оказалась, что полевая концепция открывает новые горизонты: уравнения Максвелла, квантовая теория поля и т.д.
Это всё будущее, но есть и текущая причина:
2) Поле позволяет удобно «конструировать» взаимодействие двух заряженных фигонь из двух частей:
одна фигня порождает поле
другая фигня на это поле реагирует

Мы уже знаем два типа «фигни» - заряды и диполи. Позже у нас появятся ещё магнитополи, а в электроде уже и квадруполи, и т.д, и т.п. Представляете, сколько видов взаимодействий у нас возможно:
заряд-диполь
диполь-диполь
магнитополь-магнитополь
И т.д. и т.п. Причём формулы будут невероятно противными.

Поэтому гораздо разумней их «конструировать» из 2 частей. Вот выше мы написали формулы, какое диполь создаёт поле:
$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) = C * \frac{3(\boldsymbol{pr})\boldsymbol{r} - r^2\boldsymbol{p}}{r^5}, \varphi(\boldsymbol{r}) = C * \frac{\boldsymbol{pr}}{r^3}$$
Я их называю создающими – потому что они позволяют посчитать, какое первая фигня создаст поле в точке второй фигни.

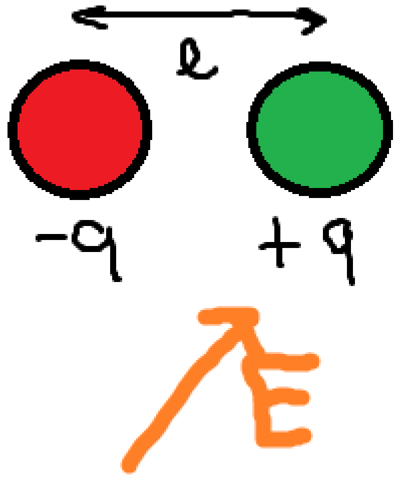
А вот оставшиеся формулы я называю действующими – они показывают, как поле действует на фигню.

В случае с точечными зарядами у нас была простая формула:

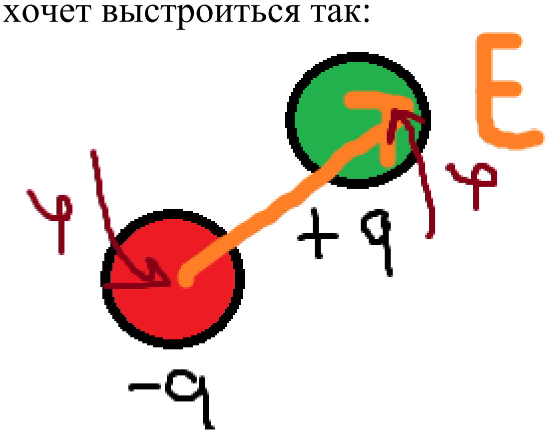
$$\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E}$$

Выясняется, что на диполь в электрическом поле обычная сила не действует. Зато действует момент силы.
Представьте себе, что вы выступаете перед аудиторией – а тут у вас парочка, сидящая рядом, начинает взасос целоваться. Неприятно. Заметьте, что вам всё равно, где она находится – вам всё равно будет неприятно. И вам захочется их развернуть так, чтобы они повернулись так, чтобы видели лишь спину ближайшего к вам ☺

В самом деле, положение диполя, как на рисунке



навряд ли устроит поле. q хочет подвинуться по полю, а –q против него. И диполь хочет выстроиться так:



Вот так ему будет идеально. Но для этого ему придётся подвинуться на угол φ.

Момент силы определяется по формуле (знак поставил наугад, лень проверять)

$$\boldsymbol{M} = [\boldsymbol{p}\mathrm{x}\boldsymbol{E}]$$

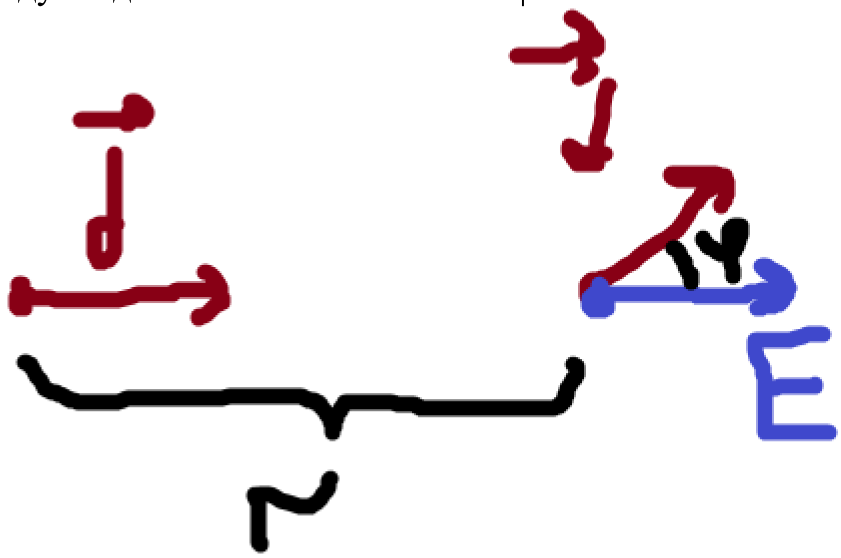
А потенциальная энергия

$$W = -\boldsymbol{pE}$$

Подытожим:

	Создаёт поле	Поле действует
Заряд q	$\varphi = \frac{C}{q}, E = \frac{Cq}{r^2}$	$\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E}$
Диполь p	$\varphi(\boldsymbol{r}) = C * \frac{\boldsymbol{pr}}{r^3}, \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) = C * \frac{3(\boldsymbol{pr})\boldsymbol{r} - r^2\boldsymbol{p}}{r^5},$	$\boldsymbol{M} = [\boldsymbol{p}\text{x}\boldsymbol{E}]$ $W = -\boldsymbol{pE}$

Задача: два диполя с дипольными моментами d разделены расстоянием r, угол между их дипольными моментами φ.



Найти модуль силы, действующую на второй диполь со стороны первого.

Решение: первый диполь создал в точке второго диполя напряжённость

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) = C * \frac{3(\boldsymbol{dr})\boldsymbol{r} - r^2\boldsymbol{d}}{r^5}$$

Т.к. $\boldsymbol{d}$ и $\boldsymbol{r}$ сонаправлены, запишем это как

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) = C * \frac{2d}{r^3}\boldsymbol{e_r}$$

А теперь вспомним действующую формулу:

$$\boldsymbol{M} = [\boldsymbol{d}\text{x}\boldsymbol{E}]$$

Т.к. между векторами в векторном произведении угол φ, получаем ответ

$$M = dE * \sin\varphi = C * \frac{2d^2}{r^3}\sin\varphi$$