Алгебра 2 2023 Кузнецов

1 Листок 1

1. Для каких натуральных n многочлен $\frac{x^n-1}{x-1} = 1+x+\ldots+x^{n-1}$ неприводим?

   По-видимому, имеется в виду неприводимость над полем $\mathbb{Q}$.

   Во-первых, заметим, что при $n = ab$ имеет место равенство

   $$1 + x + \ldots + x^{n-1} = (1 + x + \ldots + x^{a-1})(1 + x^a + \ldots + x^{a(b-1)}).$$

   Или без разложения:

   $$\frac{x^{ab}-1}{x-1} = \frac{x^a-1}{x-1}\frac{x^{ab}-1}{x^a-1}.$$

   Отсюда следует, что при составном n многочлен $\frac{x^n-1}{x-1}$ приводим.

   Теперь попробуем доказать, что при простом $n = p$ многочлен $\frac{x^n-1}{x-1}$ неприводим. Предположим, что

   $$\frac{x^p-1}{x-1} = u(x)v(x),$$

   где u, v — непостоянные многочлены с рациональными коэффициентами, причём будем считать, что их старшие коэффициенты равны 1, и u — непостоянный многочлен с рациональными коэффициентами наименьшей степени, делящий $\frac{x^p-1}{x-1}$. Тогда, что

   $$u(x) = (x - a_1) \ldots (x - a_k),$$

   где $a_1, \ldots, a_k$ — попарно различные нееединичные корни степени p из единицы. Поэтому все симметрические многочлены от $a_1, \ldots a_k$

   $$a_1 + \ldots + a_k,$$

   $$a_1a_2 + \ldots + a_{k-1}a_k,$$

   $$\ldots$$

   $$a_1 \ldots a_k$$

   рациональны — они являются коэффициентами многочлена u. Но тогда для любого натурального s

   $$u_s(x) = (x - a_1^s) \ldots (x - a_k^s)$$

— тоже многочлен с рациональными коэффициентами (поскольку все симметрические многочлены выражаются через элементарные), и он должен быть взаимно прост с u либо совпадать с u, ибо иначе наибольший общий делитель этих многочленов будет степени меньше степени u и будет делить многочлен $\frac{x^p-1}{x-1}$. Рассмотрим множество тех $s \in \{1, \ldots, p-1\}$, для которых

$$\{a_1^s, \ldots, a_k^s\} = \{a_1, \ldots, a_k\}.$$

Это подгруппа мультипликатиной группы $\mathbb{F}_p$. Значит, она циклическая, и есть $h \in \{1, \ldots, p-1\}$, таких, что она порождена h. Тогда

$$u(x) = (x-a)(x-a^h)(x-a^{h^2})\ldots(x-a^{h^t}).$$

Дальше я не знаю, как закончить это рассуждение. Поэтому будем решать по-другому. Попробуем применить критерий Эйзенштейна. $q(x) = \frac{x^p-1}{x-1}$ неприводим над $\mathbb{Q}$ тогда и только тогда, когда неприводим

$$q(x+1) = \frac{(x+1)^p - 1}{x} = x^{p-1} + C_p^{p-1}x^{p-2} + \ldots + C_p^2 x + p.$$

И применим критерий Эйзенштейна.

2. $x^n f(\frac{1}{x}) = c_0x^n + c_1x^{n-1} + \ldots + c_{n-1}x + c_n$ имеет с $f(x)$ общий корень — тот, который лежит на единичной окружности (если $|\alpha| = 1$ и $f(\alpha) = 0$, то $f(\frac{1}{\alpha}) = f(\overline{\alpha}) = 0$). Значит, эти многочлены не взаимно просты, и в силу неприводимости f должны иметь все корни общие. То есть эти многолены пропорциональны:

$$f(x) = tx^n f\left(\frac{1}{x}\right), t \in \mathbb{Q}.$$

Отсюда $c_k = tc_{n-k}$ для всех k. Отсюда $t^2 = 1$. Значит, $t = \pm 1$. Если $t = -1$, то многочлен f имеет корнем 1, что противоречит неприводимости. Значит, $t = 1$. Если n нечётно, $n = 2m+1$, то

$$f(x) = (x^{2m+1} + 1) + c_1(x^{2m} + x) + \ldots,$$

и этот многочлен имеет корень -1, что тоже невозможно в силу его неприводимости. Всё доказано.

3. а) Кажется, это известная теорема. Воспользуемся тем, что мультипликативная группа поля $\mathbb{F}_p$ циклическая. Значит, она порождается неким $g \in \mathbb{F}_p$. Тогда $\left(\frac{-1}{p}\right) = 1$ тогда и только тогда, когда для некоторого $s, 0 < s < p-1$ имеет место

$$g^{2s} = -1.$$

Из этого равенства следует $g^{4s} = 1$, и получаем:
$2s$ не делится на $p-1$, $4s$ делится на $p-1$.
Отсюда следует, что $p-1$ делится на 4. Пусть, напротив, $p-1$ делится на 4. Тогда возьмём $h = g^{\frac{p-1}{2}}$. Отсюда $h^2 = 1$. Поэтому $h = \pm 1$. Но $h = 1$ быть не может. так как g — первообразный корень.
б) Очевидно. следующие утверждения равносильны:

- $\left(\frac{-3}{p}\right) = 1$
- Многочлен $x^2 + 3$ приводим над $\mathbb{F}_p$
- Многочлен $(x+1)^2 + 3 = x^2 + 2x + 4$ приводим над $\mathbb{F}_p$
- Многочлен $(x-2)(x^2 + 2x + 4) = x^3 - 8$ разложим над $\mathbb{F}_p$
- Существует $\varepsilon \in \mathbb{F}_p, \varepsilon \neq 1$, такое, что $\varepsilon^3 = 1$ (поделить на 2 корни уравнения из предыдущего пункта)

Но мультипликативная группа поля $\mathbb{F}_p$ циклическая. Значит, она порождается неким $g \in \mathbb{F}_p$. Тогда $\varepsilon = g^s, 0 < s < p-1$. Но тогда $g^{3s} = 1$, и $3s \vdots p-1$. Если $p-1$ не делится на 3, то s делится на $p-1$, а такое невозможно в силу $0 < s < p-1$. Значит, $p-1$ делится на 3.

И обратно — если $p-1$ делится на 3, то можно положить

$$\varepsilon = g^{\frac{p-1}{3}}.$$

Звдача решена.

4. K содержит примитивный корень из 1 степени 8. Пусть это корень g. Ясно, что тогда $g^4 = -1, g^2 = -1/g^2$. Рассмотрев пример поля комплексных чисел, я подобрал такое:

$$(g + 1/g)^2 = g^2 + 2 + 1/g^2 = g^2 + 2 - g^2 = 2.$$

Теперь рассмотрим 4 случая:

- $p \equiv 1 (\mod 8)$. Тогда существует примитивный корень из 1 степени 8. Почему? Как мы помним, мультипликативная группа конечного поля $\mathbb{F}_p$ циклическая. Она порождена элементом $t \in \mathbb{F}_p$. Тогда $t^{\frac{p-1}{8}}$ и есть первообразный корень из 1 степени 8.
- $p \equiv -1 (\mod 8)$. Это более сложный случай. По задаче 3а, -1 является квадратичным невычетом в F_p. Значит, многочлен $x^2 + 1$ неприводим над F_p, и фактор $G = F_p[x]/(x^2+1)$ является полем из p^2 элементов. Обозначим в этом поле элемент x как i, $i^2 = -1$. Итак, $G = \{a + bi \mid a, b \in F_p\}$. Пусть g — первообразный корень в G (то есть порождающий элемент мультипликативной группы поля G). Положим

  $$h = g^{(p^2-1)/8}.$$

  Тогда $h^4 = -1$, h — примитивный корень из 1 степени 8 (но. к сожалению, он лежит не в поле F_p, а в его расширении).

  Утверждение 1.1. *Или $h + 1/h$, или $h - 1/h$ лежит в F_p.*

  Proof. h является корнем многочлена $x^4 + 1$. Вот 4 корня этого многочлена: $h, -h, 1/h, -1/h$. Легко видеть, что они все разные (если, например, $h = -1/h$, то $h^2 = -1$, а это противоречит равенству $h^4 = -1$). Итак,

  $$x^4 + 1 = (x-h)(x+h)(x-1/h)(x+1/h).$$

Но $F_p[h]$ — поле, которое строго больше F_p. но содержится в G. Значит, оно совпадает с G, ведь нет поля характеристики p с количеством элементов между p и p^2. Значит, любой элемент поля G представляется в виде $\alpha h+\beta, \alpha, \beta \in F_p$. Поэтому

$$h^2 = \alpha h + \beta, \alpha, \beta \in F_p.$$

Значит, многочлены x^4+1 и $x^2-\alpha x-\beta$ не взаимно просты. Поэтому x^4+1 делится на какой-то многочлен степени 2 с коэффициентами в F_p. Возможны лишь такие разложения x^4+1 в произведение многочленов второй степени (с коэффициентами из F_p):

$$x^4+1 = (x^2-h^2)(x^2-1/h^2),$$

$$x^4+1 = (x^2-(h+1/h)x+1)(x^2+(h+1/h)x+1),$$

$$x^4+1 = (x^2-(h-1/h)x-1)(x^2+(h-1/h)x-1).$$

Первый вариант не подходит, поскольку h^2 не может лежать в F_p, ведь его квадрат равен -1. Во втором и третьем вариантах либо $h+1/h$, либо $h-1/h$ лежит в F_p, Выяснить, какой же из этих вариантво реализуется, у нас получится позже. $\square$

Покажем, что не может быть $h-1/h \in F_p$. Пусть $g = u+vi, u, v \in F_p$. Тогда

$$\frac{1}{g} = \frac{u-vi}{u^2+v^2}.$$

Имеем

$$h-1/h = (u+vi)^{(p^2-1)/8} - \frac{(u-vi)^{(p^2-1)/8}}{(u^2+v^2)^{(p^2-1)/8}}.$$

Пусть $h = U+Vi = (u+vi)^{(p^2-1)/8}, U, V \in F_p$. Тогда

$$h-1/h = U+Vi - \frac{U-Vi}{(u^2+v^2)^{(p^2-1)/8}} = U+Vi + \frac{-U+Vi}{(u^2+v^2)^{(p^2-1)/8}}.$$

Это может лежать в F_p, только если

$$V + \frac{V}{(u^2+v^2)^{(p^2-1)/8}} = 0.$$

$V=0$ быть не может, ведь $U+Vi=h$, а h не лежит в F_p — потому что $h^4=-1$, а -1 у нас квадратичный невычет. Значит, на V можно сократить, и

$$(u^2+v^2)^{(p^2-1)/8} = -1.$$

Но у нас $(p^2-1)/8$ чётное, и из этого равенства следует. что -1 — квадратичный вычет по модулю p. А это неверно. Итак, $h-1/h$ не может лежать в F_p, и остаётся $h+1/h \in F_p$. Поскольку

$$(h+1/h)^2 = 2,$$

то всё доказано.

- $p \equiv -3(\mod 8)$. Предположим,
$$s^2 \equiv 2(\mod p).$$
По задаче 3а есть $j \in \mathbb{F}_p$, такое, что
$$j^2 \equiv -1(\mod p).$$
Рассмотрим $z = s\frac{1+j}{2}$. Тогда
$$z^2 = s^2\frac{j}{2} = j.$$
Отсюда ясно, что z — первообразный корень из 1 степени 8. Мультипликативная группа поля $\mathbb{F}_p$ циклическая. Она порождена элементом $t \in \mathbb{F}_p$. Тогда $z = t^k, 0 < k < p-1$. Отсюда $t^{8k} = 1$, $8k$ делится на $p-1$. Но $p-1$ не делится на 8. Значит, $4k$ делится на $p-1$, и $z^4 = 1$. Противоречие с первообразностью p.
- $p \equiv 3(\mod 8)$. Это самый сложный случай. Поначалу можно рассуждать, как в случае $p \equiv -1(\mod 8)$. По задаче 3а, -1 — квадратичный невычет в F_p. Поэтому так же рассматриваем расширение $G = F_p[x]/(x^2+1)$. В нём выбираем элемент g, порождающий мультипликативную группу G. Полагаем
$$h = g^{(p^2-1)/8}.$$
Как и раньше, $h^4 = -1$. Снова получаем, что либо $h + 1/h$, либо $h - 1/h$ лежит в F_p. И нам надо показать, что в этом случае $h - 1/h \in F_p$ (тогда получается. что -2 — квадратичный вычет в F_p, а раз -1 — невычет, то 2 — невычет).
Итак, покажем, что $h + 1/h \notin F_p$.
Пусть $g = u + vi, u, v \in F_p$. Тогда
$$\frac{1}{g} = \frac{u - vi}{u^2 + v^2}.$$
Имеем
$$h + 1/h = (u+vi)^{(p^2-1)/8} + \frac{(u-vi)^{(p^2-1)/8}}{(u^2+v^2)^{(p^2-1)/8}}.$$
Пусть $h = U + Vi = (u+vi)^{(p^2-1)/8}, U, V \in F_p$. Тогда
$$h + 1/h = U + Vi + \frac{U - Vi}{(u^2+v^2)^{(p^2-1)/8}}.$$
Это может лежать в F_p, только если
$$V - \frac{V}{(u^2+v^2)^{(p^2-1)/8}} = 0.$$
$V = 0$ быть не может, ведь $U + Vi = h$, а h не лежит в F_p — потому что $h^4 = -1$, а -1 у нас квадратичный невычет. Значит, на V можно сократить, и
$$(u^2+v^2)^{(p^2-1)/8} = 1.$$

На первый взгляд, тут нет никакого противоречия. Но добавим ещё такое замечание: u^2+v^2 должно быть первообразным корнем в F_p. Действительно, в поле G норма $\|a+bi\| = a^2+b^2 \in F_p$ мультипликативна (легко проверить). Чтобы порождать мультипликативную группу поля G, $g = u+vi$ должно обладать таким свойством, что $(u^2+v^2)^k, k \geq 0$ должно пробегать все элементы в F_p вида $a^2+b^2, a, b \in F_p$. Поскольку $a^2+b^2, a, b \in F_p$ пробегает все вычеты $\mod p$ (см. утвержение ниже), то u^2+v^2 — порождает мультипликативную группу F_p. А тогда $(u^2+v^2)^{(p-1)/2} = -1$, и в силу нечётности $\frac{p+1}{4}$

$$(u^2+v^2)^{(p^2-1)/8} = -1.$$

Противоречие.

Утверждение 1.2. *$a^2+b^2, a, b \in F_p$ пробегает все элементы F_p.*

Proof. Ясно, что в виде a^2+b^2 можно представить любой квадратичный вычет в F_p (надо взять $b=0$). Осталось показать, что в таком виде можно представвить хотя бы один квадратичный невычет $c \in F_p$ — ведь любой другой квадратичный невычет представляется в виде $cz^2, z \in F_p$ (потому что частное двух квадратичных невычетов — квадратичный вычет). Ясно. что есть квадратичный вычет s, такой, что $s+1$ — квадратичный невычет (если бы это было не так, то по индукции бы получили, что 0, 1, 2, ..., p-1 — все квадратичные вычеты, что неправда). Тогда $s = a^2, s+1 = a^2+1$, и мы представили квадратичный невычет s в виде суммы двух квадратов. Доказательство окончено. □

5. Ясно, что $K(\sqrt{a}+\sqrt{b}) \subseteq K(\sqrt{a}, \sqrt{b})$. Покажем, что

$$K(\sqrt{a}, \sqrt{b}) \subseteq K(\sqrt{a}+\sqrt{b}).$$

Имеем

$$\sqrt{a}-\sqrt{b} = \frac{a-b}{\sqrt{a}+\sqrt{b}} \in K(\sqrt{a}+\sqrt{b}).$$

Ну а тогда

$$\sqrt{a} = \frac{1}{2}((\sqrt{a}+\sqrt{b})+(\sqrt{a}-\sqrt{b})) \in K(\sqrt{a}+\sqrt{b}).$$

И аналогично для $\sqrt{b}$. А всё потому, что в поле характеристики, отличной от 2, элемент 2 обратим. А если характеристика поля равна 2, то это не обязательно так. Пример:

6. Потом.

7. q — степень простого числа. Сколько неприводимых многочленов степени 42 над F_q? Решим сначала, когда $q = p$ — простое число. Пусть P_k — произведение всех приведённых неприводимых многочленов степени k над F_p. Имеем тогда

$$x^{p^{42}} - x = P_1 P_2 P_3 P_6 P_7 P_{14} P_{21} P_{42},$$

$$x^{p^{21}} - x = P_1 P_3 P_7 P_{21}.$$

Отсюда

$$\frac{x^{p^{42}} - x}{x^{p^{21}} - x} = P_2 P_6 P_{14} P_{42}.$$

Далее,

$$x^{p^{14}} - x = P_1 P_2 P_7 P_{14},$$

$$\frac{x^{p^{42}} - x}{(x^{p^{21}} - x)(x^{p^{14}} - x)} = \frac{P_6 P_{42}}{P_1 P_7}.$$

Далее,

$$x^{p^{7}} - x = P_1 P_7,$$

$$\frac{(x^{p^{42}} - x)(x^{p^{7}} - x)}{(x^{p^{21}} - x)(x^{p^{14}} - x)} = P_6 P_{42}.$$

Далее,

$$x^{p^{6}} - x = P_1 P_2 P_3 P_6,$$

$$\frac{(x^{p^{42}} - x)(x^{p^{7}} - x)}{(x^{p^{21}} - x)(x^{p^{14}} - x)(x^{p^{6}} - x)} = \frac{P_{42}}{P_1 P_2 P_3}.$$

Далее,

$$x^{p^{3}} - x = P_1 P_3,$$

$$\frac{(x^{p^{42}} - x)(x^{p^{7}} - x)(x^{p^{3}} - x)}{(x^{p^{21}} - x)(x^{p^{14}} - x)(x^{p^{6}} - x)} = \frac{P_{42}}{P_2}.$$

Далее,

$$x^{p^{2}} - x = P_1 P_2,$$

$$\frac{(x^{p^{42}} - x)(x^{p^{7}} - x)(x^{p^{3}} - x)(x^{p^{2}} - x)}{(x^{p^{21}} - x)(x^{p^{14}} - x)(x^{p^{6}} - x)} = P_{42} P_1.$$

Но $P_1 = x^p - x$. Итак,

$$P_{42} = \frac{(x^{p^{42}} - x)(x^{p^{7}} - x)(x^{p^{3}} - x)(x^{p^{2}} - x)}{(x^{p^{21}} - x)(x^{p^{14}} - x)(x^{p^{6}} - x)(x^{p} - x)}.$$

Приравняем степени. Получаем, что количество многочленов, входящих в произведение P_{42}, равно

$$\frac{p^{42} - p^{21} - p^{14} + p^7 - p^6 + p^3 + p^2 - p}{42}.$$

Это как раз то, что мы искали. Но как быть для случая F_q?

Итак, решаем задачу в общем случае. Пусть Q_k — количество неприводимых многочленов степени k со старшим коэффициентом 1 над F_q, где q — степень простого числа. Напишем рекуррентные соотношения для Q_k:

$$Q_1 = q,$$

$$Q_k = q^k - \sum_{s=1}^{k} \sum_{\substack{0 < i_1 \le i_2 \le \ldots \le i_s \\ i_1 t_1 + \ldots + i_s t_s = k \\ t_1 + \ldots + t_s > 1}} \binom{Q_{i_1} + t_1 - 1}{t_1} \ldots \binom{Q_{i_s} + t_s - 1}{t_s}, k > 1.$$

Поясним, откуда берётся такая рекуррентная формула. Мы вычитаем из общего количества многочленов степени k со старшим коэффициентом 1 количество приводимых многочленов. Количество приводимых многочленов мы считаем с помощью суммирования по всевозможным разложениям на неприводимые множители. i_r соответствуют степеням неприводимых множителей, t_r — количество неприводимых многочленов степени i_r в разложении. $\binom{Q_{i_r}+t_r-1}{t_r}$ — это количество сочетаний с повторениями из Q_{i_r} различных неприводимых многочленов степени i_r по t_r.

А теперь определим последовательность многочленов $H_k(x)$:

$$H_1(x) = x,$$

$$H_k(x) = x^k - \\ -\sum_{s=1}^{k} \sum_{\substack{0<i_1\le i_2\le\ldots\le i_s \\ i_1t_1+\ldots+i_st_s=k \\ t_1+\ldots+t_s>1}} \frac{(H_{i_1}(x)+t_1-1)\ldots H_{i_1}(x)}{t_1!} \cdots \frac{(H_{i_s}(x)+t_s-1)\ldots H_{i_s}(x)}{t_s!},$$

$$k > 1.$$

Ясно, что $Q_k = H_k(q)$, причём, заметим, H_k не зависит от q. Если $q = p$ — простое, то, как мы видели,

$$Q_{42} = \frac{p^{42} - p^{21} - p^{14} + p^7 - p^6 + p^3 + p^2 - p}{42}.$$

Отсюда для простого p

$$H_{42}(p) = \frac{p^{42} - p^{21} - p^{14} + p^7 - p^6 + p^3 + p^2 - p}{42}.$$

Так как простых чисел бесконечно много, то

$$H_{42}(x) = \frac{x^{42} - x^{21} - x^{14} + x^7 - x^6 + x^3 + x^2 - x}{42}.$$

Значит,

$$Q_{42} = H_{42}(q) = \frac{q^{42} - q^{21} - q^{14} + q^7 - q^6 + q^3 + q^2 - q}{42}.$$

Ответ: количество неприводимых многочленов степени 42 над F_q со старшим коэффициентом 1 есть

$$\frac{q^{42} - q^{21} - q^{14} + q^7 - q^6 + q^3 + q^2 - q}{42}.$$

2 Листок 2

1. Не буду решать.

2. Степень расширения $[\mathbb{Q}[\sqrt{n_1},\ldots,\sqrt{n_m}]:\mathbb{Q}]$ равна произведению степеней $[\mathbb{Q}[\sqrt{n_1},\ldots,\sqrt{n_{s+1}}]:\mathbb{Q}[\sqrt{n_1},\ldots,\sqrt{n_s}]]$. А каждая из этих степеней — 1 или 2. Поэтому степень расширения $[\mathbb{Q}[\sqrt{n_1},\ldots,\sqrt{n_m}]:\mathbb{Q}]$ — это степень двойки. Если бы там был $\sqrt[3]{2}$, то было бы

$$[\mathbb{Q}[\sqrt{n_1},\ldots,\sqrt{n_m}]:\mathbb{Q}]=[\mathbb{Q}[\sqrt{n_1},\ldots,\sqrt{n_m}]:\mathbb{Q}[\sqrt[3]{2}]][\mathbb{Q}[\sqrt[3]{2}]:\mathbb{Q}].$$

Но $[\mathbb{Q}[\sqrt[3]{2}]:\mathbb{Q}]$ — это 3. А слева степень двойки, она на 3 не делится. Противоречие.

3. Работаем в поле разложения многочлена x^3-x-a. Имеем

$$x^3-x-a=(x-\alpha)(x-\beta)(x-\gamma).$$

Отсюда, приравнивая коэффициенты, получаем

$$\alpha+\beta+\gamma=0,$$

$$\alpha\beta+\beta\gamma+\alpha\gamma=-1,$$

$$\alpha\beta\gamma=a.$$

Далее, из предыдущих равенств

$$\alpha^2+\beta^2+\gamma^2=(\alpha+\beta+\gamma)^2-2(\alpha\beta+\beta\gamma+\alpha\gamma)=2,$$

$$\alpha^2\beta^2+\alpha^2\gamma^2+\beta^2\gamma^2=(\alpha\beta+\beta\gamma+\alpha\gamma)^2-2\alpha\beta\gamma(\alpha+\beta+\gamma)=1.$$

Теперь имеем

$$(3\alpha^2-1)(3\beta^2-1)(3\gamma^2-1)=27\alpha^2\beta^2\gamma^2-9(\alpha^2\beta^2+\alpha^2\gamma^2+\beta^2\gamma^2)+3(\alpha^2+\beta^2+\gamma^2)-1=27a^2-4.$$

Из равенств $\alpha\beta\gamma=a$, $\alpha^3-\alpha=a$ получаем

$$\alpha\beta\gamma=\alpha^3-\alpha,$$

$$\beta\gamma=\alpha^2-1.$$

Аналогично, $\alpha\beta=\gamma^2-1$, $\alpha\gamma=\beta^2-1$. Имеем

$$(\alpha-\beta)(\beta-\gamma)=\alpha\beta-\beta^2-\alpha\gamma+\beta\gamma=(\alpha+\gamma)\beta-\beta^2-\alpha\gamma=-2\beta^2-\alpha\gamma=-2\beta^2-(\beta^2-1)=1-3\beta^2.$$

Аналогично, $(\beta-\gamma)(\gamma-\alpha)=1-3\gamma^2$, $(\gamma-\alpha)(\alpha-\beta)=1-3\alpha^2$. Итак,

$$4-27a^2=(1-3\alpha^2)(1-3\beta^2)(1-3\gamma^2)=(\alpha-\beta)^2(\beta-\gamma)^2(\gamma-\alpha)^2.$$

Осталось показать, что $(\alpha-\beta)(\beta-\gamma)(\gamma-\alpha)$ лежит в F_p. Рассмотрим в поле разложения многочлена x^3-x-a, то есть $F_p[\alpha,\beta,\gamma]$, автоморфизм Фробениуса $x\to x^p$. Как известно, он оставляет на местах элементы F_p и только их. Кроме того, ясно, что корни многочлена x^3-x-a переходят в его же корни, поэтому α,β,γ переставляются этим автоморфизмом. Но поскольку эти корни не лежат в F_p, ни один из них не переходит в себя. А все перестановки множества из трёх элементов, не оставляюющие на месте ни один из них, чётные. Поэтому наш автоморфизм производит чётную перестановку α,β,γ, а значит, переводит $(\alpha-\beta)(\beta-\gamma)(\gamma-\alpha)$ в себя. А кто переходит в себя, тот лежит в F_p. Всё доказано.

4. Существует ли неприводимый над $\mathbb{Q}$ многочлен, который приводим над $\mathbb{F}_p$ для всех p? Да, существует, и это x^4+1. Докажем, что он приводим над $\mathbb{F}_p$ для любого p. Для $p=2$ это легко видеть. Для $p>2$ имеем несколько вариантов

   - 2 — квадратичный вычет по модулю p, $\alpha^2 = 2 \mod p$. Над $\mathbb{F}_p$

   $$(x^2-\alpha x+1)(x^2+\alpha x+1) = (x^2+1)^2-\alpha^2x^2 = \\ = x^4+2x^2+1-\alpha^2x^2 = x^4+2x^2+1-2x^2 = x^4+1.$$

   - -2 — квадратичный вычет по модулю p, $\alpha^2 = -2 \mod p$. Над $\mathbb{F}_p$

   $$(x^2-\alpha x-1)(x^2+\alpha x-1) = (x^2-1)^2-\alpha^2x^2 = \\ = x^4-2x^2+1-\alpha^2x^2 = x^4-2x^2+1+2x^2 = x^4+1.$$

   - И 2, и -2 — невычеты по модулю p. Тогда -1 — вычет. $\gamma^2=-1$. Над $\mathbb{F}_p$

   $$(x^2-\gamma)(x^2-1/\gamma) = x^4-(\gamma+1/\gamma)x^2+1 = x^4+1.$$

   Итак, приводимость над F_p доказана. А как проверить неприводимость над $\mathbb{Q}$? Предположим, что для $a_1, a_2, b_1, b_2 \in \mathbb{Q}$

   $$x^4+1 = (x^2+a_1x+b_1)(x^2+a_2x+b_2).$$

   Отсюда имеем

   $$x^4+1 = x^4+(a_1+a_2)x^3+(a_1a_2+b_1+b_2)x^2+(a_1b_2+a_2b_1)x+b_1b_2.$$

   Из сравнения коэффициентов при x^3 имеем

   $$a_2 = -a_1.$$

   Теперь из коэффициента при x

   $$a_1(b_2-b_1) = 0.$$

   Имеем два варианта

   - $a_1 = a_2 = 0$. Тогда

   $$b_1+b_2 = 0, b_1b_2 = 1.$$

   Этого для рациональных (и потому действительных) b_1, b_2 быть не может.

   - $b_1 = b_2$. Пусть $a = a_1 = -a_2, b = b_1 = b_2$. Имеем

   $$2b-a^2 = 0, b^2 = 1.$$

   Тогда $b = \pm 1$, $a^2 = \pm 2$, чего в рациональных числах не бывает.

   Итак, x^4+1 не раскладывается над $\mathbb{Q}$ в произведение двух квадратных трёхчленов. Остаётся проверить, что у него нет рациональных корней. Но у него их нет, у него ведь вообще нет действительных корней, тем более рациональных. Всё доказано.

3 Листок 3

1. $\alpha_1, \ldots, \alpha_n$ — корни $f(x)$, $p_m = \sum\limits_{i=1}^{n} \alpha_i^m$. Через $\det(u_1, \ldots, u_n)$ мы будем обозначать детерминант матрицы, образованной столбцами $u_1, \ldots, u_n$. Пусть A_i — это матрица

$$A_i = \begin{pmatrix} 1 & \alpha_i & \ldots & \alpha_i^{n-1} \\ \alpha_i & \alpha_i^2 & \ldots & \alpha_i^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_i^{n-1} & \alpha_i^n & \ldots & \alpha_i^{2n-2} \end{pmatrix}$$

Тогда детерминант, о котором речь в условии, это

$$\det(A_1 + A_2 + \ldots + A_n).$$

Его мы сейчас и посчитаем (и покажем, что он равен дискриминанту f). Детерминант суммы матриц можно записать так:

$$\det(A_1 + \ldots + A_n) = \sum_{i_1, \ldots, i_n} \det(A_{i_1,1}, A_{i_2,2}, \ldots, A_{i_n,n}).$$

Здесь $A_{i_s,s}$ — s-ый столбец матрицы A_{i_s}. Ну, то есть сумма всевозможных детерминантов матриц, в которых из одной из суммируемых матриц A_i взят первый столбец и поставлен на место первого столбца, из другой взят второй столбец и поставлен на место второго и т.д. Заметим, что в рссматриваемой сумме

$$\sum_{i_1, \ldots, i_n} \det(A_{i_1,1}, A_{i_2,2}, \ldots, A_{i_n,n}).$$

слагаемые, в которых некоторые i_s совпадают, обращаются в 0, поскольку любые два столбца каждой матрицы A_i пропорциональны. Значит, сумма на самом деле не по всем последовательностям из $1, \ldots, n$, а по всем перестановкам чисел $1, \ldots, n$. И эта сумма равна (выносим из столбцов множители вида α_i^k)

$$\sum_{i_1, \ldots, i_n} \det(A_{i_1,1}, A_{i_2,2}, \ldots, A_{i_n,n}) =$$
$$= \sum_{i_1, \ldots, i_n} \alpha_{i_2} \alpha_{i_3}^2 \ldots \alpha_{i_n}^{n-1} \det(A'_{i_1,1}, \ldots, A'_{i_n,n}).$$

Здесь

$$A'_i = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \ldots & 1 \\ \alpha_i & \alpha_i & \ldots & \alpha_i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_i^{n-1} & \alpha_i^{n-1} & \ldots & \alpha_i^{n-1}. \end{pmatrix}$$

Ясно, что $\det(A'_{i_1,1}, \ldots, A'_{i_n,n})$ равен знаку перестановки $i_1, \ldots, i_n$, который мы обозначим через $s(i_1, \ldots, i_n)$, умноженному на детерминант матрицы

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & \ldots & 1 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \ldots & \alpha_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_1^{n-1} & \alpha_2^{n-1} & \ldots & \alpha_n^{n-1} \end{pmatrix}$$

А детерминант этой матрицы — это определитель Вандермонда
$$V = \prod_{i<j}(\alpha_j - \alpha_i).$$
Итак,
$$\begin{aligned}\det(A_1 + A_2 + \ldots + A_n) &= \\ &= \sum_{i_1,\ldots,i_n} \alpha_{i_2}\alpha_{i_3}^2 \ldots \alpha_{i_n}^{n-1} \det(A'_{i_1,1},\ldots,A'_{i_n,n}) = \\ &= V \times \sum_{i_1,\ldots,i_n} s(i_1,\ldots,i_n)\alpha_{i_2}\alpha_{i_3}^2\ldots\alpha_{i_n}^{n-1}.\end{aligned}$$
Осталось найти
$$\sum_{i_1,\ldots,i_n} s(i_1,\ldots,i_n)\alpha_{i_2}\alpha_{i_3}^2\ldots\alpha_{i_n}^{n-1}.$$
Но это есть полное разложение определителя матрицы
$$\begin{pmatrix} 1 & \alpha_1 & \ldots & \alpha_1^{n-1} \\ 1 & \alpha_2 & \ldots & \alpha_2^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \alpha_n & \ldots & \alpha_n^{n-1} \end{pmatrix}$$
То есть
$$\sum_{i_1,\ldots,i_n} s(i_1,\ldots,i_n)\alpha_{i_2}\alpha_{i_3}^2\ldots\alpha_{i_n}^{n-1} = V.$$
В итоге,
$$\det(A_1 + A_2 + \ldots + A_n) = V^2 = \operatorname{disc}(f).$$

2. Найдём дискриминант многочлена $\frac{x^n-1}{x-1}, n > 2$. Для этого будем пользоваться формулой из предыдущей задачи. Пусть $\varepsilon_1,\ldots,\varepsilon_{n-1}$ — корни $\frac{x^n-1}{x-1}$. Пусть $\epsilon_0 = 1$.
$$p_m = \varepsilon_1^m + \ldots + \varepsilon_{n-1}^m.$$
Найдём p_m. Пусть $S_m = \sum\limits_{i=0}^{n} \varepsilon_i^m$. Тогда $p_m = S_m - 1$. Умножение на ε_k только переставляет ε_i, поэтому
$$\varepsilon_k^m S_m = S_m.$$
Значит, $S_m = 0$, если только не все $\varepsilon_k^m = 1$. Последнее бывает в случае m делящегося на n, и только. Итак, $p_m = -1$ при m не делящемся на n и $p_m = n-1$ иначе. Теперь наш определитель для дискриминанта принимает вид определителя матрицы $(n-1)\times(n-1)$
$$\begin{pmatrix} n-1 & -1 & -1 & \ldots & -1 \\ -1 & -1 & -1 & \ldots & -1 \\ -1 & -1 & -1 & \ldots & n-1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & -1 & n-1 & \ldots & -1 \end{pmatrix}$$

Несколько раз переставляя столбцы, можно добиться того, чтобы все $n-1$ стояли на главной диагонали, а все элементы вне главной диагонали были -1. Для этого надо сделать

$$(n-4)+(n-5)+\ldots+2+1=\frac{(n-4)(n-3)}{2}$$

перестановок столбцов. Итак, наш дискриминант равен

$$(-1)^{\frac{(n-4)(n-3)}{2}}\det\begin{pmatrix} n-1 & -1 & -1 & \ldots & -1 \\ -1 & -1 & -1 & \ldots & -1 \\ -1 & -1 & n-1 & \ldots & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & -1 & -1 & \ldots & n-1 \end{pmatrix}$$

Теперь отнимаем второй столбец от всех остальных и получаем

$$(-1)^{\frac{(n-4)(n-3)}{2}}\det\begin{pmatrix} n & -1 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & -1 & n & \ldots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & -1 & 0 & \ldots & n \end{pmatrix}$$

Теперь меняем знак у второго столбца и переставляем первый и второй столбцы, получаем

$$(-1)^{\frac{(n-4)(n-3)}{2}}\det\begin{pmatrix} 1 & n & 0 & \ldots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \ldots & 0 \\ 1 & 0 & n & \ldots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \ldots & n \end{pmatrix}$$

Вынося n из всех столбцов, кроме первого, получаем

$$(-1)^{\frac{(n-4)(n-3)}{2}}n^{n-2}\det\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & \ldots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \ldots & 0 \\ 1 & 0 & 1 & \ldots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \ldots & 1 \end{pmatrix}$$

Теперь от первого столбца отнимаем все остальные столбцы, получаем

$$(-1)^{\frac{(n-4)(n-3)}{2}}n^{n-2}\det\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \ldots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \ldots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & 1 \end{pmatrix}$$

Ну а оставшийся детерминант равен -1 (можно переставить первые два столбца, будет единичная матрица), поэтому получаем ответ.
Ответ: $\operatorname{disc}(\frac{x^n-1}{x-1})=(-1)^{\frac{(n-3)(n-4)}{2}+1}n^{n-2}=(-1)^{\frac{n(n+1)}{2}+1}n^{n-2}$.

3.

4.

5.

6.

7. Автоморфизм поля $\overline{\mathbb{F}}_p$, не являющийся степенью автоморфизма Фробениуса. Алгебраическое замыкание поля $\mathbb{F}_p$ можно представить как объединение последовательности вложенных друг в друга полей $\mathbb{F}_{p^{n!}}$. На каждом из этих полей можно задать какой-то автоморфизм, но он с необходимостью будет степенью автоморфизма Фробениуса. Значит, единственная возможность — задать согласованно на этих подполях степени автоморфизма Фробениуса, но так, чтоб эти степени были разные, но при этом автоморфизмы были согласованы.

   Теперь опишем решение формально. Пусть

$$k_n = 1 + p^{1!} + p^{2!} + \ldots + p^{(n-1)!}.$$

   Зададим на вложенных друг в друга $\mathbb{F}_{p^{n!}}$ полях аввтоморфизм ϕ так:

$$\phi(x) = x^{p^{k_n}}, x \in \mathbb{F}_{p^{n!}}.$$

   Согласованность следует из того, что при $m > n$ $k_m - k_n$ делится на $n!$ Значит, автоморфизм ϕ на $\overline{\mathbb{F}}_p$ определён корректно, а быть фиксированной степенью M автоморфизма Фробениуса он не может, так как на $\mathbb{F}_{p^{n!}}$ при больших n минимальная степень Фробениуса, которой является наш автоморфизм, есть $k_n < p^{n!}$ (то есть наш автоморфизм на $\mathbb{F}_{p^{n!}}$ есть степень k_n автоморфизма Фробениуса, или $k_n + n!$, или $k_n + 2n!$, или $\ldots$, но никак не нечто иное).

4 Листок 4

1.

2.

3. $E \subset F \subset K$ — поля, $[K : E] < \infty$.
   а) Если K/E нормально, то и K/F нормально. Итак, пусть K/E нормально. Покажем, что K/F нормально. Пусть f — неприводимый над F многочлен, имеющий корень k в K. Нам надо показать, что все корни f лежат в K. Пусть g — минимальный многочлен k над E. Тогда все корни g лежат в K, поскольку K/E нормально. Но f — минимальный многочлен k над F, а g — это тоже многочлен с коэффициентами из F, такой, что $g(k) = 0$. Значит, g делится на f. Поэтому все корни f лежат среди корней g, и, значит, они все лежат в K.
   б) Если K/F нормально и F/E нормально, верно ли, что K/E нормально? Приведём пример, когда это не так. Пусть $E = \mathbb{Q}$, $F = \mathbb{Q}[\sqrt{2}]$, $K = \mathbb{Q}[\sqrt[4]{2}]$. Тогда F/E нормально, поскольку $\mathbb{Q}[\sqrt{2}]$ — это поле

разложения x^2-2 над $\mathbb{Q}$. K/F нормально, поскольку $\mathbb{Q}[\sqrt[4]{2}]$ — это поле разложения $x^2-\sqrt{2}$ над $\mathbb{Q}[\sqrt{2}]$. Но K/E — не нормально, поскольку неприводимый над $\mathbb{Q}$ многочлен x^4-2 имеет корень $\sqrt[4]{2}$ в поле $\mathbb{Q}[\sqrt[4]{2}]$, но его корень $i\sqrt[4]{2}$ не лежит в этом поле, ведь он мнимый, а поле $\mathbb{Q}[\sqrt[4]{2}]$ вкладывается в $\mathbb{R}$.

4.

5. Существует конечно много полей K, таких, что $F \subset K \subset F(a,b)$. Рассмотрим для каждого $f \in F$ поле $F(a+fb)$. Таких различных полей конечно много, поэтому для каких-то двух различных $f_1, f_2 \in F$ имеет место $F(a+f_1b) = F(a+f_2b)$. Тогда $a+f_2b \in F(a+f_1b)$. Но тогда $a, b \in F(a+f_1b)$. Вот и всё, $F(a,b) = F(a+f_1b)$.

6. $F(\alpha)$ — конечное раширение F. Покажем, что существует лишь конечное число промежуточных полей $F \subset K \subset F(\alpha)$. Как сказано в указании, рассмотрим для каждого такого поля K минимальный многочлен f_K элемента α над K. Таких многочленов конечно много, поскольку все они делят f_F. Теперь покажем, что многочлен f_K однозначно определяет поле K. Пусть K_1 — расширение F, порождённое коэффициентами многочлена f_K. Тогда K_1 лежит в K. Является ли f_K минимальным многочленом для α над K_1? Если нет, то существует многочлен g меньшей степени с коэффициентами в K_1, такой, что $g(\alpha) = 0$. Но коэффициенты этого многочлена лежат и в K, поскольку K содержит K_1, а это противоречит тому, что f_K — минимальный многочлен для α над K. Противоречие. Итак, f_K — минимальный многочлен для α над K_1, Значит,

$$[F(\alpha) : K_1] = \deg f_K = [F(\alpha) : K].$$

Но тогда, применяя лемму о башне, получаем

$$[K_1 : F] = [K : F].$$

А из вложенности K_1 в K следует, что $K_1 = K$. Итак, по минимальному многочлену f_K поле K однозначно восстанавливается как минимальное расширение F, содержащее все коэффиценты f_K. Поэтому и промежуточных полей конечно много, как и минимальных многочленов.

7. Предъявим беконечно много полей K, таких, что

$$\mathbb{F}_p(x^p, y^p) \subset K \subset \mathbb{F}_p(x,y).$$