01) Определение алгебры кватернионов. Векторное произведение. Сопряжённый кватернион. Норма кватерниона. Мультипликативность нормы. Сумма четырёх квадратов.
$uv = -\langle u,v\rangle + [u,v]$; $||x|| = \sqrt{\det x}$; $n_1\, n_2 = ||a||^2\, ||b||^2 = ||ab||^2$.

02) Свойства сопряжения и векторного произведения.
Определение $\overline{x}$. Важные выражения: $[v,v], [v,u]+[u,v]$, для чисто мнимых: $u^2, u[u,v], ||[u,v]||$.

03) Кватернионы и вращения R^3
H_1; $t = a + bu$, условия на u, a^2+b^2; $xy = [x,y]$; $x^{-1}, \overline{x}$; $x^2, ||x||$; $||a+bx||$. Определение угла, поворота.

04) Максимум квадратичной формы на сфере. Теорема Куранта-Фишера.
Норма и матанализ. Собственные числа. Подпространства размерности k.

05) Оценка на собственные числа ограничения. Оценка на след.
1. С.ч. операторов A и B. По КФ, мин/макс для μ_i берется по подпр. внутри соотв. подпр. для λ (NB: λ_{i+n-m}). 2. Это след: взять матрицу A в ортонорм. базисе u_i. $v_i = (0,\dots,1,\dots,0)^T$ $A_{i,i} = v_i^T A v_i = q(u_i)$. Оценка: почленные нер-ва из 1.

06) Метод главных компонент.
$a_0 = \frac{1}{s}\sum x_i$: $\langle u_1,\dots,u_k\rangle = L_0$, ортонорм, доп. до базиса, $\sum\limits_j ||pr_{L_0^\perp}(x_j - a)||^2 = \sum\limits_j(\sum\limits_{i=k+1}^{n}(x_{j,i}-a_i)^2)$, произв. L_0: S $= \sum\limits_{i=1}^{s} ||pr_{L_0}(x_i)||^2 \to max$; $X = (x_1,\dots,x_s)^T$. $S = \sum\limits_{i=1}^{k} q(u_i) = Tr\, q(x)|_{L_0}$, $q(u) = u^T X^T X u$. Макс. по КФ на $\langle v_1,\dots,v_k\rangle$

07) Сингулярные значения и SVD-разложение.
$X^* = X^\top, \langle X^* e_i, e_j\rangle = \langle e_i, Xe_j\rangle, \sigma_i = \sqrt{d_i} > 0$ с.ч. A^*A. SVD $A\colon U \to V$ $\exists$ о/н u_i, v_j: матр $A = \Sigma(\sigma_{1..r}$ на диаг) $(X = L\Sigma R)$. e_i – о/н с.в. $\langle Ae_i, Ae_j\rangle = \langle A^*Ae_i, e_j\rangle = \langle d_i e_i, e_j\rangle, f_i = \frac{Ae_i}{\sqrt{d_i}}$ доп до базиса. $R = C^{-1} = C^\top, C$ столбцы e_i.

08) Приближение матрицей указанного ранга и SVD-разложение. Возможность применения к сжатию изображения.
pr из Б6 $\Leftrightarrow$ ближ по $||X||_F = \sqrt{\mathrm{Tr}\, X^\top X}$. $X = L\Sigma R$. pr на $\langle v_1^\top..v_k^\top\rangle$. v_i базис $X^\top X$ и строки R. pr a на $V^{(k)} = \sum a v_i v_i^\top$. $X^{(k)} = L\Sigma(\sum R v_i v_i^\top) = L\Sigma R^{(k)} = L\Sigma^{(k)} R$. Сж $L^{(k)}\Sigma^{(k)}R^{(k)}$. $2kn + k \to 2kn$ при $k < \frac{n}{2}$. Минор $k^2 + 2k(n-k) + 2k$.

09) Положительные матрицы. Теорема Перрона.
Док-во Перрона: полож-ть $(A|x| \geq |x| \Rightarrow Ay > \varepsilon z, z = A|x| \Rightarrow A|x| < \frac{A^n}{(1+\varepsilon)^n}A|x| \to 0$ противореч.), ед-ть (сонапр. коорд. $v \Leftarrow \sum\limits_j A_{kj}|v_j| = |\sum\limits_j A_{kj}v_j|$) и некратность (Жорд. клетки; либо $\exists c, i : |x_1 - cx_2|_i = 0$, либо $Ax_2 = x_2 + x_1$)

10) Единственность положительного собственного вектора. Применение к случайному блужданию.
1. См. $\lambda x^\top y$. 2. Знаем предел $\lim\limits_{k\to\infty} A^k v$, если у A макс по модулю с. ч. $\lambda = 1$ кратности 1. $P(G)$: $P_\alpha(G) = (1-\alpha)P(G) + \alpha\frac{1}{n}J$, $\alpha \in (0,1)$, $\forall i,j$ $J_{ij} = 1$ – а это норм, Перрон гарантирует (см $(1,\dots,1)$).

11) Неориентированные графы. Собственные числа связного графа. Два примера.
Шпаргалка: $(A+\varepsilon I)^l > 0$ при $l \geq diam(G)$ и понятны с.ч. Применим т. Перрона. Примеры: $A(K_n) = J - I$, A(цикл) $= C + C^{-1}$

12) Сильно регулярные графы. Граф Петерсона и его спектр. Двудольность и спектр.
$A^2 + (\mu-\lambda)A + (\mu-k)E = \mu J$, $A^2_{|U} + (\mu-\lambda)A_{|U} + (\mu-k)E = 0$ для $U =< (1,\cdots,1) >^\perp$
След степени == количество циклов == сумма собственных чисел с учетом кратности. λ для $(v,\, w)$, $-\lambda$ для $(v,\, -w)$

13) Две оценки на размер максимального независимого множества.
Натянуть подпространство на множество, следствие из КФ, нулевая квадратичная форма
Характеристический вектор множества, разложить по ортонорм. базису регулярного(!) графа с $u_1 = (1,\cdots,1)\frac{1}{\sqrt{n}}$

14) K_{10} не покрывается тремя Петерсонами.
$\sum\limits_{i=1}^{3} A_i = B$. Все рег $\Rightarrow$ общий с.в. $(1,\dots,1)$ для P с.ч. 3, для полного с.ч. 9. Сузим. Для A_1 и A_2 подпр. порожд. с.в. с с.ч. 1 $\cap$. Распишем для u из $\cap$. $Bu = -u$ (натянуто на с.в. с с.ч. -1). $\Rightarrow$ с.в. для A_3 с с.ч. -3. Такого с.ч. нет.

15) Тензорное произведение. Существование.
$\cong K\langle V_1\times\cdots\times V_n\rangle / K\{(..\lambda v + u..) - \lambda(..v..) - (..u..)\} = T$. $\forall h\colon K\langle\times V_i\rangle \to U$ $\exists!\hat{h}\colon \otimes V_i \to U$, $\hat{h}\circ i = h$, $\hat{\hat{h}}((v_1,..)) = h(v_1,..)$ однозначно и пропускается через T, т. к. все соотн в ядре (проверить). $\hat{h}(v_1\otimes ..) = \hat{\hat{h}}((v_1,..))$. h – полилин, $\hat{h}$ – лин.

16) Единственность тензорного произведения. Размерность тензорного произведения.
Единств: рассм полилин отобр i_1 и i_2 для $\otimes_1$ и $\otimes_2$ из опр. $\exists! \hat{i}_1, \hat{i}_2 \colon \hat{i}_1 \circ i_2 = i_1, \hat{i}_2 \circ i_1 = i_2$. Д-ть, что $\hat{i}_1 \hat{i}_2 = \mathrm{Id}$. Разм: $e_{1j_1} \otimes \dots \otimes e_{1j_n}$ порожд (раскр по полилин). $\mathrm{Hom}(V_1, \dots, V_n, K) \cong \mathrm{Hom}(V_1 \otimes \dots \otimes V_n, K) \cong V_1 \otimes \dots \otimes V_n$.

17) Тензорное произведение линейных отображений. Кронекерово произведение. Тензорное произведение операторов и его собственные числа. Категорное произведение графов.
Единств: определено на тензорятах; $\exists$: отобразить $U_1 \times \dots \times U_k$ в $V_1 \otimes \dots \otimes V_K$ полилин. (композ полилин.) $\Rightarrow$ (опр. тенз.) $\exists!$. Наше правило подходит. Матрица: расписать $(\sum\limits_k A_{k,i} f_k) \otimes (\sum\limits_l B_{l,j} f_l')$. С.ч. $A \otimes B$: жорданов базис.

18) Канонические изоморфизмы для тензорного произведения.
3. $\mathrm{Hom}(U, V) \cong V \otimes U^*$: $v \times f \to (u \to f(u)v)$. 4. $\mathrm{Hom}(U \otimes V, W) \cong \mathrm{Hom}(U, \mathrm{Hom}(V, W))$: $L_1 :\ L \to (u \to (v \to L(u \otimes v)))$, $L_2 :\ L \to (u \otimes v \to (L(u))(v))$, они обратны. 5. $U^* \otimes V^* \to (U \otimes V)^*$: $f \otimes g \to (u \otimes v \to f(u)g(v))$ базис в базис

19) Тензоры. Примеры. Координаты тензора. Замена переменной – случай тензора валентности (1,0).
$(p, 0)$ — полилин. форма, $(1, 1)$ — лин. оп-р, $(2, 1)$ — структ. алгебры. Переход: $x_{new} = Cx_{old}$. $e_i = \sum_{j=1}^n C_{ji} \hat{e}_j$, хотим $D : e^i = \sum D_{ji} \hat{e}^j$. $e^k(e_i) = \delta_{ki} \Rightarrow \delta_{ki} = \sum_j C_{ji} \sum_l D_{lk} \hat{e}^l(\hat{e}_j) = \sum_{j,l} C_{ji} D_{lk} \cdot \delta_{lj} = \sum_j C_{ji} D_{jk}$ $E_n = C^T D \Rightarrow D = (C^{-1})^T$

20) Замена переменной – общий случай.
$T = \sum\limits_{\substack{i_1', \dots, i_q' \in \overline{1,n} \\ j_1', \dots, j_p' \in \overline{1,n}}} T^{i_1', \dots, i_q'}_{j_1', \dots, j_p'} e^{j_1', \dots, j_p'}_{i_1', \dots, i_q'}$. $e_i = \sum\limits_{j=1}^n C_{ji} \hat{e}_j$ и $e^i = \sum D_{ji} \hat{e}^j$. Раскрыть скобки, поменять суммирование. Должно получиться $\hat{T}^{i_1, \dots, i_q}_{j_1, \dots, j_p} = \sum\limits_{\substack{i_1', \dots, i_q' \in \overline{1,n} \\ j_1', \dots, j_p' \in \overline{1,n}}} \prod\limits_{t \in \overline{1,p}} D_{j_t, j_t'} \prod\limits_{s \in \overline{1,q}} C_{i_s, i_s'}\ T^{i_1', \dots, i_q'}_{j_1', \dots, j_p'}$.

21) Тензорная алгебра. Свёртка и след.
Для $(1, 1)$ $T = \sum_{i,j} T^i_j e^j \otimes e_i$. Тогда $Conv(T) = \sum_{i,j} T^i_j e^j(e_i) = \sum_i T^i_i$.. $V^* \otimes V \cong \mathrm{Hom}(V, V) \Rightarrow$ это след.

22) Внешняя и симметрическая степень. Примеры. Лемма о проекторе для внешней степени. Формулировка для симметрической степени.
Примеры: (косо)симметрические билинейные формы, формы объёма, однородные многочлены.

23) Базис внешней степени. Формулировка для симметрической степени.
Смотрим на образ Alt на базисных векторах тензорного произведения.

24) Внешняя степень линейного отображения. Универсальное свойство внешней степени.
Универсальное свойство: смотрим на линейное из тензорного произведения, огранчиваем на внешнюю степень.

25) Внешняя алгебра и её свойства. Формулировка для симметрического случая.
$f \wedge g = Alt(f \otimes g)$. Показать, что $Alt(Alt(T_1) \otimes T_2) = Alt(T_1 \otimes T_2) = Alt(T_1 \otimes Alt(T_2))$. Проверить свойства на базисе.

26) Определитель. Формула Бине-Коши.
$\Lambda^n L$: $\Lambda^n V \to \Lambda^n U, Le_j = \sum\limits_i A_{ij} f_i, \Lambda^n L(e_1 \wedge \dots \wedge e_n) = \det A f_1 \wedge \dots \wedge f_n$ рассм коэф при $f_{i_1} \wedge \dots \wedge f_{i_n}$, привести к $f_1 \wedge \dots \wedge f_n$, мультипл. Бине-Коши $A \in M_{mn}, B \in M_{nm}$ $\det AB = \sum\limits_{|\Gamma| = m} \det A_\Gamma \det B^\Gamma, \Gamma \subset \{1, \dots, n\}$. $\Lambda^m B, \Lambda^n A$ коэф.

27) Лемма Гаусса. Содержание многочлена. Делимость в $Q(R)[x]$ и в $R[x]$.
Лемма: Пусть нет, возьмём $\min a_i, b_j \not\vdots\, p$, тогда $c_{i+j} \not\vdots\, p$. Содержание: поделим на $\mathrm{cont}\, g, h$, убедимся что $\mathrm{cont}\, f = 1$. Лемма про $Q(R)[x]$: d_1, d_2 — НОК знаменателей, $c = \frac{d_1}{d_2}$.

28) Факториальность кольца многочленов над факториальным кольцом.
$R[x]$ факториально и простые в нём: $f = p \in R$, f : $\mathrm{cont}(f) = 1$ — непр. в $Q(R)[x]$. 1) Б27 2) в них раскладывается, посмотрим в $Q(R)$, $g = \frac{a_1}{a_2} fq \Rightarrow \frac{a_1}{a_2} q \in R[x]$ (т.к. $\mathrm{cont}(q) \vdots\, a_2$) 3) $f = a \prod g_i$

29) Редукционный признак неприводимости. Примеры. Признак Эйзенштейна.
1. $a_n \not\vdots\, p$, f - неприводим в $R/p[x] \Rightarrow$ неприводим над $Q(R)$. $cont = 1$ и непр-ть над $Q(R) \Rightarrow$ непр-ть над R (см. степени g и h). 2. $a_n \not\vdots\, p$, все $a_i \vdots\, p$ $i < n$, но $a_0 \not\vdots\, p^2$, то многочлен $f(x)$ неприводим. Пусть $b_0 \not\vdots\, p$, см. $\min c_s \not\vdots\, p$ и a_s.

30) Алгоритм Кронекера. Сведение для многочленов от нескольких переменных.
1) Перебираем наборы делителей $f(i), 0 \le i \le \frac{deg f}{2}$, интерполируем, проверяем. 2) Различным разложениям $f(x_1, \dots, x_n)$ соответствуют различные разложения $f(x, \dots, x^{d^{n-1}})$ для d больших $\max_{i=1}^n \{\deg_{x_i} f\}$. Рассмотреть образ x^α.

31) Лемма Гензеля. Разложение на множители при помощи леммы Гензеля.

Доказательство леммы: Индукция по k. Строим для $k+1$. Помним, что $\forall f:\ p^k f \equiv p^k \overline{f} \pmod{p^{k+1}}$.
$\overline{h} \equiv \hat{h} + p^k a(x) \Rightarrow \overline{h}\overline{g} \equiv \hat{g}\hat{h} + p^k(a(x)g + b(x)h)$. С другой стороны $f - \hat{g}\hat{h} = p^k c(x) \Rightarrow a,\ b$ берем из лп НОДа g и h

32) Степенные суммы. Тождество Ньютона.
$0 = (-1)^n n\sigma_n + \sum_{k=0}^{n-1}(-1)^k \sigma_k s_{n-k}$, в многочлен подставим корни, просуммируем по всем корням, отдельно случаи $k < n$ - добавим нулевые переменные, $k > n$ - занулим не входящие в моном переменные

33) Целые алгебраические элементы. Замкнутость относительно операций.
a алгебраический == $\exists f \in \mathbb{Z}[x] : f(a) = 0$. Замкнуто: $\prod(x - (a_i + b_j))$ симметрично по $_i$, тогда коэффициенты выражаются через симметрические, симметрический по b_i - все коэффициенты целые.

34) Результант. Совпадение двух определений (без лемм).
Общий множитель $\leftrightarrow fk_2 - gk_1 = 0$, $\deg k_2$ меньше $\deg g$. Построить матрицу $(k(x), l(x)) \to k(x)f(x) + l(x)g(x)$. Оба опр. – многочлены от коэф. $\leftrightarrow$ симм. многочлены от корней. $DetS \,\vdots\, a_n^m b_m^n$ и $(x_i - y_j)$ (взимно просты). Применяем $\downarrow$

35) Леммы про результант. Дискриминант, его смысл. Вычисление через результант.
$a_n^m b_m^n \prod_{i,j}(x_i - y_j) = (-1)^{mn} b_m^n \prod f(y_j) = a_n^m \prod g(x_i)$., дает, что Res однородный многочлен степени m по a и n по b.
$D(f) = a_n^{2n-2}\prod_{i<j}(x_i - x_j)^2$. $Res(f, f') = (-1)^{\frac{n(n-1)}{2}} a_n D(f)$. (т.к. $f'(x_i) = a_n \prod_{j<i}(x_i - x_j)$. + лемма).

36) Степень расширения. Теорема о башне полей.
Степень расширения – размерность L как вект. пр. над K. $[M:K] = [M:L][L:K]$. Взять базисы u_i и v_j: M над L и L над K. Новый базис – $u_i v_j$.

37) Описание наименьшего подрасширения, содержащего данный элемент.
$K(\alpha) \cong K[\alpha] \cong K[x]/p(\alpha)$, рассмотрим $K[x] \to L$, переводящий $x \to \alpha$ и $K[x]/p(x) \to L$. Следствия про равенство степеней расширения над K и изоморфность расширений для корней неприводимого многочлена.

38) Построение при помощи циркуля и линейки. Пример неразрешимого построения.
x – построимо $\Rightarrow$ оно алгебраическое и лежит в расширении $L/\mathbb{Q}$ степени 2^n. Докажем индукцией по числу построений, рассмотрим уравнение пересечения с новым объектом степени 2. $\cos\frac{\pi}{9}$ – корень уравнения $4x^3 - 3x = \frac{1}{2}$.

39) Конечные поля. Число элементов. Основное уравнение. Эндоморфизм Фробениуса. Корни $x^{p^n} - x$ образуют подполе.
1. Содержит Z/p 2. p^n эл-тов (см. как п/г по +) 3. См. на мультипл. группу. Теорема Ферма для групп. 4. Биномиальный коэф. делится на p почти всегда. 5. Аккуратно всё проверить.

40) Основная теорема про конечные поля.
Поле разложения $x^{p^n} - x \to$ подполе из p^n элементов. Взять образующий группы, найти мин. многочлен, найти его корень в другом поле (через делимость). И проверить на изоморфизм "образующий группы в корень" – техника.

41) Подполя данного конечного поля. Описание автоморфизмов F_p^n.
1. $\mathbb{F}_{p^n} \in \mathbb{F}_{p^m}$: а) Башня б) см. $\{x \in \mathbb{F}_{p^m} | x^{p^n} - x = 0\}$, это подполе, p^n эл-тов, т.к. $x^{p^m} - x \,\vdots\, x^{p^n} - x$ и первый раскладывается на лин. множители. 2. $\mathbb{F}_q = F_p[\alpha]$, где степень мин. f для α равна n, а авт-м задаётся образом корня.

42) Расширения поля F_q . Неприводимые многочлены как делители $x^{q^d} - x$.
1. $q^{[L:\mathbb{F}_q]}$, существ. по Б41. Изоморф-м L_1 и L_2: знаем для $\mathbb{F}_p$ (Б40), $\varphi(\mathbb{F}_q) = \mathbb{F}_q \Rightarrow$ это степень Frob, см. обратный к нему над L_2. 2. а) $\mathbb{F}_q[\alpha] \in \mathbb{F}_{q^m}$ (т.к. есть корень), Башня. б) см. $\mathbb{F}_{q^{\deg f}} \cong \mathbb{F}_q[x]/f \Rightarrow$ общий α (NB: f – неприводим).

43) Лемма про производную. Лемма про эффективное извлечение корня степени p.
1. $f = \prod g_i^{n_i}$, смотрим $f = g_i^{n_i} g$, берём произв., см. на степень вхождения в f и f'. 2. $h' = 0 \Leftrightarrow h = g(x^p)$, коэфф. g: a_i, см. $b_i^p = a_i$ (можно, т.к. Frob), см. f с коэфф. b_i и распиши $f^p = g(x^p) = h$. Для извлечения см. обратный Frob.

44) Лемма про разделение на сомножители, чьи неприводимые множители имеют одинаковую степень.
См. Б42 про критерий для степени. Инд-ция: пусть на шаге у f нет мн-лей степени $< l$. $g(x) = x^{q^l} - x$, НОД(g, f) состоит из мн-лей f степени $= l$, т.к. делит, а меньше нет. НОД(g, f)=НОД(r, f). Значит нужно $x^{q^l} \bmod f$ (см. в $\mathbb{F}_q[x]/f$).

45) Алгоритм Берлекэмпа.
$R = \mathbb{F}_q[x]/f \cong \prod \mathbb{F}_q[x]/h_i$. Хотим дел-ли 0. Смотрим на $\{y \in \mathbb{F}_q[x]/f | y^q - y = 0\}$ (покомпонентно удовл-т). Это линейное

$\Rightarrow$ есть матрица, её решаем, получаем l-ку коэфф. Перебираем константы, обнуляем координату, см. на НОД с f.

46) Вероятностный алгоритм Кантора-Цассенхауза.

1. Про кв-ты: $x^{\frac{q^d-1}{2}} = \pm 1$. 2. Как в Б45, такое же R, оттуда случ-й $h \to h^{\frac{q^d-1}{2}} - 1$. Попадём в $\{0, -1, -2\}$. Худший случай: $\mathbb{F}_3 \times \mathbb{F}_3$. Считаем вероятность получить среди первых двух комп-т квадрат и не квадрат ($p \geq \frac{4}{9}$).

48) Коды, исправляющие ошибки. Минимальное расстояние. Линейные коды. Вычисление минимального расстояния для линейных кодов.
Хэмминг, код, кодовое расстояние, обнаруживает, исправляет, n-k-q-код, линейному соответствует матрица, систематический, проверочная матрица (образ – её ядро), мин. число ненулевых координат x = кол-во нез. столбцов.

49) Циклические коды. Эквивалентное описание. Коды БЧХ. Пример.

$q = p^s$, m, n такие, что $q^m - 1 \vdots n$, $2 \leq d \leq n$, $l_0 \leq n$. α – образующая $\mathbb{F}_{q^m}{}^*$, $\beta = \alpha^{(q^m-1)/n}$
Пример: $q = 2, m = 4, l_0 = 1, n = 15, d = 5, f = x^4 + x^3 + 1$.

50) Основная теорема про коды БЧХ.
1. Делится $\Leftrightarrow$ обнуляется на корнях, определитель $p(x) \to p(\beta^i)$. 2. $d_{min} \geq d$. Пусть плохо $\mathbb{F}_q$, тогда плохо в $\mathbb{F}_{q^m}$, обнуляет $H \implies$ у неё есть $d-1$ зависимый столбец, выделим их, сведём к Вандермонду, не вырождено.

51) Алгоритм декодирования Питерсона-Горенштейна-Цирлера.
$e(x) = \sum e_{i_j} x^{i_j}$. Расписать через $Y_j X^{l_0+k-1}$. Хотим Y_j, значит нужны X. См. $\Lambda(x) = \prod(1 - xX_j)$. Хотим Λ_i, тогда найдём корни и обратим. См. $0 = \Lambda(X_j^{-1})$, домножаем на $Y_j X_j^{\nu+t}$, суммируем $(l_0..l_0 + t - 1)$, меняем на $S_{t+1}..S_{2t}$.

54) Обратная функция относительно свёртки. Её мультипликативность. Функция Мёбиуса. Формула обращения.
1. $f(1)$ – обратимо, выкидываем n, см. $0 = \sum_{d|n} f(\frac{n}{d})g(d)$. 2. Инд-ция по (n, m): $g(nm) = -\sum_{d|nm, d<nm} \frac{nm}{d})g(d) = e(n)e(m) + g(n)g(m)$. 3. Пишем дзета-ф-цию, суммируем как БУГП, см. обратную. 4. $f = g * 1 \Leftrightarrow g = f * 1^{-1} = f\mu$.

55) Вероятность встретить два взаимно простых числа.
Считаем $\sum \varphi(i), \varphi(n) = \sum \mu(d)\frac{n}{d}$. Дальше аккуратно считаем, разбиваем на две суммы (по $\mu(d)$ и d'), в конце $\frac{n^2}{2} \sum \frac{\mu(d)}{d^2} = \frac{3n^2}{\pi}$