



Uniwersytet Warszawski

UW2

Tomasz Nowak, Michał Staniewski, Arkadiusz Czarkowski

AMPPZ 2021

2021-11-04

1 Utils

2 Podejścia

3 Wzorki

4 Matma

5 Struktury danych

6 Grafy

7 Geometria

8 Tekstówki

9 Optymalizacje

10 Randomowe rzeczy

Utils (1)

```
headers
Opis: Nagłówki używane w każdym kodzie. Działa na każdy kontener i pary
Użycie: debug(a, b, c); wypisze [a, b, c]:  a; b; c;
<bits/stdc++.h>
3a8221, 16 lines

using namespace std;
using LL = long long;
#define FOR(i, l, r) for(int i = (l); i <= (r); ++i)
#define REP(i, n) FOR(i, 0, (n) - 1)
#define ssize(x) int(x.size())
template<class A, class B> auto& operator<<(ostream &o, pair<A,
B> p) {
  return o << '(' << p.first << ", " << p.second << ')';
}
template<class T> auto operator<<(ostream &o, T x) -> decltype(
x.end(), o) {
  o << '('; int i = 0; for(auto e : x) o << (" ")+2*!i++ << e;
  return o << ')';
}
#ifdef DEBUG
#define debug(x...) cerr << "[" #x "]: ", [(auto... $) {((cerr
<< $ << "; ", ...); } (x), cerr << '\n'
#else
#define debug(...) {}
#endif
```

```
headers/.bashrc
11 lines

c() {
  clang++ -std=c++17 -Wall -Wextra -Wshadow \
    -Wconversion -Wno-sign-conversion -Wfloat-equal \
    -D_GLIBCXX_DEBUG -fsanitize=address,undefined -g -gdb3 \
    -DDEBUG -DLOCAL $1.cpp -o $1
}
nc() {
  clang++ -DLOCAL -O3 -std=c++17 -static $1.cpp -o $1 # -m32
}
alias cp='cp -i'
alias mv='mv -i'
```

```
headers/.vimrc
3 lines

set nu rnu hls is nosol ts=4 sw=4 ch=2 sc
filetype indent plugin on
syntax on

headers/sprawdzaczka.sh
13 lines

#!/bin/bash
for ((i=0; i<1000000; i++)); do
  ./gen < g.in > t.in
  ./main < t.in > m.out
  ./brute < t.in > b.out
done

if diff -w m.out b.out > /dev/null; then
  printf "OK $i\r"
else
  echo "WA"
  exit 0
fi
done

headers/towrite.sh
52 lines

vim .bashrc
c() {
  g++ -std=c++17 -Wall -Wextra -Wshadow -Wconversion -Wno-sign-
    conversion -Wfloat-equal -D_GLIBCXX_DEBUG -fsanitize=
    address,undefined -g -gdb3 -DDEBUG -DLOCAL $1.cpp -o $1
}
nc() {
  g++ -DLOCAL -O3 -std=c++17 -static $1.cpp -o $1
}
alias cp='cp -i'
alias mv='mv -i':wq
source .bashrc
mkdir template
cd template
vim main.cpp
#include<bits/stdc++.h>
using namespace std;
using LL=long long;
#define FOR(i,l,r) for(int i=(l);i<=(r);++i)
#define REP(i,n) FOR(i,0,(n)-1)
#define ssize(x) int(x.size())
template<class A,class B>auto&operator<<(ostream&o,pair<A,B>p){
  return o<<'('<<p.first<<","<<p.second<<')';}
template<class T>auto operator<<(ostream&o,T x)->decltype(x.end
(),o){o<<'(';int i=0;for(auto e:x)o<<(" ")+2*!i++<<e;
  return o<<')';}
#ifdef DEBUG
#define debug(x...) cerr<< "["#x "]: ",[(auto...$){((cerr<<$<<";
  "),...);} (x),cerr<<'\n'
#else
#define debug(...) {}
#endif

int main() {
  cin.tie(0)->sync_with_stdio(0);

}:wq
cp main.cpp brute.cpp
cp main.cpp gen.cpp
vim spr.sh
#!/bin/bash
for ((i=0;l;i++));do
  ./gen<g.in>t.in
  ./main<t.in>m.out
  ./brute<t.in>b.out
```

```
if diff -w m.out b.out>/dev/null;then
  printf "OK $i\r"
else
  echo WA
  exit 0
fi
done:wq
vim gen.cpp
G5k0mt19937 rng(chrono::system_clock::now().time_since_epoch().
  count());
int rd(int l, int r) {
  return rng()%(r-l+1)+1;
}:wq
cd ..
```

Podejścia (2)

- Czytanie ze zrozumieniem
- dynamik, zachłan
- dziel i zwyciężaj - matematyka dyskretna, $opt(i) \leq opt(i + 1)$
- sposób "liczba dobrych obiektów = liczba wszystkich obiektów - liczba złych obiektów"
- czy warunek konieczny = warunek wystarczający?
- odpowiednie przekształcenie równania; uniezależnienie funkcji od jakiejś zmiennej, zauważenie wypukłości
- zastanowić się nad łatwiejszym problemem, bez jakiegoś elementu z treści
- sprowadzić problem do innego, łatwiejszego/mniejszego problemu
- sprowadzić problem 2D do problemu 1D (zamiatanie; niezależność wyniku dla współrzędnych X od współrzędnych Y)
- konstrukcja grafu
- określenie struktury grafu
- optymalizacja bruta do wzorcówki
- czy można poprawić (może zachłannie) rozwiązanie nieoptymalne?
- czy są ciekawe fakty w rozwiązaniach optymalnych? (może się do tego przydać brute)
- sprawdzić czy w zadaniu czegoś jest "mało" (np. czy wynik jest mały, albo jakaś zmienna, może się do tego przydać brute)
- odpowiednio "wzbogacić" jakiś algorytm
- cokolwiek poniżej 10^9 operacji ma szansę wejść
- co można wykonać offline? czy jest coś, czego kolejność nie ma znaczenia?
- co można posortować? czy jest zawsze jakaś pewna optymalna kolejność?
- narysować dużo swoich własnych przykładów i coś z nich wnioskować

- skupienie się na pozycji jakiegoś specjalnego elementu, np najmniejszego
- szacowanie wyniku - czy wynik jest mały? czy umiem skonstruować algorytm który zawsze znajdzie upper bound na wynik?
- sklepać brute który sprawdza obserwacje, zawsze jeśli potrzebujemy zoptymalizować dp, wypisać wartości na małym przykładzie
- pierwiastki - elementy $> i < \sqrt{N}$ osobno, rebuild co \sqrt{N} operacji, jeśli suma wartości $= N$, jest \sqrt{N} różnych wartości
- rozwiązania probabilistyczne, paradoks urodzeń
- meet in the middle, backtrack
- sprowadzić stan do jednoznacznej postaci na podstawie podanych operacji, co pozwala sprawdzić czy z jednego stanu da się otrzymać drugi

Wzorki (3)

3.1 Równości

$$ax^2+bx+c=0 \Rightarrow x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2-4ac}}{2a}$$

Wierzchołek paraboli $= (-\frac{b}{2a}, -\frac{\Delta}{4a})$.

$$\begin{aligned} ax+by &= e \\ cx+dy &= f \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} x &= \frac{ed-bf}{ad-bc} \\ y &= \frac{af-ec}{ad-bc} \end{aligned}$$

3.2 Pitagoras

Trójki (a,b,c) , takie że $a^2+b^2=c^2$:

$$a = k \cdot (m^2 - n^2), \quad b = k \cdot (2mn), \quad c = k \cdot (m^2 + n^2),$$

gdzie $m > n > 0$, $k > 0$, $m \perp n$, oraz albo m albo n jest parzyste.

3.3 Generowanie względnie pierwszych par

Dwa drzewa, zaczynając od $(2,1)$ (parzysta-nieparzysta) oraz $(3,1)$ (nieparzysta-nieparzysta), rozgałęzienia są do $(2m-n,m)$, $(2m+n,m)$ oraz $(m+2n,n)$.

3.4 Liczby pierwsze

$p=962592769$ to liczba na NTT, czyli $2^{21} \mid p-1$, which may be useful. Do hashowania: 970592641 (31-bit), 31443539979727 (45-bit), 3006703054056749 (52-bit).

Jest 78498 pierwszych $\leq 1\,000\,000$.

Generatorów jest $\phi(\phi(p^a))$, czyli dla $p > 2$ zawsze istnieje.

3.5 Dzielniki

$$\sum_{d|n} d = O(n \log \log n).$$

Liczba dzielników n jest co najwyżej 100 dla $n < 5e4$, 500 dla $n < 1e7$, 2000 dla $n < 1e10$, 200 000 dla $n < 1e19$.

3.6 Lemat Burnside’a

Liczba takich samych obiektów z dokładnością do symetrii wynosi

$$\frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} |X^g|,$$

Gdzie G to zbiór symetrii (ruchów) oraz X^g to punkty (obiekty) stałe symetrii g .

3.7 Silnia

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$n!$	1	2	6	24	120	720	5040	40320	362880	3628800
n	11	12	13	14	15	16	17			
$n!$	4.0e7	4.8e8	6.2e9	8.7e10	1.3e12	2.1e13	3.6e14			
n	20	25	30	40	50	100	150	171		
$n!$	2e18	2e25	3e32	8e47	3e64	9e157	6e262	>DBL_MAX		

3.8 Symbol Newtona

$$\binom{n}{k} = \binom{n-1}{k-1} + \binom{n-1}{k} = \binom{n-1}{k-1} + \binom{n-2}{k-1} + \dots + \binom{k-1}{k-1}$$

$$(x+y)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k y^{n-k}$$

3.9 Wzorki na pewne ciągi

3.9.1 Nieporządek

Liczba takich permutacji, że $p_i \neq i$ (żadna liczba nie wraca na tą samą pozycję).

$$D(n) = (n-1)(D(n-1)+D(n-2)) = nD(n-1)+(-1)^n = \left\lfloor \frac{n!}{e} \right\rfloor$$

3.9.2 Liczba podziałów

Liczba sposobów zapisania n jako sumę posortowanych liczb dodatnich.

$$p(0) = 1, \quad p(n) = \sum_{k \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}} (-1)^{k+1} p(n-k(3k-1)/2)$$

$$p(n) \sim 0.145/n \cdot \exp(2.56\sqrt{n})$$

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	20	50	100
$p(n)$	1	1	2	3	5	7	11	15	22	30	627	$\sim 2e5$	$\sim 2e8$

3.9.3 Liczby Eulera pierwszego rzędu

Liczba permutacji $\pi \in S_n$ gdzie k elementów jest większych niż poprzedni: k razy $\pi(j) > \pi(j+1)$, $k+1$ razy $\pi(j) \geq j$, k razy $\pi(j) > j$.

$$E(n,k) = (n-k)E(n-1,k-1) + (k+1)E(n-1,k)$$

$$E(n,0) = E(n,n-1) = 1$$

$$E(n,k) = \sum_{j=0}^k (-1)^j \binom{n+1}{j} (k+1-j)^n$$

3.9.4 Stirling pierwszego rzędu

Liczba permutacji długości n mające k cykli.

$$c(n,k) = c(n-1,k-1) + (n-1)c(n-1,k), \quad c(0,0) = 1$$

$$\sum_{k=0}^n c(n,k)x^k = x(x+1)\dots(x+n-1)$$

$c(8,k) = 8, 0, 5040, 13068, 13132, 6769, 1960, 322, 28, 1$
 $c(n,2) = 0, 0, 1, 3, 11, 50, 274, 1764, 13068, 109584, \dots$

3.9.5 Stirling drugiego rzędu

Liczba permutacji długości n mające k spójnych.

$$S(n,k) = S(n-1,k-1) + kS(n-1,k)$$

$$S(n,1) = S(n,n) = 1$$

$$S(n,k) = \frac{1}{k!} \sum_{j=0}^k (-1)^{k-j} \binom{k}{j} j^n$$

3.9.6 Liczby Catalana

$$C_n = \frac{1}{n+1} \binom{2n}{n} = \binom{2n}{n} - \binom{2n}{n+1} = \frac{(2n)!}{(n+1)!n!}$$

$$C_0 = 1, \quad C_{n+1} = \frac{2(2n+1)}{n+2} C_n, \quad C_{n+1} = \sum C_i C_{n-i}$$

$C_n = 1, 1, 2, 5, 14, 42, 132, 429, 1430, 4862, 16796, 58786, \dots$

- ścieżki na planszy $n \times n$.
- nawiasowania po n ().
- liczba drzew binarnych z $n+1$ liśćmi (0 lub 2 syny).
- skierowanych drzew z $n+1$ wierzchołkami.
- triangulacje $n+2$ -kąta.
- permutacji $[n]$ bez 3-wyrazowego rosnącego podciągu?

3.9.7 Formuła Cayley’a

Liczba różnych drzew (z dokładnością do numerowania wierzchołków) wynosi n^{n-2} . Liczba sposobów by zespójnić k spójnych o rozmiarach s_1, s_2, \dots, s_k wynosi $s_1 \cdot s_2 \cdot \dots \cdot s_k \cdot n^{k-2}$.

3.10 Funkcje multiplikatywne

- $\epsilon(n) = [n = 1]$
- $id_k(n) = n^k, id = id_1, 1 = id_0$
- $\sigma_k(n) = \sum_{d|n} d^k, \sigma = \sigma_1, \tau = \sigma_0$
- $\mu(p^k) = [k = 0] - [k = 1]$
- $\varphi(p^k) = p^k - p^{k-1}$
- $(f * g)(n) = \sum_{d|n} f(d) g(\frac{n}{d})$
- $f * g = g * f$
- $f * (g * h) = (f * g) * h$
- $f * (g + h) = f * g + f * h$
- jak dwie z trzech funkcji $f * g = h$ są multiplikatywne, to trzecia też
- $f * 1 = g \Leftrightarrow g * \mu = f$
- $f * \epsilon = f$
- $\mu * 1 = \epsilon, [n = 1] = \sum_{d|n} \mu(d) \frac{n}{d}$
- $\varphi * 1 = id$
- $id_k * 1 = \sigma_k, id * 1 = \sigma, 1 * 1 = \tau$
- $s_f(n) = \sum_{i=1}^n f(i)$
- $s_f(n) = \frac{s_{f*g}(n) - \sum_{d=2}^n s_f(\lfloor \frac{n}{d} \rfloor) g(d)}{g(1)}$

3.11 Zasada włączeń i wyłączeń

$$|\bigcup_{i=1}^n A_i| = \sum_{\emptyset \neq J \subseteq \{1, \dots, n\}} (-1)^{|J|+1} |\bigcap_{j \in J} A_j|$$

3.12 Fibonacci

$$F_n = \frac{\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^n - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^n}{\sqrt{5}}$$

$$F_{n-1}F_{n+1} - F_n^2 = (-1)^n, F_{n+k} = F_kF_{n+1} + F_{k-1}F_n, F_n | F_{nk}, NWD(F_m, F_n) = F_{NWD(m,n)}$$

Matma (4)

berlekamp-massey
Opis: Zgadywanie rekurencji liniowej
Czas: $\mathcal{O}(n^2 \log k)$ Pamięć: $\mathcal{O}(n)$
Użycie: Berlekamp_Massey<mod> bm(x) zgaduje rekurencję ciągu x
bm.get(k) zwraca k-ty wyraz ciągu x (index 0)

```
template<int mod>
struct BerlekampMassey {
    int mul(int a, int b) {
        return (LL) a * b % mod;
    }
};
```

```

}
int add(int a, int b) {
    return a + b < mod ? a + b : a + b - mod;
}
int qpow(int a, int b) {
    if(b == 0) return 1;
    if(b % 2 == 1) return mul(qpow(a, b - 1), a);
    return qpow(mul(a, a), b / 2);
}

int n;
vector<int> x, C;
BerlekampMassey(vector<int> &x) : x(x) {
    vector<int> B; B = C = {1};
    int b = 1, m = 0;
    REP(i, ssize(x)) {
        m++; int d = x[i];
        FOR(j, 1, ssize(C) - 1)
            d = add(d, mul(C[j], x[i - j]));
        if(d == 0) continue;
        auto _B = C;
        C.resize(max(ssize(C), m + ssize(B)));
        int coef = mul(d, qpow(b, mod - 2));
        FOR(j, m, m + ssize(B) - 1)
            C[j] = (C[j] - mul(coef, B[j - m]) + mod) % mod;
        if(ssize(_B) < m + ssize(B)) { B = _B; b = d; m = 0; }
    }
    C.erase(C.begin());
    for(int &t : C) t = add(mod, -t);
    n = ssize(C);
}

vector<int> combine(vector<int> a, vector<int> b) {
    vector<int> ret(n * 2 + 1);
    REP(i, n + 1) REP(j, n + 1)
        ret[i + j] = add(ret[i + j], mul(a[i], b[j]));
    for(int i = 2 * n; i > n; i--) REP(j, n)
        ret[i - j - 1] = add(ret[i - j - 1], mul(ret[i], C[j]));
    return ret;
}

int get(LL k) {
    vector<int> r(n + 1), pw(n + 1);
    r[0] = pw[1] = 1;
    for(k++; k; k /= 2) {
        if(k % 2) r = combine(r, pw);
        pw = combine(pw, pw);
    }
    LL ret = 0;
    REP(i, n) ret = add(ret, mul(r[i + 1], x[i]));
    return ret;
}
};
```

crt
Opis: Chińskie Twierdzenie o Resztach
Czas: $\mathcal{O}(\log n)$ Pamięć: $\mathcal{O}(1)$
Użycie: crt(a, m, b, n) zwraca takie x, że x mod m = a i x mod n = b
m i n nie muszą być wzlędnie pierwsze, ale może nie być wtedy rozwiązania
uwali się wtedy assertcik, można zmienić na return -1
"../extended-gcd/main.cpp" 269203, 8 lines

LL crt(LL a, LL m, LL b, LL n) {
 if(n > m) swap(a, b), swap(m, n);
 LL d, x, y;
 tie(d, x, y) = extended_gcd(m, n);
 assert((a - b) % d == 0);

```
LL ret = (b - a) % n * x % n / d * m + a;
return ret < 0 ? ret + m * n / d : ret;
}
```

discrete-log
Opis: Dla liczby pierwszej p oraz $a, b \nmid p$ znajdzie e takie że $a^e \equiv b \pmod p$
Czas: $\mathcal{O}(\sqrt{n} \log n)$
Pamięć: $\mathcal{O}(\sqrt{n})$ 11a5db, 15 lines

```
int discrete_log(int a, int b, int p) {
    map<int, int> s1;
    LL mult = 1, sq = sqrt(p);
    REP(i, sq) {
        s1[mult] = i; mult = mult * a % p;
    }
    int t = 1;
    debug(s1, t);
    REP(i, sq + 2) {
        int inv = b * exp(t, p - 2, p) % p;
        if(s1.count(inv)) return i * sq + s1[inv];
        t = t * mult % p;
    }
    return -1;
}
```

extended-gcd
Opis: Dla danego (a, b) znajduje takie $(gcd(a, b), x, y)$, że $ax + by = gcd(a, b)$
Czas: $\mathcal{O}(\log(\max(a, b)))$
Użycie: LL gcd, x, y; tie(gcd, x, y) = extended_gcd(a, b); 4eat46, 7 lines

```
tuple<LL, LL, LL> extended_gcd(LL a, LL b) {
    if(a == 0)
        return {b, 0, 1};
    LL x, y, gcd;
    tie(gcd, x, y) = extended_gcd(b % a, a);
    return {gcd, y - x * (b / a), x};
}
```

floor-sum
Opis: Liczy $\sum_{i=0}^{n-1} \left\lfloor \frac{a \cdot i + b}{c} \right\rfloor$
Czas: $\mathcal{O}(\log(a))$
Użycie: floor_sum(n, a, b, c)
Działa dla $0 \leq a, b < c$ oraz $1 \leq c, n \leq 10^9$.
Dla innych n, a, b, c trzeba uważać lub użyć __int128. 78c6f7, 15 lines

```
LL floor_sum(LL n, LL a, LL b, LL c) {
    LL ans = 0;
    if (a >= c) {
        ans += (n - 1) * n * (a / c) / 2;
        a %= c;
    }
    if (b >= c) {
        ans += n * (b / c);
        b %= c;
    }
    LL d = (a * (n - 1) + b) / c;
    if (d == 0) return ans;
    ans += d * (n - 1) - floor_sum(d, c, c - b - 1, a);
    return ans;
}
```

fft-mod
Opis: Mnożenie wielomianów
Czas: $\mathcal{O}(n \log n)$
Użycie: conv_mod(a, b) zwraca iloczyn wielomianów a i b modulo, ma większą dokładność niż zwykle fft
"../fft/main.cpp" 6fe8fa, 22 lines

```
vector<LL> conv_mod(vector<LL> &a, vector<LL> &b, int M) {
    if(a.empty() || b.empty()) return {};
    vector<LL> res(ssize(a) + ssize(b) - 1);
    int B = 32 - __builtin_clz(ssize(res)), n = 1 << B;
    int cut = int(sqrt(M));
    vector<Complex> L(n), R(n), outl(n), outs(n);
    REP(i, ssize(a)) L[i] = Complex((int) a[i] / cut, (int) a[i]
        % cut);
    REP(i, ssize(b)) R[i] = Complex((int) b[i] / cut, (int) b[i]
        % cut);
    fft(L), fft(R);
    REP(i, n) {
        int j = -i & (n - 1);
        outl[j] = (L[i] + conj(L[j])) * R[i] / (2.0 * n);
        outs[j] = (L[i] - conj(L[j])) * R[i] / (2.0 * n) / 1i;
    }
    fft(outl), fft(outs);
    REP(i, ssize(res)) {
        LL av = LL(real(outl[i]) + 0.5), cv = LL(imag(outs[i]) +
            0.5);
        LL bv = LL(imag(outl[i]) + 0.5) + LL(real(outs[i]) + 0.5);
        res[i] = ((av % M * cut + bv) % M * cut + cv) % M;
    }
    return res;
}
```

fft
Opis: Mnożenie wielomianów
Czas: $\mathcal{O}(n \log n)$
Użycie: conv(a, b) zwraca iloczyn wielomianów a i b a39251, 38 lines

```
using Complex = complex<double>;
void fft(vector<Complex> &a) {
    int n = ssize(a), L = 31 - __builtin_clz(n);
    static vector<complex<long double>> R(2, 1);
    static vector<Complex> rt(2, 1);
    for(static int k = 2; k < n; k *= 2) {
        R.resize(n), rt.resize(n);
        auto x = polar(1.0L, M_PI1 / k);
        FOR(i, k, 2 * k - 1)
            rt[i] = R[i] = i & 1 ? R[i / 2] * x : R[i / 2];
    }
}
```

```
vector<int> rev(n);
REP(i, n) rev[i] = (rev[i / 2] | (i & 1) << L) / 2;
REP(i, n) if(i < rev[i]) swap(a[i], a[rev[i]]);
for(int k = 1; k < n; k *= 2) {
    for(int i = 0; i < n; i += 2 * k) REP(j, k) {
        Complex z = rt[j + k] * a[i + j + k]; // można zoptymowac
            rozpisujac
        a[i + j + k] = a[i + j] - z;
        a[i + j] += z;
    }
}
```

```
vector<double> conv(vector<double> &a, vector<double> &b) {
    if(a.empty() || b.empty()) return {};
    vector<double> res(ssize(a) + ssize(b) - 1);
    int L = 32 - __builtin_clz(ssize(res)), n = (1 << L);
    vector<Complex> in(n), out(n);
    copy(a.begin(), a.end(), in.begin());
    REP(i, ssize(b)) in[i].imag(b[i]);
    fft(in);
    for(auto &x : in) x *= x;
    REP(i, n) out[i] = in[-i & (n - 1)] - conj(in[i]);
    fft(out);
    REP(i, ssize(res)) res[i] = imag(out[i]) / (4 * n);
    return res;
}
```

fwht
Opis: FWHT
Czas: $\mathcal{O}(n \log n)$ Pamięć: $\mathcal{O}(1)$
Użycie: n musi być potęgą dwójki.

```
fwht_or(a)[i] = suma(j będące podmaską i) a[j].
ifwht_or(fwht_or(a)) == a.
convolution_or(a, b)[i] = suma(j | k == i) a[j] * b[k].
```

```
fwht_and(a)[i] = suma(j będące nadmaską i) a[j].
ifwht_and(fwht_and(a)) == a.
convolution_and(a, b)[i] = suma(j & k == i) a[j] * b[k].
```

```
fwht_xor(a)[i] = suma(j oraz i mają parzyście wspólnie
zapalonych bitów) a[j] - suma(j oraz i mają nieparzyście)
a[j].
ifwht_xor(fwht_xor(a)) == a.
convolution_xor(a, b)[i] = suma(j ^ k == i) a[j] * b[k].
```

```
vector<int> fwht_or(vector<int> a) {
    int n = ssize(a);
    assert((n & (n - 1)) == 0);
    for(int s = 1; 2 * s <= n; s *= 2)
        for(int l = 0; l < n; l += 2 * s)
            for(int i = l; i < l + s; ++i)
                a[i + s] += a[i];
    return a;
}
```

```
vector<int> ifwht_or(vector<int> a) {
    int n = ssize(a);
    assert((n & (n - 1)) == 0);
    for(int s = n / 2; s >= 1; s /= 2)
        for(int l = 0; l < n; l += 2 * s)
            for(int i = l; i < l + s; ++i)
                a[i + s] -= a[i];
    return a;
}
```

```
vector<int> convolution_or(vector<int> a, vector<int> b) {
    int n = ssize(a);
    assert((n & (n - 1)) == 0 and ssize(b) == n);
    a = fwht_or(a);
    b = fwht_or(b);
    REP(i, n)
        a[i] *= b[i];
    return ifwht_or(a);
}
```

```
vector<int> fwht_and(vector<int> a) {
    int n = ssize(a);
    assert((n & (n - 1)) == 0);
    for(int s = 1; 2 * s <= n; s *= 2)
        for(int l = 0; l < n; l += 2 * s)
            for(int i = l; i < l + s; ++i)
                a[i] += a[i + s];
    return a;
}
```

```
vector<int> ifwht_and(vector<int> a) {
    int n = ssize(a);
    assert((n & (n - 1)) == 0);
    for(int s = n / 2; s >= 1; s /= 2)
        for(int l = 0; l < n; l += 2 * s)
            for(int i = l; i < l + s; ++i)
                a[i] -= a[i + s];
    return a;
}
```

```
vector<int> convolution_and(vector<int> a, vector<int> b) {
    int n = ssize(a);
```

```
assert((n & (n - 1)) == 0 and ssize(b) == n);
a = fwht_and(a);
b = fwht_and(b);
REP(i, n)
    a[i] *= b[i];
return ifwht_and(a);
}
```

```
vector<int> fwht_xor(vector<int> a) {
    int n = ssize(a);
    assert((n & (n - 1)) == 0);
    for(int s = 1; 2 * s <= n; s *= 2)
        for(int l = 0; l < n; l += 2 * s)
            for(int i = l; i < l + s; ++i) {
                int t = a[i + s];
                a[i + s] = a[i] - t;
                a[i] += t;
            }
    return a;
}
```

```
vector<int> ifwht_xor(vector<int> a) {
    int n = ssize(a);
    assert((n & (n - 1)) == 0);
    for(int s = n / 2; s >= 1; s /= 2)
        for(int l = 0; l < n; l += 2 * s)
            for(int i = l; i < l + s; ++i) {
                int t = a[i + s];
                a[i + s] = (a[i] - t) / 2;
                a[i] = (a[i] + t) / 2;
            }
    return a;
}
```

```
vector<int> convolution_xor(vector<int> a, vector<int> b) {
    int n = ssize(a);
    assert((n & (n - 1)) == 0 and ssize(b) == n);
    a = fwht_xor(a);
    b = fwht_xor(b);
    REP(i, n)
        a[i] *= b[i];
    return ifwht_xor(a);
}
```

gauss
Opis: Rozwiązywanie układów liniowych (modint albo double)
NIEPRZETESTOWANE
Czas: $\mathcal{O}(nm(n + m))$
Użycie: Wrzucam n vectorów {wsp_x0, wsp_x1, ..., wsp_xm, suma}, gauss wtedy zwraca liczbę rozwiązań (0, 1 albo 2 (tzn. nieskończoność)) oraz jedno poprawne rozwiązanie (o ile istnieje). Przykład - gauss({2, -1, 1, 7}, {1, 1, 1, 1}, {0, 1, -1, 6.5}) zwraca (1, {6.75, 0.375, -6.125}) 7a15a4, 88 lines

```
#if 0
bool equal(int a, int b) {
    return a == b;
}
constexpr int mod = int(1e9) + 7;
int mul(int a, int b) {
    return int((a * LL(b)) % mod);
}
int add(int a, int b) {
    a += b;
    return a >= mod ? a - mod : a;
}
int powi(int a, int b) {
    if(b == 0)
        return 1;
    int x = powi(a, b / 2);
```

```
x = mul(x, x);
if(b % 2 == 1)
    x = mul(x, a);
return x;
}

int inv(int x) {
    return powi(x, mod - 2);
}

int divide(int a, int b) {
    return mul(a, inv(b));
}

int sub(int a, int b) {
    return add(a, mod - b);
}

using T = int;
#else
constexpr double eps = 1e-9;
bool equal(double a, double b) {
    return abs(a - b) < eps;
}
#define OP(name, op) double name(double a, double b) { return a
    op b; }
OP(mul, *)
OP(add, +)
OP(divide, /)
OP(sub, -)
using T = double;
#endif
```

```
pair<int, vector<T>> gauss(vector<vector<T>> a) {
    int n = ssize(a); // liczba wierszy
    int m = ssize(a[0]) - 1; // liczba zmiennych
```

```
vector<int> where(m, -1); // w ktorym wierszu jest
    zdefiniowana i-ta zmienna
for(int col = 0, row = 0; col < m and row < n; ++col) {
    int sel = row;
    for(int y = row; y < n; ++y)
        if(abs(a[y][col]) > abs(a[sel][col]))
            sel = y;
    if(equal(a[sel][col], 0))
        continue;
    for(int x = col; x <= m; ++x)
        swap(a[sel][x], a[row][x]);
    // teraz sel jest nieaktualne
    where[col] = row;

    for(int y = 0; y < n; ++y)
        if(y != row) {
            T wspolczynnik = divide(a[y][col], a[row][col]);
            for(int x = col; x <= m; ++x)
                a[y][x] = sub(a[y][x], mul(wspolczynnik, a[row][x]));
        }
    ++row;
}
```

```
vector<T> answer(m);
for(int col = 0; col < m; ++col)
    if(where[col] != -1)
        answer[col] = divide(a[where[col]][m], a[where[col]][col]);
}
```

```
for(int row = 0; row < n; ++row) {
    T got = 0;
    for(int col = 0; col < m; ++col)
        got = add(got, mul(answer[col], a[row][col]));
    if(not equal(got, a[row][m]))
        return {0, answer};
}
```

```
for(int col = 0; col < m; ++col)
    if(where[col] == -1)
        return {2, answer};
    return {1, answer};
}
```

integral

Opis: Wzór na całkę z zasady Simpsona - zwraca całkę na przedziale [a, b]
Czas: $\mathcal{O}(n)$
Użycie: integral([](T x) { return 3 * x * x - 8 * x + 3; }, a, b)
Daj asserta na błąd, ewentualnie zwiększ n (im większe n, tym mniejszy błąd)

```
using T = double;
T integral(function<T(T)> f, T a, T b) {
    const int n = 1000;
    T delta = (b - a) / n, sum = f(a) + f(b);
    FOR(i, 1, n - 1)
        sum += f(a + i * delta) * (i & 1 ? 4 : 2);
    return sum * delta / 3;
}
```

miller-rabin

Opis: Test pierwszości Millera-Rabina
Czas: $\mathcal{O}(\log^2 n)$ Pamięć : $\mathcal{O}(1)$
Użycie: miller_rabin(n) zwraca czy n jest pierwsze
działa dla long longów

```
LL mul(LL a, LL b, LL mod) {
    return (a * b - (LL)((long double) a * b / mod) * mod + mod)
        % mod;
}
```

```
LL qpow(LL a, LL n, LL mod) {
    if(n == 0) return 1;
    if(n % 2 == 1) return mul(qpow(a, n - 1, mod), a, mod);
    return qpow(mul(a, a, mod), n / 2, mod);
}
```

```
bool miller_rabin(LL n) {
    if(n < 2) return false;
    int r = 0;
    LL d = n - 1;
    while(d % 2 == 0)
        d /= 2, r++;
    for(int a : {2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37}) {
        if(n == a) return true;
        LL x = qpow(a, d, n);
        if(x == 1 || x == n - 1)
            continue;
        bool composite = true;
        REP(i, r - 1) {
            x = mul(x, x, n);
            if(x == n - 1) {
                composite = false;
                break;
            }
        }
        if(composite) return false;
    }
    return true;
}
```

primitive-root

Opis: Dla pierwszego p znajduje generator modulo p

```
Czas:  $\mathcal{O}(\log^2(p))$  (ale spora stała, zależy )
"../rho-pollard/main.cpp", "../random-stuff/rd/main.cpp" aeff3e, 20 lines

LL exp(LL a, LL b, int m) {
    if(b == 0) return 1;
    if(b & 1) return a * exp(a, b - 1, m) % m;
    return exp(a * a % m, b / 2, m);
}

int primitive_root(int p) {
    int q = p - 1;
    vector<LL> v = factor(q); vector<int> fact;
    REP(i, ssize(v))
        if(!i or v[i] != v[i - 1])
            fact.emplace_back(v[i]);
    while(1) {
        int g = my_rd(2, q); bool good = 1;
        for(auto &f : fact)
            if(exp(g, q / f, p) == 1) {
                good = 0; break;
            }
        if(good) return g;
    }
}
```

rho-pollard

Opis: Rozkład na czynniki Rho Pollarda
Czas: $\mathcal{O}(n^{\frac{1}{4}})$
Użycie: factor(n) zwraca vector dzielników pierwszych n,
niekoniecznie posortowany
factor(12) = {2, 2, 3}, factor(545423) = {53, 41, 251};
"../miller-rabin/main.cpp" 9ebbcf, 19 lines

```
LL rho_pollard(LL n) {
    if(n % 2 == 0) return 2;
    for(LL i = 1;; i++) {
        auto f = [&](LL x) { return (mul(x, x, n) + i) % n; };
        LL x = 2, y = f(x), p;
        while((p = __gcd(n - x + y, n)) == 1)
            x = f(x), y = f(f(y));
        if(p != n) return p;
    }
}
```

```
vector<LL> factor(LL n) {
    if(n == 1) return {};
    if(miller_rabin(n)) return {n};
    LL x = rho_pollard(n);
    auto l = factor(x), r = factor(n / x);
    l.insert(l.end(), r.begin(), r.end());
    return l;
}
```

sieve

Opis: Sito Erastotenesa
Czas: $\mathcal{O}(n)$ Pamięć : $\mathcal{O}(n)$
Użycie: sieve(n) przetwarza liczby do n włącznie
comp[i] oznacza, czy i jest złożone
prime zawiera wszystkie liczby piersze $\leq n$
w praktyce na moim kompie dla $n = 1e8$ działa w 0.7s fcc4bc, 13 lines

```
vector<bool> comp;
vector<int> prime;
void sieve(int n) {
    comp.resize(n + 1);
    FOR(i, 2, n) {
        if(!comp[i]) prime.emplace_back(i);
        REP(j, ssize(prime)) {
            if(i * prime[j] > n) break;
            comp[i * prime[j]] = true;
        }
    }
}
```

bignum

Opis: Reprezentacja dużych int'ów
Czas: Podstawa 1e9, mnożenie kwadratowe, dzielenie to mnożenie, z logiem 306sdr, 120 lines

```
struct Num {
    static constexpr int digits_per_elem = 9, base = int(1e9);
    vector<int> x;

    Num& shorten() {
        while(ssize(x) and x.back() == 0)
            x.pop_back();
        for(int &a : x)
            assert(0 <= a and a < base);
        return *this;
    }

    Num(string s) {
        for(int i = ssize(s); i > 0; i -= digits_per_elem)
            if(i < digits_per_elem)
                x.emplace_back(stoi(s.substr(0, i)));
            else
                x.emplace_back(stoi(s.substr(i - digits_per_elem, 9)));
        shorten();
    }
    Num() {}
};

string to_string(Num n) {
    stringstream s;
    s << (ssize(n.x) ? n.x.back() : 0);
    for(int i = ssize(n.x) - 2; i >= 0; --i)
        s << setfill('0') << setw(n.digits_per_elem) << n.x[i];
    return s.str();
}

ostream& operator<<(ostream &o, Num n) {
    return o << to_string(n).c_str();
}

Num operator+(Num a, Num b) {
    int carry = 0;
    for(int i = 0; i < max(ssize(a.x), ssize(b.x)) or carry; ++i)
    {
        if(i == ssize(a.x))
            a.x.emplace_back(0);
        a.x[i] += carry + (i < ssize(b.x) ? b.x[i] : 0);
        carry = bool(a.x[i] >= a.base);
        if(carry)
            a.x[i] -= a.base;
    }
    return a.shorten();
}

bool operator<(Num a, Num b) {
    if(ssize(a.x) != ssize(b.x))
        return ssize(a.x) < ssize(b.x);
    for(int i = ssize(a.x) - 1; i >= 0; --i)
        if(a.x[i] != b.x[i])
            return a.x[i] < b.x[i];
    return false;
}

bool operator==(Num a, Num b) {
    return a.x == b.x;
}

bool operator<=(Num a, Num b) {

```

bignum fenwick-tree-2d fenwick-tree find-union

```
return a < b or a == b;
}

Num operator-(Num a, Num b) {
    assert(b <= a);
    int carry = 0;
    for(int i = 0; i < ssize(b.x) or carry; ++i) {
        a.x[i] -= carry + (i < ssize(b.x) ? b.x[i] : 0);
        carry = a.x[i] < 0;
        if(carry)
            a.x[i] += a.base;
    }
    return a.shorten();
}

Num operator*(Num a, Num b) {
    Num c;
    c.x.resize(ssize(a.x) + ssize(b.x));
    REP(i, ssize(a.x))
        for(int j = 0, carry = 0; j < ssize(b.x) || carry; ++j) {
            LL cur = c.x[i + j] + a.x[i] * ll1 * (j < ssize(b.x) ? b.x[j] : 0) + carry;
            c.x[i + j] = int(cur % a.base);
            carry = int(cur / a.base);
        }
    return c.shorten();
}

Num operator/(Num a, int b) {
    assert(0 < b and b < a.base);
    int carry = 0;
    for(int i = ssize(a.x) - 1; i >= 0; --i) {
        LL cur = a.x[i] + carry * LL(a.base);
        a.x[i] = int(cur / b);
        carry = int(cur % b);
    }
    return a.shorten();
}

Num operator/(Num a, Num b) {
    Num l = Num(), r = a;
    while(not (l == r)) {
        Num m = (l + r + Num("1")) / 2;
        if(m * b <= a)
            l = m;
        else
            r = m - Num("1");
    }
    // assert(mul(l, b) == a);
    return l.shorten();
}

Num operator%(Num a, Num b) {
    Num d = a / b;
    return a - ((a / b) * b);
}

Num nwd(Num a, Num b) {
    if(b == Num())
        return a;
    return nwd(b, a % b);
}
```

Struktury danych (5)

fenwick-tree-2d

Opis: Drzewo potęgowe 2d offline
Czas: $\mathcal{O}(\log^2 n)$ Pamięć $\mathcal{O}(n \log n)$
Użycie: wywołujemy preprocess(x, y) na pozycjach, które chcemy updateować, później init()
update(x, y, val) dodaje val do a[x, y], query(x, y) zwraca sumę na prostokącie (0, 0) - (x, y)
"../fenwick-tree/main.cpp" 2de643, 29 lines

```
struct Fenwick2d {
    vector<vector<int>> ys;
    vector<Fenwick> ft;
    Fenwick2d(int limx) : ys(limx) {}
    void preprocess(int x, int y) {
        for(; x < ssize(ys); x |= x + 1)
            ys[x].push_back(y);
    }
    void init() {
        for(auto &v : ys) {
            sort(v.begin(), v.end());
            ft.emplace_back(ssize(v) + 1);
        }
    }
    int ind(int x, int y) {
        auto it = lower_bound(ys[x].begin(), ys[x].end(), y);
        return distance(ys[x].begin(), it);
    }
    void update(int x, int y, LL val) {
        for(; x < ssize(ys); x |= x + 1)
            ft[x].update(ind(x, y), val);
    }
    LL query(int x, int y) {
        LL sum = 0;
        for(x++; x > 0; x &= x - 1)
            sum += ft[x - 1].query(ind(x - 1, y + 1) - 1);
        return sum;
    }
};
```

fenwick-tree

Opis: Drzewo potęgowe
Czas: $\mathcal{O}(\log n)$
Użycie: wszystko indexowane od 0
update(pos, val) dodaje val do elementu pos
query(pos) zwraca sumę na przedziale [0, pos]
d04808, 14 lines

```
struct Fenwick {
    vector<LL> s;
    Fenwick(int n) : s(n) {}
    void update(int pos, LL val) {
        for(; pos < ssize(s); pos |= pos + 1)
            s[pos] += val;
    }
    LL query(int pos) {
        LL ret = 0;
        for(pos++; pos > 0; pos &= pos - 1)
            ret += s[pos - 1];
        return ret;
    }
};
```

find-union

Opis: Find and union z mniejszy do wiekszego
Czas: $\mathcal{O}(\alpha(n))$ oraz $\mathcal{O}(n)$ pamięciowo
c3dcdb, 19 lines

```
struct FindUnion {
    vector<int> rep;
    int size(int x) { return -rep[find(x)]; }
    int find(int x) {
```



```
    return rep[x] < 0 ? x : rep[x] = find(rep[x]);
}
bool same_set(int a, int b) { return find(a) == find(b); }
bool join(int a, int b) {
    a = find(a), b = find(b);
    if(a == b)
        return false;
    if(-rep[a] < -rep[b])
        swap(a, b);
    rep[a] += rep[b];
    rep[b] = a;
    return true;
}
FindUnion(int n) : rep(n, -1) {}
};
```

hash-map

Opis: szybsza mapa
Czas: $\mathcal{O}(1)$
Użycie: np hash_map<int, int>
trzeba przed includem dać undef _GLIBCXX_DEBUG
[<ext/pb_ds/assoc_container.hpp>](c0ab57, 11 lines)
using namespace __gnu_pbds;

```
struct chash {
    const uint64_t C = LL(2e18 * M_PI) + 69;
    const int RANDOM = mt19937(0)();
    size_t operator()(uint64_t x) const {
        return __builtin_bswap64((x^RANDOM) * C);
    }
};
template<class L, class R>
using hash_map = gp_hash_table<L, R, chash>;
```

lazy-segment-tree

Opis: Drzewo przedział-przedział
Czas: $\mathcal{O}(\log n)$ Pamięć : $\mathcal{O}(n)$
Użycie: add(l, r, val) dodaje na przedziale
quert(l, r) bierze maxa z przedziału
Zmieniając z maxa na co innego trzeba edytować
funkcje add_val i f
<088245, 60 lines>

```
using T = int;
struct Node {
    T val, lazy;
    int sz = 1;
};

struct Tree {
    vector<Node> tree;
    int sz = 1;

    void add_val(int v, T val) {
        tree[v].val += val;
        tree[v].lazy += val;
    }

    T f(T a, T b) { return max(a, b); }

    Tree(int n) {
        while(sz < n) sz *= 2;
        tree.resize(sz * 2);
        for(int i = sz - 1; i >= 1; i--)
            tree[i].sz = tree[i * 2].sz * 2;
    }

    void propagate(int v) {
        REP(i, 2)
```

```
        add_val(v * 2 + i, tree[v].lazy);
        tree[v].lazy = 0;
    }

    T query(int l, int r, int v = 1) {
        if(l == 0 && r == tree[v].sz - 1)
            return tree[v].val;
        propagate(v);
        int m = tree[v].sz / 2;
        if(r < m)
            return query(l, r, v * 2);
        else if(m <= l)
            return query(l - m, r - m, v * 2 + 1);
        else
            return f(query(l, m - 1, v * 2), query(0, r - m, v * 2 + 1));
    }

    void add(int l, int r, T val, int v = 1) {
        if(l == 0 && r == tree[v].sz - 1) {
            add_val(v, val);
            return;
        }
        propagate(v);
        int m = tree[v].sz / 2;
        if(r < m)
            add(l, r, val, v * 2);
        else if(m <= l)
            add(l - m, r - m, val, v * 2 + 1);
        else
            add(l, m - 1, val, v * 2), add(0, r - m, val, v * 2 + 1);

        tree[v].val = f(tree[v * 2].val, tree[v * 2 + 1].val);
    }
};
```

lichao-tree

Opis: Dla funkcji, których pary przecinaja sie co najwyżej raz, oblicza maximum w punkcie x. Podany kod jest dla funkcji liniowych
<6440db, 51 lines>

```
constexpr LL inf = LL(1e9);
struct Function {
    int a, b;
    LL operator()(int x) {
        return x * LL(a) + b;
    }
    Function(int p = 0, int q = inf) : a(p), b(q) {}
};
ostream& operator<<(ostream &os, Function f) {
    return os << make_pair(f.a, f.b);
}

struct LiChaoTree {
    int size = 1;
    vector<Function> tree;

    LiChaoTree(int n) {
        while(size < n)
            size *= 2;
        tree.resize(size << 1);
    }

    LL get_min(int x) {
        int v = x + size;
        LL ans = inf;
        while(v) {
            ans = min(ans, tree[v](x));
            v >>= 1;
        }
    }
};
```

```
    return ans;
}

void add_func(Function new_func, int v, int l, int r) {
    int m = (l + r) / 2;
    bool domin_l = tree[v](l) > new_func(l),
        domin_m = tree[v](m) > new_func(m);
    if(domin_m)
        swap(tree[v], new_func);

    if(l == r)
        return;
    else if(domin_l == domin_m)
        add_func(new_func, v << 1 | 1, m + 1, r);
    else
        add_func(new_func, v << 1, l, m);
}

void add_func(Function new_func) {
    add_func(new_func, 1, 0, size - 1);
}
};
```

line-container

Opis: Set dla funkcji liniowych
Czas: $\mathcal{O}(\log n)$
Użycie: add(a, b) dodaje funkcję y = ax + b
query(x) zwraca największe y w punkcie x, x < inf
<45779b, 30 lines>

```
struct Line {
    mutable LL a, b, p;
    LL eval(LL x) const { return a * x + b; }
    bool operator<(const Line &o) const { return a < o.a; }
    bool operator<(LL x) const { return p < x; }
};

struct LineContainer : multiset<Line, less<>> {
    // jak double to inf = 1 / .0, div(a, b) = a / b
    const LL inf = LLONG_MAX;
    LL div(LL a, LL b) { return a / b - ((a ^ b) < 0 && a % b); }
    bool intersect(iterator x, iterator y) {
        if(y == end()) { x->p = inf; return false; }
        if(x->a == y->a) x->p = x->b > y->b ? inf : -inf;
        else x->p = div(y->b - x->b, x->a - y->a);
        return x->p >= y->p;
    }

    void add(LL a, LL b) {
        auto z = insert({a, b, 0}), y = z++, x = y;
        while(intersect(y, z)) z = erase(z);
        if(x != begin() && intersect(--x, y))
            intersect(x, erase(y));
        while((y = x) != begin() && (--x)->p >= y->p)
            intersect(x, erase(y));
    }

    LL query(LL x) {
        assert(!empty());
        return lower_bound(x)->eval(x);
    }
};
```

ordered-set

Opis: set z dodatkowymi funkcjami

Użycie: insert(x) dodaje element x (nie ma emplace)
find_by_order(i) zwraca iterator do i-tego elementu
order_of_key(x) zwraca, ile jest mniejszych elementów,
x nie musi być w secie
Jeśli chcemy multisetu, to używamy par {val, id}.
Przed includem trzeba dać undef _GLIBCXX_DEBUG
`<ext/pb_ds/assoc_container.hpp>`, `<ext/pb_ds/tree_policy.hpp>` 0a779f, 9 lines
using namespace __gnu_pbds;

```
template<class T> using ordered_set = tree<
    T,
    null_type,
    less<T>,
    rb_tree_tag,
    tree_order_statistics_node_update
>;
```

persistent-treap
Opis: Implicit Persistent Treap
Czas: wszystko w $\mathcal{O}(\log n)$
Użycie: wszystko indexowane od 0
insert(key, val) insertuję na pozycję key
kopiowanie struktury działa w $\mathcal{O}(1)$
robimy sobie vector<Treap>, żeby obsługiwać trwalosć f3246a, 76 lines

```
mt19937 rng_key(0);

struct Treap {
    struct Node {
        int val, prio, sub = 1;
        Node *l = nullptr, *r = nullptr;
        Node(int _val) : val(_val), prio(rng_key()) {}
    };
    using pNode = Node*;
    pNode root = nullptr;

    int get_sub(pNode n) { return n ? n->sub : 0; }
    void update(pNode n) {
        if(!n) return;
        n->sub = get_sub(n->l) + get_sub(n->r) + 1;
    }

    void split(pNode t, int key, pNode &l, pNode &r) {
        if(!t) l = r = nullptr;
        else {
            t = new Node(*t);
            if(key <= get_sub(t->l))
                split(t->l, key, l, t->l), r = t;
            else
                split(t->r, key - get_sub(t->l) - 1, t->r, r), l = t;
        }
        update(t);
    }

    void merge(pNode &t, pNode l, pNode r) {
        if(!l || !r) t = (l ? l : r);
        else if(l->prio > r->prio) {
            l = new Node(*l);
            merge(l->r, l->r, r), t = l;
        }
        else {
            r = new Node(*r);
            merge(r->l, l, r->l), t = r;
        }
        update(t);
    }

    void insert(pNode &t, int key, pNode it) {
        if(!t) t = it;
```

```
        else if(it->prio > t->prio)
            split(t, key, it->l, it->r), t = it;
        else {
            t = new Node(*t);
            if(key <= get_sub(t->l))
                insert(t->l, key, it);
            else
                insert(t->r, key - get_sub(t->l) - 1, it);
        }
        update(t);
    }

    void insert(int key, int val) {
        insert(root, key, new Node(val));
    }

    void erase(pNode &t, int key) {
        if(get_sub(t->l) == key)
            merge(t, t->l, t->r);
        else {
            t = new Node(*t);
            if(key <= get_sub(t->l))
                erase(t->l, key);
            else
                erase(t->r, key - get_sub(t->l) - 1);
        }
        update(t);
    }

    void erase(int key) {
        assert(key < get_sub(root));
        erase(root, key);
    }
};
```

rmq
Opis: Range Minimum Query z użyciem sparse table
Czas: $\mathcal{O}(n \log n)$
Pamięć: $\mathcal{O}(n \log n)$
Użycie: RMQ(vec) tworzy sparse table na ciągu vec
query(l, r) odpowiada na RMQ w $\mathcal{O}(1)$ 6bc673, 22 lines

```
struct RMQ {
    vector<vector<int>> st;
    vector<int> pre;
    RMQ(vector<int> &a) {
        int n = ssize(a), lg = 0;
        while((1 << lg) < n) lg++;
        st.resize(lg + 1, vector<int>(a));
        st[0] = a;
        FOR(i, 1, lg) REP(j, n) {
            st[i][j] = st[i - 1][j];
            int q = j + (1 << (i - 1));
            if(q < n) st[i][j] = min(st[i][j], st[i - 1][q]);
        }
        pre.resize(n + 1);
        FOR(i, 2, n) pre[i] = pre[i / 2] + 1;
    }

    int query(int l, int r) {
        int q = pre[r - l + 1], x = r - (1 << q) + 1;
        return min(st[q][l], st[q][x]);
    }
};
```

treap
Opis: Implicit Treap
Czas: wszystko w $\mathcal{O}(\log n)$

Użycie: wszystko indexowane od 0
insert(key, val) insertuję na pozycję key
treap[i] zwraca i-tą wartość 907bf8, 42 lines

```
mt19937 rng_key(0);

struct Treap {
    struct Node {
        int prio, val, cnt;
        Node *l = nullptr, *r = nullptr;
        Node(int _val) : prio(rng_key()), val(_val) {}
    };
    using pNode = Node*;
    pNode root = nullptr;

    int cnt(pNode t) { return t ? t->cnt : 0; }
    void update(pNode t) {
        if(!t) return;
        t->cnt = cnt(t->l) + cnt(t->r) + 1;
    }

    void split(pNode t, int key, pNode &l, pNode &r) {
        if(!t) l = r = nullptr;
        else if(key <= cnt(t->l))
            split(t->l, key, l, t->l), r = t;
        else
            split(t->r, key - cnt(t->l) - 1, t->r, r), l = t;
        update(t);
    }

    void merge(pNode &t, pNode l, pNode r) {
        if(!l || !r) t = (l ? l : r);
        else if(l->prio > r->prio)
            merge(l->r, l->r, r), t = l;
        else
            merge(r->l, l, r->l), t = r;
        update(t);
    }

    void insert(int key, int val) {
        pNode t;
        split(root, key, root, t);
        merge(root, root, new Node(val));
        merge(root, root, t);
    }
};
```

Grafy (6)

2sat
Opis: Zwraca poprawne przyporządkowanie zmiennym logicznym dla problemu 2-SAT, albo mówi, że takie nie istnieje
Czas: $\mathcal{O}(n + m)$, gdzie n to ilość zmiennych, i m to ilość przyporządkowań.
Użycie: TwoSat ts(ilość zmiennych);
oznacza negację
ts.either(0, ~3); // var 0 is true or var 3 is false
ts.set_value(2); // var 2 is true
ts.at_most_one({0,~1,2}); // co najwyżej jedna z var 0, ~1 i 2 to prawda
ts.solve(); // rozwiązuje i zwraca true jeśli rozwiązanie istnieje
ts.values[0..N-1] // to wartości rozwiązania 304dcc, 59 lines

```
struct TwoSat {
    int n;
    vector<vector<int>> gr;
    vector<int> values;
```

```
TwoSat(int _n = 0) : n(_n), gr(2*n) {}

void either(int f, int j) {
    f = max(2*f, -1-2*f);
    j = max(2*j, -1-2*j);
    gr[f].emplace_back(j^1);
    gr[j].emplace_back(f^1);
}

void set_value(int x) { either(x, x); }

int add_var() {
    gr.emplace_back();
    gr.emplace_back();
    return n++;
}

void at_most_one(vector<int>& li) {
    if(ssize(li) <= 1) return;
    int cur = ~li[0];
    FOR(i, 2, ssize(li) - 1) {
        int next = add_var();
        either(cur, ~li[i]);
        either(cur, next);
        either(~li[i], next);
        cur = ~next;
    }
    either(cur, ~li[1]);
}

vector<int> val, comp, z;
int t = 0;
int dfs(int i) {
    int low = val[i] = ++t, x;
    z.emplace_back(i);
    for(auto &e : gr[i]) if(!comp[e])
        low = min(low, val[e] ? dfs(e));
    if(low == val[i]) do {
        x = z.back(); z.pop_back();
        comp[x] = low;
        if (values[x >> 1] == -1)
            values[x >> 1] = x & 1;
    } while (x != i);
    return val[i] = low;
}

bool solve() {
    values.assign(n, -1);
    val.assign(2 * n, 0);
    comp = val;
    REP(i, 2 * n) if(!comp[i]) dfs(i);
    REP(i, n) if(comp[2 * i] == comp[2 * i + 1]) return 0;
    return 1;
}

};
```

biconnected

Opis: Dwuspójne składowe
Czas: $O(n)$
Użycie: add_edge(u, v) dodaje krawędź (u, v), u != v, bo get() nie działa po wywołaniu init() w .bicon mamy dwuspójne(vector ideków krawędzi na każdą), w .edges mamy krawędzie

```
struct BiconComps {
    using PII = pair<int, int>;
    vector<vector<int>> graph, bicon;
    vector<int> low, pre, s;
    vector<array<int, 2>> edges;
    BiconComps(int n) : graph(n), low(n), pre(n, -1) {}

    void add_edge(int u, int v) {
        int q = ssize(edges);
        graph[u].emplace_back(q);
        graph[v].emplace_back(q);
        edges.push_back({u, v});
    }

    int get(int v, int id) {
        for(int r : edges[id])
            if(r != v) return r;
    }

    int t = 0;
    void dfs(int v, int p) {
        low[v] = pre[v] = t++;
        bool par = false;
        for(int e : graph[v]) {
            int u = get(v, e);
            if(u == p && !par) {
                par = true;
                continue;
            }
            else if(pre[u] == -1) {
                s.emplace_back(e); dfs(u, v);
                low[v] = min(low[v], low[u]);
                if(low[u] >= pre[v]) {
                    bicon.emplace_back();
                    do {
                        bicon.back().emplace_back(s.back());
                        s.pop_back();
                    } while(bicon.back().back() != e);
                }
            }
            else if(pre[v] > pre[u]) {
                low[v] = min(low[v], pre[u]);
                s.emplace_back(e);
            }
        }
    }

    void init() { dfs(0, -1); }
};
```

biconnected centro-decomp eulerian-path flow

```
void add_edge(int u, int v) {
    int q = ssize(edges);
    graph[u].emplace_back(q);
    graph[v].emplace_back(q);
    edges.push_back({u, v});
}

int get(int v, int id) {
    for(int r : edges[id])
        if(r != v) return r;
}

int t = 0;
void dfs(int v, int p) {
    low[v] = pre[v] = t++;
    bool par = false;
    for(int e : graph[v]) {
        int u = get(v, e);
        if(u == p && !par) {
            par = true;
            continue;
        }
        else if(pre[u] == -1) {
            s.emplace_back(e); dfs(u, v);
            low[v] = min(low[v], low[u]);
            if(low[u] >= pre[v]) {
                bicon.emplace_back();
                do {
                    bicon.back().emplace_back(s.back());
                    s.pop_back();
                } while(bicon.back().back() != e);
            }
        }
        else if(pre[v] > pre[u]) {
            low[v] = min(low[v], pre[u]);
            s.emplace_back(e);
        }
    }
}

void init() { dfs(0, -1); }

};
```

centro-decomp

Opis: template do Centroid Decomposition
Czas: $O(n \log n)$
Użycie: konstruktor - HLD(n, graf) swój kod wrzucamy do funkcji decomp

```
struct CentroDecomp {
    vector<vector<int>> &adj;
    vector<bool> done;
    vector<int> sub, par;
    CentroDecomp(int n, vector<vector<int>> &adj) : adj(_adj), done(n), sub(n), par(n) {}

    void dfs(int v) {
        sub[v] = 1;
        for(int u : adj[v]) {
            if(!done[u] && u != par[v]) {
                par[u] = v; dfs(u);
                sub[v] += sub[u];
            }
        }
    }

    int centro(int v) {
        par[v] = -1; dfs(v);
        for(int sz = sub[v];;) {
            pair<int, int> mx = {0, 0};
            for(int u : adj[v])
                if(!done[u] && u != par[v])
                    mx = max(mx, {sub[u], u});
        }
    }
};
```

```
if(mx.first * 2 <= sz) return v;
v = mx.second;
}

void decomp(int v) {
    done[v = centro(v)] = true;
    // kodzik idzie tutaj
    for(int u : adj[v])
        if(!done[u])
            decomp(u);
}

};
```

eulerian-path

Opis: Ścieżka eulera
Czas: $O(n)$
Użycie: Krawędzie to pary (to, id) gdzie id dla grafu nieskierowanego jest takie samo dla (u, v) i (v, u) Graf musi być spójny, po zainicjalizowaniu w .path jest ścieżka/cykl eulera, vector o długości m + 1 kolejnych wierzchołków Jeśli nie ma ścieżki/cyklu, path jest puste. Dla cyklu, path[0] == path[m]

```
using PII = pair<int, int>;
struct EulerianPath {
    vector<vector<PII>> adj;
    vector<bool> used;
    vector<int> path;
    void dfs(int v) {
        while(!adj[v].empty()) {
            int u, id; tie(u, id) = adj[v].back();
            adj[v].pop_back();
            if(used[id]) continue;
            used[id] = true;
            dfs(u);
        }
        path.emplace_back(v);
    }
    EulerianPath(int m, vector<vector<PII>> _adj) : adj(_adj) {
        used.resize(m); dfs(0);
        if(ssize(path) != m + 1) path.clear();
        reverse(path.begin(), path.end());
    }
};
```

flow

Opis: Dinic bez skalowania
Czas: $O(V^2E)$
Użycie: Dinic flow(2); flow.add_edge(0, 1, 5); cout << flow(0, 1); // 5 funkcja get_flow() zwraca dla każdej oryginalnej krawędzi, ile przez nią leci

```
struct Dinic {
    using T = int;
    struct Edge {
        int v, u;
        T flow, cap;
    };
    int n;
    vector<vector<int>> graph;
    vector<Edge> edges;

    Dinic(int N) : n(N), graph(n) {}

    void add_edge(int v, int u, T cap) {
        debug(v, u, cap);
        int e = ssize(edges);
```

```

graph[v].emplace_back(e);
graph[u].emplace_back(e + 1);
edges.emplace_back(Edge{v, u, 0, cap});
edges.emplace_back(Edge{u, v, 0, 0});
}

vector<int> dist;
bool bfs(int source, int sink) {
    dist.assign(n, 0);
    dist[source] = 1;
    deque<int> que = {source};
    while(ssize(que) and dist[sink] == 0) {
        int v = que.front();
        que.pop_front();
        for(int e : graph[v])
            if(edges[e].flow != edges[e].cap and dist[edges[e].u]
               == 0) {
                dist[edges[e].u] = dist[v] + 1;
                que.emplace_back(edges[e].u);
            }
    }
    return dist[sink] != 0;
}

vector<int> ended_at;
T dfs(int v, int sink, T flow = numeric_limits<T>::max()) {
    if(flow == 0 or v == sink)
        return flow;
    for(; ended_at[v] != ssize(graph[v]); ++ended_at[v]) {
        Edge &e = edges[graph[v][ended_at[v]]];
        if(dist[v] + 1 == dist[e.u])
            if(T pushed = dfs(e.u, sink, min(flow, e.cap - e.flow))
               ) {
                e.flow += pushed;
                edges[graph[v][ended_at[v]] ^ 1].flow -= pushed;
                return pushed;
            }
    }
    return 0;
}

T operator()(int source, int sink) {
    T answer = 0;
    while(true) {
        if(not bfs(source, sink))
            break;
        ended_at.assign(n, 0);
        while(T pushed = dfs(source, sink))
            answer += pushed;
    }
    return answer;
}

map<pair<int, int>, T> get_flowng() {
    map<pair<int, int>, T> ret;
    REP(v, n)
        for(int i : graph[v]) {
            if(i % 2) // considering only original edges
                continue;
            Edge &e = edges[i];
            ret[make_pair(v, e.u)] = e.flow;
        }
    return ret;
}
};

```

hld

Opis: Heavy-Light Decomposition**Czas:** $\mathcal{O}(q \log n)$ **Użycie:** konstruktor - HLD(n, adj)

lca(v, u) zwraca lca

get_vertex(v) zwraca pozycję odpowiadającą wierzchołkowi

get_path(v, u) zwraca przedziały do obsługi drzewem

przedziałowym

get_path(v, u) jeśli robisz operacje na wierzchołkach

get_path(v, u, false) jeśli na krawędziach (nie zawiera lca)

get_subtree(v) zwraca przedział odpowiadający poddrzewu v

013f82, 56 lines

```

struct HLD {
    vector<vector<int>>> &adj;
    vector<int> sz, pre, pos, nxt, par;
    int t = 0;
    void init(int v, int p = -1) {
        par[v] = p;
        sz[v] = 1;
        if(ssize(adj[v]) > 1 && adj[v][0] == p)
            swap(adj[v][0], adj[v][1]);
        for(int &u : adj[v]) if(u != par[v]) {
            init(u, v);
            sz[v] += sz[u];
            if(sz[u] > sz[adj[v][0]])
                swap(u, adj[v][0]);
        }
    }
    void set_paths(int v) {
        pre[v] = t++;
        for(int &u : adj[v]) if(u != par[v]) {
            nxt[u] = (u == adj[v][0] ? nxt[v] : u);
            set_paths(u);
        }
        pos[v] = t;
    }
    HLD(int n, vector<vector<int>>> &adj)
        : adj(_adj), sz(n), pre(n), pos(n), nxt(n), par(n) {
        init(0), set_paths(0);
    }
    int lca(int v, int u) {
        while(nxt[v] != nxt[u]) {
            if(pre[v] < pre[u])
                swap(v, u);
            v = par[nxt[v]];
        }
        return (pre[v] < pre[u] ? v : u);
    }
    vector<pair<int, int>> path_up(int v, int u) {
        vector<pair<int, int>> ret;
        while(nxt[v] != nxt[u]) {
            ret.emplace_back(pre[nxt[v]], pre[v]);
            v = par[nxt[v]];
        }
        if(pre[u] != pre[v]) ret.emplace_back(pre[u] + 1, pre[v]);
        return ret;
    }
    int get_vertex(int v) { return pre[v]; }
    vector<pair<int, int>> get_path(int v, int u, bool add_lca =
        true) {
        int w = lca(v, u);
        auto ret = path_up(v, w);
        auto path_u = path_up(u, w);
        if(add_lca) ret.emplace_back(pre[w], pre[w]);
        ret.insert(ret.end(), path_u.begin(), path_u.end());
        return ret;
    }
    pair<int, int> get_subtree(int v) { return {pre[v], pos[v] -
        1}; }
}

```

};

jump-ptr

Opis: Jump Pointery**Czas:** $\mathcal{O}((n + q) \log n)$ **Użycie:** konstruktor - SimpleJumpPtr(graph), można ustawić roota

jump_up(v, k) zwraca wierzchołek o k krawędzi wyżej niż v, a

jeśli nie istnieje, zwraca -1

OperationJumpPtr pozwala na otrzymanie wyniku na ścieżce (np.

suma na ścieżce, max, albo coś bardziej skomplikowanego).

Jedynym założeniem co do własności operacji otrzymania wyniku

na ścieżce do góry to łączność, ale wynik na dowolnej ścieżce

jest poprawny tylko, gdy dopisze się odwracanie wyniku na

ścieżce, lub jeżeli operacja jest przemienne.

71053d, 94 lines

```

struct SimpleJumpPtr {
    int bits;
    vector<vector<int>>> graph, jmp;
    vector<int> par, dep;
    void par_dfs(int v) {
        for(int u : graph[v])
            if(u != par[v]) {
                par[u] = v;
                dep[u] = dep[v] + 1;
                par_dfs(u);
            }
    }
    SimpleJumpPtr(vector<vector<int>>> g = {}, int root = 0) :
        graph(g) {
        int n = ssize(graph);
        bits = __lg(max(1, n)) + 1;
        dep.resize(n);
        par.resize(n, -1);
        if(n > 0)
            par_dfs(root);
        jmp.resize(bits, vector<int>(n, -1));
        jmp[0] = par;
        FOR(b, 1, bits - 1)
            REP(v, n)
                if(jmp[b - 1][v] != -1)
                    jmp[b][v] = jmp[b - 1][jmp[b - 1][v]];
        debug(graph, jmp);
    }
    int jump_up(int v, int h) {
        for(int b = 0; (1 << b) <= h; ++b)
            if((h >> b) & 1)
                v = jmp[b][v];
        return v;
    }
    int lca(int v, int u) {
        if(dep[v] < dep[u])
            swap(v, u);
        v = jump_up(v, dep[v] - dep[u]);
        if(v == u)
            return v;

        for(int b = bits - 1; b >= 0; b--) {
            if(jmp[b][v] != jmp[b][u]) {
                v = jmp[b][v];
                u = jmp[b][u];
            }
        }
        return par[v];
    }
};

using PathAns = LL;
PathAns merge(PathAns down, PathAns up) {
    return down + up;
}

```

```

}

struct OperationJumpPtr {
    SimpleJumpPtr ptr;
    vector<vector<PathAns>> ans_jump;

    OperationJumpPtr(vector<vector<pair<int, int>>> g, int root = 0) {
        debug(g, root);
        int n = ssize(g);
        vector<vector<int>> unweighted_g(n);
        REP(v, n)
            for(auto [u, w] : g[v])
                unweighted_g[v].emplace_back(u);
        ptr = SimpleJumpPtr(unweighted_g, root);
        ans_jump.resize(ptr.bits, vector<PathAns>(n));
        REP(v, n)
            for(auto [u, w] : g[v])
                if(u == ptr.par[v])
                    ans_jump[0][v] = PathAns(w);
        FOR(b, 1, ptr.bits - 1)
            REP(v, n)
                if(ptr.jump[b - 1][v] != -1 and ptr.jump[b - 1][ptr.jump[b - 1][v]] != -1)
                    ans_jump[b][v] = merge(ans_jump[b - 1][v], ans_jump[b - 1][ptr.jump[b - 1][v]]);
    }

    PathAns path_ans_up(int v, int h) {
        PathAns ret = PathAns();
        for(int b = ptr.bits - 1; b >= 0; b--)
            if((h >> b) & 1) {
                ret = merge(ret, ans_jump[b][v]);
                v = ptr.jump[b][v];
            }
        return ret;
    }

    PathAns path_ans(int v, int u) { // discards order of edges on path
        int l = ptr.lca(v, u);
        return merge(
            path_ans_up(v, ptr.dep[v] - ptr.dep[l]),
            path_ans_up(u, ptr.dep[u] - ptr.dep[l])
        );
    }
};

```

matching

Opis: Turbo Matching

Czas: Średnio około $\mathcal{O}(n \log n)$, najgorzej $\mathcal{O}(n^2)$

Użycie: wierzchołki grafu nie muszą być ładnie podzielone na dwa przedziały, musi być po prostu dwudzielny.

4a05c2, 35 lines

```

struct Matching {
    vector<vector<int>>> &adj;
    vector<int> mat, vis;
    int t = 0, ans = 0;
    bool mat_dfs(int v) {
        vis[v] = t;
        for(int u : adj[v])
            if(mat[u] == -1) {
                mat[u] = v;
                mat[v] = u;
                return true;
            }
        for(int u : adj[v])
            if(vis[mat[u]] != t && mat_dfs(mat[u])) {
                mat[u] = v;
                mat[v] = u;
                return true;
            }
    }
};

```

```

    }
    return false;
}

Matching(vector<vector<int>>> &adj) : adj(_adj) {
    mat = vis = vector<int>(ssize(adj), -1);
}

int get() {
    int d = -1;
    while(d != 0) {
        d = 0, ++t;
        REP(v, ssize(adj))
            if(mat[v] == -1)
                d += mat_dfs(v);
        ans += d;
    }
    return ans;
}
};

```

mcmf

Opis: Min-cost max-flow z SPFA

Czas: kto wie

Użycie: MCMF flow(2); flow.add_edge(0, 1, 5, 3); cout << flow(0, 1); // 15
można przepisać funkcję get_flow() z Dinic'a

f08e56, 79 lines

```

struct MCMF {
    struct Edge {
        int v, u, flow, cap;
        LL cost;
        friend ostream& operator<<(ostream &os, Edge &e) {
            return os << vector<LL>{e.v, e.u, e.flow, e.cap, e.cost};
        }
    };

    int n;
    const LL inf_LL = 1e18;
    const int inf_int = 1e9;
    vector<vector<int>>> graph;
    vector<Edge> edges;
};

```

MCMF(int N) : n(N), graph(n) {}

```

void add_edge(int v, int u, int cap, LL cost) {
    int e = ssize(edges);
    graph[v].emplace_back(e);
    graph[u].emplace_back(e + 1);
    edges.emplace_back(Edge(v, u, 0, cap, cost));
    edges.emplace_back(Edge(u, v, 0, 0, -cost));
}

```

```

pair<int, LL> augment(int source, int sink) {
    vector<LL> dist(n, inf_LL);
    vector<int> from(n, -1);
    dist[source] = 0;
    deque<int> que = {source};
    vector<bool> inside(n);
    inside[source] = true;
};

```

```

while(ssize(que)) {
    int v = que.front();
    inside[v] = false;
    que.pop_front();
};

```

```

for(int i : graph[v]) {
    Edge &e = edges[i];
    if(e.flow != e.cap and dist[e.u] > dist[v] + e.cost) {
        dist[e.u] = dist[v] + e.cost;
        from[e.u] = i;
    }
};

```

```

        if(not inside[e.u]) {
            inside[e.u] = true;
            que.emplace_back(e.u);
        }
    }
}

if(from[sink] == -1)
    return {0, 0};

int flow = inf_int, e = from[sink];
while(e != -1) {
    flow = min(flow, edges[e].cap - edges[e].flow);
    e = from[edges[e].v];
}
e = from[sink];
while(e != -1) {
    edges[e].flow += flow;
    edges[e ^ 1].flow -= flow;
    e = from[edges[e].v];
}
return {flow, flow * dist[sink]};
}

```

```

pair<int, LL> operator()(int source, int sink) {
    int flow = 0;
    LL cost = 0;
    pair<int, LL> got;
    do {
        got = augment(source, sink);
        flow += got.first;
        cost += got.second;
    } while(got.first);
    return {flow, cost};
}
};

```

SCC

Opis: Silnie Spójnie Składowe

Czas: $\mathcal{O}(\log n)$

Użycie: konstruktor - SCC(graph)

group[v] to numer silnie spójnej wierzchołka v
get_compressed() zwraca graf silnie spójnych
get_compressed(false) nie usuwa multikrawędzi

a1bad8, 61 lines

```

struct SCC {
    int n;
    vector<vector<int>>> &graph;
    int group_cnt = 0;
    vector<int> group;

    vector<vector<int>>> rev_graph;
    vector<int> order;

    void order_dfs(int v) {
        group[v] = 1;
        for(int u : rev_graph[v])
            if(group[u] == 0)
                order_dfs(u);
        order.emplace_back(v);
    }

    void group_dfs(int v, int color) {
        group[v] = color;
        for(int u : graph[v])
            if(group[u] == -1)
                group_dfs(u, color);
    }
};

```

```
SCC(vector<vector<int>> &_graph) : graph(_graph) {
    n = ssize(graph);
    rev_graph.resize(n);
    REP(v, n)
        for(int u : graph[v])
            rev_graph[u].emplace_back(v);

    group.resize(n);
    REP(v, n)
        if(group[v] == 0)
            order_dfs(v);
    reverse(order.begin(), order.end());
    debug(order);

    group.assign(n, -1);
    for(int v : order)
        if(group[v] == -1)
            group_dfs(v, group_cnt++);
}

vector<vector<int>> get_compressed(bool delete_same = true) {
    vector<vector<int>> ans(group_cnt);
    REP(v, n)
        for(int u : graph[v])
            if(group[v] != group[u])
                ans[group[v]].emplace_back(group[u]);

    if(not delete_same)
        return ans;
    REP(v, group_cnt) {
        sort(ans[v].begin(), ans[v].end());
        ans[v].erase(unique(ans[v].begin(), ans[v].end()), ans[v].end());
    }
    return ans;
}
};
```

Geometria (7)

advanced-complex

Opis: Randomowe przydatne wzorki, większość nie działa dla intów

```
"../point/main.cpp" daaa0f, 43 lines

// nachylenie k-> y = kx + m
Double slope(P a, P b) { return tan(arg(b - a)); }
// rzut p na ab
P project(P p, P a, P b) {
    return a + (b - a) * dot(p - a, b - a) / norm(a - b);
}
// odbicie p wzgledem ab
P reflect(P p, P a, P b) {
    return a + conj((p - a) / (b - a)) * (b - a);
}
// obrot a wzgledem p o theta radianow
P rotate(P a, P p, Double theta) {
    return (a - p) * polar(1.0L, theta) + p;
}
// kat ABC, w radianach, zawsze zwraca mniejszy kat
Double angle(P a, P b, P c) {
    return abs(remainder(arg(a - b) - arg(c - b), 2.0 * M_PI));
}
// szybkie przeciecie prostych, nie dziala dla rownoleglych
P intersection(P a, P b, P p, P q) {
    Double c1 = cross(p - a, b - a), c2 = cross(q - a, b - a);
    return (c1 * q - c2 * p) / (c1 - c2);
}
// check czy sa rownolegle
```

```
bool is_parallel(P a, P b, P p, P q) {
    P c = (a - b) / (p - q); return c == conj(c);
}
// check czy sa prostopadle
bool is_perpendicular(P a, P b, P p, P q) {
    P c = (a - b) / (p - q); return c == -conj(c);
}
// zwraca takie q, ze (p, q) jest rownolegle do (a, b)
P parallel(P a, P b, P p) {
    return p + a - b;
}
// zwraca takie q, ze (p, q) jest prostopadle do (a, b)
P perpendicular(P a, P b, P p) {
    return reflect(p, a, b);
}
// przeciecie srodkowych trojkata
P centro(P a, P b, P c) {
    return (a + b + c) / 3.0L;
}
```

area
Opis: Pole wielokąta, niekoniecznie wypukłego
Użycie: w vectorze muszą być wierzchołki zgodnie z kierunkiem ruchu zegara. Jeśli Double jest intem to może się psuć / 2.
area(a, b, c) zwraca pole trójkąta o takich długościach boku

```
"../point/main.cpp" bba541, 10 lines

Double area(vector<P> pts) {
    int n = size(pts);
    Double ans = 0;
    REP(i, n) ans += cross(pts[i], pts[(i + 1) % n]);
    return ans / 2;
}
Double area(Double a, Double b, Double c) {
    Double p = (a + b + c) / 2;
    return sqrt(p * (p - a) * (p - b) * (p - c));
}
```

circles
Opis: Przecięcia okręgu oraz prostej $ax+by+c=0$ oraz przecięcia okręgu oraz okręgu.
Użycie: $ssize(circle_circle(...)) == 3$ to jest nieskończenie wiele rozwiązań

```
"../point/main.cpp" a9d88d, 36 lines

using D = Double;

vector<P> circle_line(D r, D a, D b, D c) {
    D len_ab = a * a + b * b,
    x0 = -a * c / len_ab,
    y0 = -b * c / len_ab,
    d = r * r - c * c / len_ab,
    mult = sqrt(d / len_ab);
    if(sign(d) < 0)
        return {};
    else if(sign(d) == 0)
        return {{x0, y0}};
    return {
        {x0 + b * mult, y0 - a * mult},
        {x0 - b * mult, y0 + a * mult}
    };
}
vector<P> circle_line(D x, D y, D r, D a, D b, D c) {
    return circle_line(r, a, b, c + (a * x + b * y));
}
vector<P> circle_circle(D x1, D y1, D r1, D x2, D y2, D r2) {
    x2 -= x1;
    y2 -= y1;
    // now x1 = y1 = 0;
```

```
if(sign(x2) == 0 and sign(y2) == 0) {
    if(equal(r1, r2))
        return {{0, 0}, {0, 0}, {0, 0}}; // inf points
    else
        return {};
}
auto vec = circle_line(r1, -2 * x2, -2 * y2,
    x2 * x2 + y2 * y2 + r1 * r1 - r2 * r2);
for(P &p : vec)
    p += P(x1, y1);
return vec;
}
```

convex-hull

Opis: Otoczka wypukła, osobno góra i dół
Czas: $O(n \log n)$
Użycie: top_bot_hull zwraca osobno górę i dół po id
hull_id zwraca całą otoczkę po id
hull zwraca punkty na otoczce

```
"../point/main.cpp" 6eb7f2, 38 lines

Double cross(P a, P b, P c) { return sign(cross(b - a, c - a)); }

pair<vector<int>, vector<int>> top_bot_hull(vector<P> &pts) {
    int n = ssize(pts);
    vector<int> ord(n);
    REP(i, n) ord[i] = i;
    sort(ord.begin(), ord.end(), [&](int i, int j) {
        P &a = pts[i], &b = pts[j];
        return make_pair(a.x, a.y) < make_pair(b.x, b.y);
    });

    vector<int> top, bot;
    REP(dir, 2) {
        vector<int> &hull = (dir ? bot : top);
        auto l = [&](int i) { return pts[hull[ssize(hull) - i]]; };
        for(int i : ord) {
            while(ssize(hull) > 1 && cross(l(2), l(1), pts[i]) >= 0)
                hull.pop_back();
            hull.emplace_back(i);
        }
        reverse(ord.begin(), ord.end());
    }
    return {top, bot};
}

vector<int> hull_id(vector<P> &pts) {
    vector<int> top, bot;
    tie(top, bot) = top_bot_hull(pts);
    top.pop_back(), bot.pop_back();
    top.insert(top.end(), bot.begin(), bot.end());
    return top;
}

vector<P> hull(vector<P> &pts) {
    vector<P> ret;
    for(int i : hull_id(pts))
        ret.emplace_back(pts[i]);
    return ret;
}
```

intersect-lines

Opis: Przecięcia prostych lub odcinków

```
Użycie: intersection(a, b, c, d) zwraca przecięcie prostych ab
oraz cd
v = intersect(a, b, c, d, s) zwraca przecięcie (s ? odcinków :
prostych) ab oraz cd
if ssize(v) == 0: nie ma przecięć
if ssize(v) == 1: v[0] jest przecięciem
if ssize(v) == 2 and s: (v[0], v[1]) to odcinek, w którym są
wszystkie inf rozwiązań
if ssize(v) == 2 and s == false: v to niezdefiniowane punkty
(inf rozwiązań)
"../point/main.cpp" 3a1213, 26 lines

P intersection(P a, P b, P c, P d) {
    Double c1 = cross(c - a, b - a), c2 = cross(d - a, b - a);
    assert(c1 != c2); // proste nie mogą być równoległe
    return (c1 * d - c2 * c) / (c1 - c2);
}

bool on_segment(P a, P b, P p) {
    return equal(cross(a - p, b - p), 0) and dot(a - p, b - p) <=
0;
}

vector<P> intersect(P a, P b, P c, P d, bool segments) {
    Double acd = cross(c - a, d - c), bcd = cross(c - b, d - c),
cab = cross(a - c, b - a), dab = cross(a - d, b - a);
    if((segments and sign(acd) * sign(bcd) < 0 and sign(cab) *
sign(dab) < 0)
        or (not segments and not equal(bcd, acd)))
        return {(a * bcd - b * acd) / (bcd - acd)};
    if(not segments)
        return {a, a};
    // skip for not segments
    set<P, Sortx> s;
    if(on_segment(c, d, a)) s.emplace(a);
    if(on_segment(c, d, b)) s.emplace(b);
    if(on_segment(a, b, c)) s.emplace(c);
    if(on_segment(a, b, d)) s.emplace(d);
    return {s.begin(), s.end()};
}
```

```
line
Opis: konwersja różnych postaci prostej
"../point/main.cpp" dd1432, 23 lines

struct Line {
    using D = Double;
    D A, B, C;
    // postać ogólna Ax + By + C = 0
    Line(D a, D b, D c) : A(a), B(b), C(c) {}
    tuple<D, D, D> get_sta() { return {A, B, C}; }
    // postać kierunkowa ax + b = y
    Line(D a, D b) : A(a), B(-1), C(b) {}
    pair<D, D> get_dir() { return {- A / B, - C / B}; }
    // prosta pq
    Line(P p, P q) {
        assert(not equal(p.x, q.x) or not equal(p.y, q.y));
        if(!equal(p.x, q.x)) {
            A = (q.y - p.y) / (p.x - q.x);
            B = 1, C = -(A * p.x + B * p.y);
        }
        else A = 1, B = 0, C = -p.x;
    }
    pair<P, P> get_pts() {
        if(!equal(B, 0)) return { P(0, - C / B), P(1, - (A + C) / B
) };
        return { P(- C / A, 0), P(- C / A, 1) };
    }
};
```

```
point
Opis: Double może być LL, ale nie int. p.x oraz p.y nie można zmieniać (to
kopie). Nie tworzyć zmiennych o nazwie "x" lub "y".
Użycie: P p = {5, 6}; abs(p) = length; arg(p) = kąt; polar(len,
angle); exp(angle)
fda436, 33 lines

using Double = long double;
using P = complex<Double>;
#define x real()
#define y imag()

constexpr Double eps = 1e-9;
bool equal(Double a, Double b) {
    return abs(a - b) <= eps;
}

int sign(Double a) {
    return equal(a, 0) ? 0 : a > 0 ? 1 : -1;
}

struct Sortx {
    bool operator()(const P &a, const P &b) const {
        return make_pair(a.x, a.y) < make_pair(b.x, b.y);
    }
};

istream& operator>>(istream &is, P &p) {
    Double a, b;
    is >> a >> b;
    p = P(a, b);
    return is;
}

bool operator==(P a, P b) {
    return equal(a.x, b.x) && equal(a.y, b.y);
}

// cross({1, 0}, {0, 1}) = 1
Double cross(P a, P b) { return a.x * b.y - a.y * b.x; }
Double dot(P a, P b) { return a.x * b.x + a.y * b.y; }
Double sq_dist(P a, P b) { return dot(a - b, a - b); }
Double dist(P a, P b) { return abs(a - b); }
```

Tekstówki (8)

```
hashing
Czas: O(1)
Użycie: Hashing hsh(str);
hsh(l, r) zwraca hasza [l, r] włącznie
można zmienić modulo i bazę
299a85, 28 lines

struct Hashing {
    vector<int> ha, pw;
    int mod = 1e9 + 696969;
    int base;

    Hashing(string &str, int b) {
        base = b;
        int len = ssize(str);
        ha.resize(len + 1);
        pw.resize(len + 1, 1);
        REP(i, len) {
            ha[i + 1] = int(((LL) ha[i] * base + str[i] - 'a' + 1) %
mod);
            pw[i + 1] = int(((LL) pw[i] * base) % mod);
        }
    }

    int operator()(int l, int r) {
        return int(((ha[r + 1] - (LL) ha[l] * pw[r - l + 1]) % mod
+ mod) % mod);
    }
};
```

```
};
};

struct DoubleHashing {
    Hashing h1, h2;
    DoubleHashing(string &str) : h1(str, 31), h2(str, 33) {} //
change to rd on codeforces
    LL operator()(int l, int r) {
        return h1(l, r) * LL(h2.mod) + h2(l, r);
    }
};
```

```
kmp
Opis: KMP(str) zwraca tablicę pi. [0, pi[i]] = (i - pi[i], i]
Czas: O(n) bc0e11, 11 lines

vector<int> KMP(string &str) {
    int len = ssize(str);
    vector<int> ret(len);
    for(int i = 1; i < len; i++)
    {
        int pos = ret[i - 1];
        while(pos && str[i] != str[pos]) pos = ret[pos - 1];
        ret[i] = pos + (str[i] == str[pos]);
    }
    return ret;
}
```

```
manacher
Opis: radius[p][i] = rad = największy promień palindromu parzystości p o
środku i. L = i - rad + 1, R = i + rad to palindrom. Dla [abaababaa] daje
[003000020], [0100141000].
Czas: O(n) ca63bf, 18 lines

array<vector<int>, 2> manacher(vector<int> &in) {
    int n = ssize(in);
    array<vector<int>, 2> radius = {{vector<int>(n - 1), vector<
int>(n)}};
    REP(parity, 2) {
        int z = parity ^ 1, L = 0, R = 0;
        REP(i, n - z) {
            int &rad = radius[parity][i];
            if(i <= R - z)
                rad = min(R - i, radius[parity][L + (R - i - z)]);
            int l = i - rad + z, r = i + rad;
            while(0 <= l - 1 && r + 1 < n && in[l - 1] == in[r + 1])
                ++rad, ++r, --l;
            if(r > R)
                L = l, R = r;
        }
    }
    return radius;
}
```

```
pref
Opis: pref(str) zwraca tablicę prefixo prefixową [0, pref[i]] = [i, i + pref[i]]
Czas: O(n) 6c98b2, 13 lines

vector<int> pref(string &str) {
    int len = ssize(str);
    vector<int> ret(len);
    ret[0] = len;
    int i = 1, m = 0;
    while(i < len) {
        while(m + i < len && str[m + i] == str[m]) m++;
        ret[i++] = m;
        m = (m != 0 ? m - 1 : 0);
        for(int j = 1; ret[j] < m; m--) ret[i++] = ret[j++];
    }
}
```



```
    return ret;
}
```

suffix-array
Opis: Tablica suffixowa
Czas: $\mathcal{O}(n \log n)$
Użycie: SuffixArray t(s, lim) - lim to rozmiar alfabetu
sa zawiera posortowane suffixy, zawiera pusty suffix
lcp[i] to lcp suffixu sa[i - 1] i sa[i]
Dla s = "aabaaab" sa = {6, 3, 0, 4, 1, 5, 2}, lcp = {0, 0, 3, 1, 2, 0, 1}

```
struct SuffixArray {
    vector<int> sa, lcp;
    SuffixArray(string& s, int lim = 256) { // lub basic_string<int>
        int n = ssize(s) + 1, k = 0, a, b;
        vector<int> x(s.begin(), s.end() + 1);
        vector<int> y(n), ws(max(n, lim)), rank(n);
        sa = lcp = y;
        iota(sa.begin(), sa.end(), 0);

        for(int j = 0, p = 0; p < n; j = max(1, j * 2), lim = p) {
            p = j;
            iota(y.begin(), y.end(), n - j);
            REP(i, n) if(sa[i] >= j)
                y[p++] = sa[i] - j;
            fill(ws.begin(), ws.end(), 0);
            REP(i, n) ws[x[i]]++;
            FOR(i, 1, lim - 1) ws[i] += ws[i - 1];
            for(int i = n; i--;) sa[--ws[x[y[i]]]] = y[i];
            swap(x, y);
            p = 1, x[sa[0]] = 0;
            FOR(i, 1, n - 1) a = sa[i - 1], b = sa[i], x[b] =
                (y[a] == y[b] && y[a + j] == y[b + j]) ? p - 1 : p++;
        }
        FOR(i, 1, n - 1) rank[sa[i]] = i;
        for(int i = 0, j; i < n - 1; lcp[rank[i++]] = k)
            for(k && k--, j = sa[rank[i] - 1];
                s[i + k] == s[j + k]; k++);
    }
};
```

suffix-automaton
Opis: buduje suffix automaton. Wystąpienia wzorca, liczba różnych pod-słów, sumaryczna długość wszystkich podslów, leksykograficznie k-te pod-słowo, najmniejsze przesunięcie cykliczne, liczba wystąpień podslowa, pier-wsze wystąpienie, najkrótsze niewystępujące podslowo, longest common sub-string dwóch słów, LCS wielu słów
Czas: $\mathcal{O}(n\alpha)$ (szybsze, ale więcej pamięci) albo $\mathcal{O}(n \log \alpha)$ (mapa)

```
struct SuffixAutomaton {
    static constexpr int sigma = 26;
    using Node = array<int, sigma>; // map<int, int>
    Node new_node;

    vector<Node> edges;
    vector<int> link = {-1}, length = {0};
    int last = 0;

    SuffixAutomaton() {
        new_node.fill(-1); // -1 - stan nieistniejący
        edges = {new_node}; // dodajemy stan startowy, który
                             reprezentuje puste słowo
    }

    void add_letter(int c) {
        edges.emplace_back(new_node);
        length.emplace_back(length[last] + 1);
    }
};
```

```
link.emplace_back(0);

int r = ssize(edges) - 1, p = last;
while(p != -1 && edges[p][c] == -1) {
    edges[p][c] = r;
    p = link[p];
}
if(p != -1) {
    int q = edges[p][c];
    if(length[p] + 1 == length[q])
        link[r] = q;
    else {
        edges.emplace_back(edges[q]);
        length.emplace_back(length[p] + 1);
        link.emplace_back(link[q]);
        int q_prim = ssize(edges) - 1;

        link[q] = link[r] = q_prim;
        while(p != -1 && edges[p][c] == q) {
            edges[p][c] = q_prim;
            p = link[p];
        }
    }
    last = r;
}

bool is_inside(vector<int> &s) {
    int q = 0;
    for(int c : s) {
        if(edges[q][c] == -1)
            return false;
        q = edges[q][c];
    }
    return true;
};
```

trie
Opis: Trie
Czas: $\mathcal{O}(n \log \alpha)$
Użycie: Trie trie; trie.add(str);

```
struct Trie {
    vector<unordered_map<char, int>> child = {{{}};
    int get_child(int v, char a) {
        if(child[v].find(a) == child[v].end()) {
            child[v][a] = ssize(child);
            child.emplace_back();
        }
        return child[v][a];
    }
    void add(string word) {
        int v = 0;
        for(char c : word)
            v = get_child(v, c);
    }
};
```

fio
Opis: FIO do wpychania kolanem. Nie należy wtedy używać `cin/cout`

```
#ifdef WIN32
inline int getchar_unlocked() { return _getchar_nolock(); }
inline void putchar_unlocked(char c) { return _putchar_nolock(c); }
};
```

```
#endif

int fastin() {
    int n = 0, c = getchar_unlocked();
    while(c < '0' or '9' < c)
        c = getchar_unlocked();
    while('0' <= c and c <= '9') {
        n = 10 * n + (c - '0');
        c = getchar_unlocked();
    }
    return n;
}

int fastin_negative() {
    int n = 0, negative = false, c = getchar_unlocked();
    while(c != '-' and (c < '0' or '9' < c))
        c = getchar_unlocked();
    if(c == '-') {
        negative = true;
        c = getchar_unlocked();
    }
    while('0' <= c and c <= '9') {
        n = 10 * n + (c - '0');
        c = getchar_unlocked();
    }
    return negative ? -n : n;
}

void fastout(int x) {
    if(x == 0) {
        putchar_unlocked('0');
        putchar_unlocked(' ');
        return;
    }
    if(x < 0) {
        putchar_unlocked('-');
        x *= -1;
    }
    static char t[10];
    int i = 0;
    while(x) {
        t[i++] = '0' + (x % 10);
        x /= 10;
    }
    while(--i >= 0)
        putchar_unlocked(t[i]);
    putchar_unlocked(' ');
}

void nl() { putchar_unlocked('\n'); }
```

pragmy
Opis: Pragmy do wypychania kolanem

```
#pragma GCC optimize("Ofast")
#pragma GCC target("avx,avx2")
```

Randomowe rzeczy (10)

math-constants
Opis: Jeśli np M_PI się nie kompiluje, dodaj ten define w pierwszym wierszu

```
#define _USE_MATH_DEFINES
```

dzien-probny
Opis: Rzeczy do przetestowania w dzień próbny

```
"../data-structures/ordered-set/main.cpp"
```



```

void test_int128() {
    __int128 x = (1llu << 62);
    x *= x;
    string s;
    while(x) {
        s += char(x % 10 + '0');
        x /= 10;
    }
    assert(s == "61231558446921906466935685523974676212");
}

void test_float128() {
    __float128 x = 4.2;
    assert(abs(double(x * x) - double(4.2 * 4.2)) < 1e-9);
}

void test_clock() {
    long seed = chrono::system_clock::now().time_since_epoch().count();
    (void) seed;
    auto start = chrono::system_clock::now();

    while(true) {
        auto end = chrono::system_clock::now();
        int ms = int(chrono::duration_cast<chrono::milliseconds>(end - start).count());
        if(ms > 420)
            break;
    }

    void test_rd() {
        // czy jest sens to testowac?
        mt19937_64 my_rng(0);
        auto rd = [&](int l, int r) {
            return uniform_int_distribution<int>(l, r)(my_rng);
        };
        assert(rd(0, 0) == 0);
    }

    void test_policy() {
        ordered_set<int> s;
        s.insert(1);
        s.insert(2);
        assert(s.order_of_key(1) == 0);
        assert(*s.find_by_order(1) == 2);
    }

    void test_math() {
        assert(3.14 < M_PI && M_PI < 3.15);
        assert(3.14 < M_PI1 && M_PI1 < 3.15);
    }
}

```

10.1 Troubleshoot

Przed submitem:

- Narysuj parę przykładów i przetestuj kod
- Czy limity czasu są ostre? Wygeneruj maxtest.
- Czy zużycie pamięci jest spoko?
- Czy gdzieś mogą być overflowy?
- Upewnij się, żeby submitnąć dobry plik.

Wrong Answer:

- Wydrukuj kod i debug output
- Czy czyścisz struktury pomiędzy test case'ami?

- Czy wczytujesz całe wejście?
- Czy twój kod obsługuje cały zasięg wejścia?
- Przeczytaj jeszcze raz treść.
- Czy zrozumiałeś dobrze zadanie?
- Czy obsługujesz dobrze wszystkie przypadki brzegowe?
- Niezainicjalizowane zmienne?
- Overflowy?
- Mylisz n z m lub i z j, itp?
- Czy format wyjścia jest na pewno dobry?
- Czy jesteś pewien, że twój algorytm działa?
- Czy są specjalne przypadki, o których nie pomyślałeś?
- Dodaj asserty, może submitnij jeszcze raz z nimi.
- Stwórz/Wygeneruj przykłady.
- Wytlumacz algorytm komuś innemu.
- Poproś kogoś, żeby spojrzął na twój kod.
- Przejdź się, np do toalety.
- Przepisz kod od nowa, lub niech ktoś inny to zrobi.
- Przeleć przez tą listę jeszcze raz.

Runtime Error:

- Czy przetestowałeś lokalnie wszystkie przypadki brzegowe?
- Niezainicjalizowane zmienne?
- Czy odwołujesz się poza zasięg vectora?
- Czy jakieś asserty mogły się odpalić?
- Dzielenie przez 0? mod 0?
- Nieskończona rekurencja?
- Unieważnione iteratory, wskaźniki, referencje?
- Czy używasz za dużo pamięci?

Time Limit Exceeded:

- Czy mogą być gdzieś nieskończone pętle?
- Jaka jest złożoność algorytmu?
- Czy nie kopiujesz dużo niepotrzebnych danych? (referencje)
- Pamiętaj o liniijkach do iostreama
- Zastąp vectory i mapy w kodzie (odpowiednio array i unordered_map)
- Co inni myślą o twoim algorytmie?

Memory Limit Exceeded:

- Jaka jest maksymalna ilość pamięci twój algorytm potrzebuje?
- Czy czyścisz struktury pomiędzy test case'ami?