

NHÀ XUẤT BẢN ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI

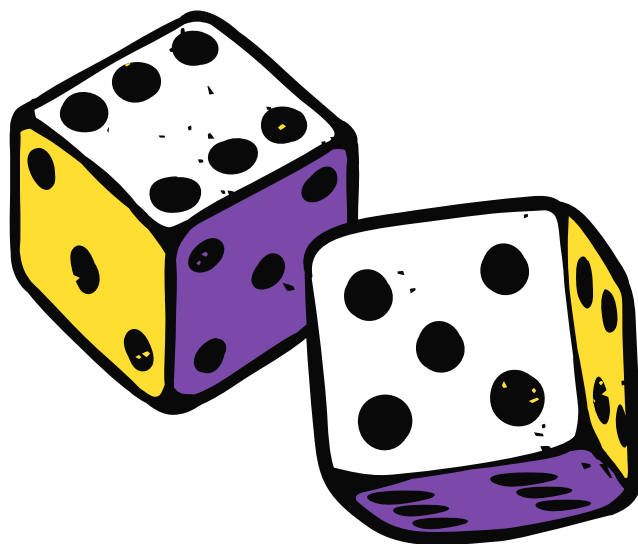
500 BÀI TOÁN ĐẠI SỐ VÀ TỔ HỢP

HƯỚNG ĐẾN KÌ THI VMO VÀ TST

PHẠM BẢO - THPT CHUYÊN NGUYỄN ĐÌNH CHIỂU

Mục lục

1	Tổ hợp	1
A	Đề bài	1
B	Lời giải	43



1

TỔ HỢP

組 み 合 わ せ

1. Tổ hợp

A . Đề bài

Bài toán 1. (PTNK 2020). Một trường phổ thông có n học sinh. Các học sinh tham gia vào tổng cộng m câu lạc bộ A_1, A_2, \dots, A_m

(a) Chứng minh rằng nếu mỗi câu lạc bộ có 4 học sinh và hai học sinh bất kì tham gia chung nhiều nhất 1 câu thì $m \leq \frac{n(n-1)}{12}$

(b) Giả sử tồn tại $k > 0$ sao cho hai câu lạc bộ bất kì có chung nhau k thành viên và tồn tại một câu lạc bộ A_t có k thành viên. Chứng minh rằng $m \leq n$.

Lời giải 1.

(a) Ta đếm số bộ có cặp học sinh tham gia vào một CLB bằng hai cách

Cách 1: Mỗi CLB có 4 học sinh chọn ra 2 bạn, nên ta được

$$S = m \binom{4}{2} = 6m$$

Cách 2: Vì hai học sinh bất kì có chung tối đa 1 CLB nên ta được

$$S \leq \frac{n(n-1)}{2}$$

Thế thì $m \leq \frac{n(n-1)}{12}$.

(b) Vì CLB A_t có k thành viên và có chung k thành viên với tất cả các CLB còn lại nên các thành viên A_t đã tham gia tất cả CLB và cũng là thành viên chung của nhau. Xét $n - k$ học sinh còn lại thì mỗi học sinh phải tham gia tối đa 1 CLB (trong số các CLB còn lại), vậy nên số CLB không vượt quá $n - k$, nên suy ra $m \leq n - k + 1 \leq n$, hoàn tất chứng minh. □

Bài toán 2. (Đấu Lắc TST 2023). Tìm tất cả các tập hợp A gồm 8 số nguyên dương sao cho với mọi số nguyên dương $n \leq 250$, tồn tại tập hợp B là tập hợp con của A thỏa mãn tổng tất cả các phần tử của B bằng n .

Lời giải 2. Đặt $N = \{1, 2, \dots, 250\}$, nên $A \subset N$ ta có

$$1, 2 \in A$$

$$3 = 1 + 2 \in N$$

$$4 \in A$$

$$5 = 3 + 2, 6 = 3 + 2 + 1, 7 = 4 + 3 \in N$$

$$8 \in A$$

...

Ta dự đoán rằng $A = \{2^0, 2^1, 2^2, \dots, 2^7\}$. Thật vậy, xét hàm số $f: N \rightarrow N_2$ biến một số thập phân bất kỳ thành số nhị phân. Ta chứng minh f là hàm song ánh. Thật vậy, xét một số a bất kỳ. Khi đó, thực hiện thuật toán chia a cho 2 đến khi $a \rightarrow 0$, theo Euclid ta được một dãy số dư duy nhất. Nếu tồn tại số b có cùng dãy số dư với a thì $a = b$. Suy ra f đơn ánh. Hơn nữa với mọi b_2 thì luôn tồn tại a để $f(a) = b_2$. Vậy nên f song ánh.

Mặt khác, giả sử tồn tại $t \neq 2^k, k \in 0, 1, \dots, 7$, mà $t \in A$, khi đó t có thể phân tích theo nhị phân, nhưng vì $2^7 = 128 < 250$ nên $t \notin A$

Vậy nên $A = \{2^0, 2^1, 2^2, \dots, 2^7\}$. □

Bài toán 3. (Phạm Bảo). Cho tập hợp $S = \{1, 2, \dots, n\}$ và k là hằng số. Tìm số nguyên $f(n)$ nhỏ nhất để với mọi tập con của S có $f(n)$ phần tử đều tìm được k phần tử đôi một nguyên tố cùng nhau.

Lời giải 3. Đầu tiên để xét với mọi tập con hữu hạn mà có 2 số nguyên tố cùng nhau thì hai số này không thể có ước chung, tức là kích thước của tập phải lớn hơn số phần tử có ước chung của cả hai thì mới có thể bao hàm chúng được. Khi đó, ta có thể bù trừ các số có ước là 2, 3, 5, ... dựa trên yêu cầu cần bao nhiêu số nguyên tố cùng nhau. Ta hãy xét một tập hợp và hàm số sau:

$$\begin{cases} A_n = \{a \in \mathbb{S} \mid p_n \mid a \text{ và } p_i \nmid a, \forall i < n\}, \text{ với } p_i \text{ là số nguyên tố thứ } i \\ h(n) = |A_n| \end{cases}$$

Rõ ràng là $h(n)$ là hàm giảm trên khoảng nguyên tố $[2, +\infty)$ khi xét trên tập hữu hạn. Khi đó chặn dưới tốt nhất của f sẽ là khi ta lấy hết tất cả các phần tử có ước chung với nhau. Do đó ta được

$$f(n) \geq h(2) + h(3) + \dots + h(k) + 1 = \sum_{i=2}^k h(i) + 1$$

Thật vậy, ta có một bổ đề sau

Bổ đề chia hết

Cho một đoạn số nguyên $[a, b]$ và số nguyên k , khi đó có $\left\lfloor \frac{b-a+1}{k} \right\rfloor$ số thuộc đoạn này chia hết cho k .

Bổ đề có thể dễ dàng chứng minh được bằng nguyên lý Dirichlet.

Đặt $T_i = \left\lfloor \frac{n}{i} \right\rfloor$. Để tính được $h(p_i)$ thì ta phải bù trừ các T_i được tạo bởi các ước bé hơn nó. Ta có

$$\begin{aligned} h(1) &= T_2 \\ h(2) &= T_3 - T_6 \\ h(3) &= T_5 - T_{10} - T_{15} - T_{30} \\ &\dots \\ h(i) &= T_{p_i} - \sum_{j \in a_{p_i}} T_j, \end{aligned}$$

với a_{p_i} là bội và có các ước nguyên tố bậc 1 bé hơn p_i . Khi đó ta có

$$\sum_{i=2}^k h(i) + 1 = \left(\sum_{i=1}^k T_{p_i} \right) - \left(\sum_{i=1}^k \sum_{j \in a_{p_i}} T_j \right) + 1 = \sum_{i=1}^k \left(T_{p_i} - \sum_{j \in a_{p_i}} T_j \right) + 1$$

Kết luận lại, ta có $f(n)_{\min} = \sum_{i=1}^k \left(\left\lfloor \frac{n}{p_i} \right\rfloor - \sum_{j \in a_{p_i}} \left\lfloor \frac{n}{j} \right\rfloor \right) + 1$

□

Nhận xét: Thông thường các giả thuyết như chứa số nguyên tố hay nguyên tố cùng nhau thì ta không có nhiều công cụ để xử lý trong tổ hợp. Vì vậy điều này gợi ý cho ta việc thực hiện điều ngược lại: Như thế nào thì hai số không nguyên tố cùng nhau? Làm cách nào để tránh điều đó?

Bài toán 4. Trên trục số nguyên, một con ếch xuất phát tại 0, nhảy đến các vị trí có tọa độ thuộc $\{1, 2, 3, \dots, 2^{2022} - 1\}$, mỗi điểm được nhảy qua không quá một lần và con ếch có thể nhảy tới hoặc nhảy lùi lại tùy ý. Biết rằng độ dài bước nhảy của ếch là lũy thừa của 2 và gọi a_k là số bước nhảy độ dài 2^k mà con ếch đã nhảy.

(a) Chứng minh rằng $a_{2021} \leq 2^{2021}$ và $a_{2021} + a_{2020} \leq 3 \cdot 2^{2020}$.

(b) Tìm giá trị lớn nhất của tổng S độ dài tổng từng các bước nhảy theo mỗi lũy thừa của ếch có thể thực hiện được (xét theo từng độ dài).

Lời giải 4.

1. Ta để ý rằng số các bước không quá $2^{2022} - 1$ không thể nào có 2 bước liên tiếp có độ dài 2^{2021} vì nếu không kiểu gì cũng sẽ lớn $2^{2022} - 1$. Cho nên chỉ có 1 bước mỗi lần như vậy, hay nói cách khác, mỗi bước 2^{2021} phải được xen kẽ bởi một bước nhỏ hơn và trường hợp tốt nhất là $2^0 = 1$, như vậy ta sẽ có được:

$$a_{2021} \leq \left\lceil \frac{2^{2022} - 1}{2} \right\rceil = 2^{2021}$$

Tiếp theo ta cần chứng minh $a_{2021} + a_{2020} \leq 3 \cdot 2^{2020}$. Để ý rằng thì không có 4 bước liên tiếp nào có độ dài nào là $2^{2020}, 2^{2021}$, thì đó cứ 3 bước như ta xen kẽ 1 bước đơn vị tương tự như trên, và mặt khác mỗi 3 bước thì hẳn phải có 3 lựa chọn thì ta có được:

$$a_{2021} + a_{2020} \leq 3 \left\lceil \frac{2^{2022} - 1}{4} \right\rceil = 3 \cdot 2^{2020}$$

2. Ta xét số bước khả thi của a_k thì đương nhiên, không thể nào ta đi 2^{2022-k} lần a_k được, thì khi đó cứ $2^{2022-k} - 1$ bước a_k thì ta bước 1 bước đơn vị, khi đó ta được

$$a_k \leq \left\lceil \frac{2^{2022} - 1}{2^{2022-k}} \right\rceil = 2^k$$

Từ đó số độ dài các bước nhảy cực đại là:

$$S = \sum_{i=0}^{2021} 2^i a_i \leq \sum_{i=0}^{2021} 4^i = \frac{4^{2021} - 1}{3}$$

□

Bài toán 5. (Nguyễn Tuấn Anh). Cho S là tập hợp các bộ số nguyên dương (x_1, x_2, \dots, x_n) là nghiệm của phương trình

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n = n^n$$

Tính giá trị của biểu thức

$$T = \sum_{(x_1, x_2, \dots, x_n) \in S} x_1 x_2 \dots x_n$$

Lời giải 5. Cách 1: Đếm bằng hai cách

Cách thứ 1: Đếm theo tập hợp. Ta phân chia n^n số vào n tập hợp A_1, A_2, \dots, A_n khác rỗng. Khi này lực lượng của các tập phải thỏa mãn

$$|A_1| + |A_2| + \dots + |A_n| = n^n$$

Mỗi tập ta chọn ra một phần tử thì theo quy tắc nhân ta có $x_1 x_2 \dots x_n$ cách. Chung quy lại

$$T = \sum_{(x_1, x_2, \dots, x_n) \in S} x_1 x_2 \dots x_n$$

Cách thứ 2: Phân hoạch nguyên. Ta xếp các số $1, 2, \dots, n^n$ lên một đường thẳng từ trái sang phải.

Khi này ta sẽ thực hiện thao tác phân hoạch đoạn số nguyên này và mỗi đoạn chọn một số. Thao tác phân hoạch \rightarrow chọn \rightarrow phân hoạch $\rightarrow \dots \rightarrow$ phân hoạch \rightarrow chọn ($2n - 1$ bước) có thể được hiểu là một cách chọn ra $2n - 1$ số trên và ta chèn cấu hình đó vào.

Tuy nhiên, nếu một số được chọn với vai trò là để phân hoạch thì ta đã vô tình loại nó ra nên không thể chọn được, vì vậy, ta sẽ cần thêm $n - 1$ đối tượng làm phân hoạch, để có thể hiểu rằng mỗi lần chọn phân hoạch là ta đang chọn một trong các đối tượng đó. Và có được số cách thao tác trên là

$$T = \binom{n^n + n - 1}{2n - 1}$$

So sánh hai cách đếm ta hoàn tất bài toán.

Cách 2: Sử dụng hàm sinh

Ta xét hàm sinh

$$f(x) = \left(\sum_{i=0}^{\infty} i x^i \right)^n$$

□

Bài toán 6. (Kon Tum TST 2023). Trên một đường tròn có đường kính bằng 2, người ta tiến hành tô đỏ một số cung tròn không có điểm chung. Cho d là một đường kính tùy ý của đường tròn. Chứng minh rằng luôn tồn tại dây cung song song d sao cho cả hai đầu mút của dây cung đó đều được tô màu đỏ. Biết rằng tổng độ dài của các cung màu đỏ lớn hơn π

Lời giải 6. Gọi các điểm thuộc cung tròn được tô đỏ là điểm đỏ, các điểm không được tô là điểm trắng.

Phản chứng, giả sử không tồn tại dây cung nào thỏa mãn đề bài. Chia hình tròn làm đôi bởi đường thẳng trung trực của d cho trước. Gọi đường thẳng này là Δ . Khi đó, xét các điểm đỏ thì mọi ảnh đối xứng của nó qua Δ đều là điểm trắng và ngược lại. Điều này dẫn tới tổng số điểm đỏ bằng số điểm trắng, suy ra

$$\text{điểm đỏ} + \text{điểm trắng} > \pi + \pi = 2\pi$$

Mâu thuẫn vì $\text{điểm đỏ} + \text{điểm trắng} = 2\pi$. Vậy nên luôn tồn tại dây cung song song d thỏa mãn đề bài. \square

Bài toán 7. (Đồng Tháp TST 2023). Bạn Bảo có n cái hộp, lần lượt chứa $1, 2, \dots, n$ viên bi ($n > 1$). Bạn Bảo thực hiện việc cho thêm bi vào hộp theo các quy tắc sau:

1. Ở lượt đầu tiên, bạn ấy cho thêm vào mỗi hộp 1 viên bi.
2. Ở lượt thứ hai, với các hộp có số bi chia hết cho 2, bạn ấy sẽ thêm vào mỗi hộp đó 1 viên bi.
3. Cứ như vậy, ở lượt k , nếu có hộp nào với số bi chia hết cho k , bạn Bảo sẽ thêm vào mỗi hộp đó 1 viên bi.

Tìm tất cả các số nguyên $n > 1$ sao cho kết thúc lượt thêm bi thứ n thì mỗi hộp đều có đúng $n + 1$ viên bi.

Lời giải 7. (Phạm Bảo). Ký hiệu tập $\{1, 2, \dots, n\}$ là $[n]$ với mọi n nguyên dương.

Nhận xét 1: $n + 1$ là số nguyên tố

Chứng minh. Giả sử $n + 1$ là hợp số, khi đó tồn tại $p \in \mathbb{P}$ sao cho $p \mid n + 1$, khi đó ở lượt thứ 1 và p , hộp thứ n sẽ chứa $n + 2$ viên bi, vượt mức cho phép.

Vậy nên $n + 1$ là số nguyên tố. \square

Xét một hộp thứ $k > 1$ bất kỳ, gọi $f(x) : [n] \rightarrow [n]$ là số viên bi của hộp k ở lượt thứ x . Đặt $g(x) = f(x) - x - 1$.

Nhận xét 2: f và g là hàm liên tục trên tập rời rạc $[1, n]$.

Chứng minh. Mỗi lượt chỉ được thêm vào hộp 1 viên bi, khi đó ta có

$$0 \leq f(x+1) - f(x) \leq 1 \Rightarrow |f(x+1) - f(x)| \leq 1, \forall x \in [n]$$

Mặt khác lại có

$$\begin{aligned} 0 &\leq g(x+1) + x + 2 - g(x) - x - 1 \leq 1 \\ &\Rightarrow -1 \leq g(x+1) - g(x) \leq 0 \\ &\Rightarrow |g(x+1) - g(x)| \leq 1 \end{aligned}$$

Suy ra f và g liên tục trên $[1, n]$. □

Nhận xét 3: $f(x) \leq n + 1, \forall x \in [n]$

Chứng minh. Giả sử tồn tại t sao cho $f(t) > n + 1$, vì $n + 1$ nguyên tố nên để đạt được từ $n + 1$ lên $n + 2$ viên bi thì phải chơi nhiều hơn $n + 1$ lượt, mâu thuẫn. □

Nhận xét 4: Tồn tại a để $g(a) = 0$.

Chứng minh. Thật vậy, vì $k > 1$ nên khi đó $g(1) = k - 2 \geq 0$. Mặt khác lại có $k \leq n$ nên $g(n) = f(n) - n - 1 \leq n + 1 - n - 1 = 0$.

Khi đó $g(1).g(n) \leq 0$ và vì g liên tục nên theo định lý giá trị trung gian thì tồn tại $a \in [n]$ để $g(a) = 0$. □

Nhận xét 5: Với $a \in [1, n]$ thỏa mãn $g(a) = 0$ thì $f(t) = t + 1, \forall t \geq a$.

Chứng minh. Thật vậy ở lượt thứ a thì số bi ở hộp k là $a + 1$. Nên ở lượt $a + 1$ thì hộp k có $a + 1$ viên nên tăng 1 viên, lặp lại như vậy, thì ta được $f(t) = t + 1, \forall t \geq a$. □

Khi này vì $n \geq t \geq a$ nên $f(n) = n + 1$. Vậy nên mỗi hộp sau n lượt có đúng $n + 1$ viên bi khi và chỉ khi $n + 1$ là số nguyên tố. □

Bài toán 8. (Thanh Hóa TST 2023). Cho các ý sau:

a) Tại ô vuông nằm ở vị trí trung tâm của một bảng ô vuông kích thước 11×11 (bảng gồm 121 ô vuông có cạnh là 1) có một quân cờ. Mỗi bước đi, quân cờ di chuyển đến ô vuông có chung cạnh. Có bao nhiêu cách đi để sau 10 bước đi thì quân cờ trở về vị trí ban đầu? Biết rằng trong quá trình di chuyển quân cờ có thể đi qua ô vuông nằm ở vị trí trung tâm.

b) Chọn ra một số tập con gồm 4 phần tử từ một tập hợp A có 36 phần tử sao cho bất cứ hai tập 4 phần tử nào trong các tập con đã chọn cũng có nhiều nhất là hai phần tử chung. Chứng minh rằng tồn tại một tập con của A gồm ít nhất 6 phần tử của A sao cho tập này không chứa bất cứ tập con 4 phần tử nào đã chọn.

Lời giải 8.

(a)

Nhận xét 1: Mỗi hướng đi chỉ đi được tối đa 5 lần. Giả sử có thể đi lên nhiều hơn 5 lần. Khi đó nếu chỉ toàn đi lên thì sẽ vượt khỏi bảng vuông. Nếu xuống 1 lần và lên 6 lần thì khi đó ở 3 lượt còn lại sẽ không đủ để về ô trung tâm. Tương tự vậy với hướng xuống, trái, phải.

Nhận xét 2: Số lần đi qua trái bằng với đi qua phải, đi lên bằng đi xuống. Giả sử số lần qua trái nhiều hơn qua phải. Gọi cột ở giữa là cột trung tâm. Để quay về cột giữa thì phải thực hiện di chuyển vòng tròn về hai bên hoặc nửa vòng tròn, khi đó số lần qua phải bằng với qua trái. Tương tự vậy với đi lên và xuống.

Ta sẽ đếm số nước đi của quân cờ.

Gọi i với $0 \leq i \leq 5$ là số lần đi lên (xuống). Khi đó, từ 10 lượt chọn ra i lượt có $\binom{10}{i}$ cách, đi

xuống có $\binom{10-i}{i}$ cách, đi trái có $\binom{10-2i}{5-i}$ cách, còn lại là đi phải. Suy ra ta được

$$\begin{aligned} S &= \sum_{i=0}^5 \binom{10}{i} \binom{10-i}{i} \binom{10-2i}{5-i} = \sum_{i=0}^5 \frac{10!}{(10-i)!i!} \cdot \frac{(10-i)!}{(10-2i)!i!} \cdot \frac{(10-2i)!}{(5-i)!^2} \\ &= \sum_{i=0}^5 252 \frac{5!^2}{(5-i)!^2 i!^2} \\ &= 252 \sum_{i=0}^5 \binom{5}{i}^2 \end{aligned}$$

Ta phát biểu và chứng minh bổ đề sau:

Bổ đề 1. Với mọi số nguyên dương n , ta luôn có

$$\binom{n}{0}^2 + \binom{n}{1}^2 + \binom{n}{2}^2 + \cdots + \binom{n}{n}^2 = \binom{2n}{n}$$

Chứng minh. Ta đếm số tập con n phần tử của tập $\{1, 2, \dots, 2n\}$ bằng 2 cách:

Cách 1: Chọn ra n phần tử bất kỳ thì được $\binom{2n}{n}$ tập hợp.

Cách 2: Gọi $A = \{1, 2, \dots, n\}$ và $B = \{n+1, n+2, \dots, 2n\}$. Từ A chọn ra i phần tử và từ B chọn ra $n-i$ phần tử. Ta được $\binom{n}{i} \binom{n}{n-i} = \binom{n}{i}^2$. Cho i chạy từ 0 đến n thì ta có được

$$\binom{n}{0}^2 + \binom{n}{1}^2 + \binom{n}{2}^2 + \cdots + \binom{n}{n}^2 = \binom{2n}{n}$$

□

Áp dụng bổ đề cho tổng S ta được số cách đi thỏa mãn đề bài là $S = 252 \binom{10}{5} = 63504$.

(b) Gọi A_1, A_2, \dots, A_m là các tập con được chọn ra và B là tập không chứa bất kỳ tập A_i nào. Gọi $k = \min(B)$. Ta có thể đếm $|A \setminus B|$ bằng hai cách.

Cách 1: Đếm theo phần bù thì rõ ràng $|A \setminus B| = 36 - k$.

Cách 2: Xét số $i \in A \setminus B$ thì rõ ràng tập $B \cup \{i\}$ là tập không thỏa nên tồn tại $f(i) \in \{1, 2, \dots, m\}$ sao cho $A_{f(i)} \subset B \cup \{i\} \Rightarrow i \in A_{f(i)}$ và $A_{f(i)} \setminus \{i\} \subset B$.

Mặt khác, vì $|A_i| = 4$ nên $|A_{f(i)} \setminus \{i\}| = 3$.

Giả sử tồn tại $x, y \in A \setminus B$ và $x \neq y$ mà $A_{f(x)} \cap \{x\} = A_{f(y)} \cap \{y\}$. Khi đó $A_{f(x)}$ và $A_{f(y)}$ có chung 3 phần tử, vô lý.

Vậy nên $A_{f(x)} \cap \{x\} \neq A_{f(y)} \cap \{y\}$. Do đó, phải tồn tại một song ánh $f : A \setminus B \rightarrow C$. Với $C = \{A_i \mid i = 1, 2, \dots, m\}$.

Ta được $|A \setminus B| \leq \binom{k}{4}$.

Từ đây suy ra $36 - k \geq \binom{k}{4}$. Thay $k = 6$ thì bất đẳng thức vẫn thỏa mãn.

Vậy nên tồn tại tập B thỏa mãn đề bài.

□

Nhận xét: Ý (b) của bài toán khá quen thuộc mà chẳng qua là đã được chỉnh sửa số từ bài toán gốc sau:

Bài toán 9. (Yufei Zhao). Cho X là một tập hữu hạn có $|X| = n$, và gọi A_1, A_2, \dots, A_m là các tập con của X có ba phần tử sao cho $|A_i \cap A_j| \leq 1$ cho tất cả $i \neq j$. Chứng minh rằng tồn tại một tập con B của X , có ít nhất $\sqrt{2n}$ phần tử, sao cho $B \not\subseteq A_i$ với mọi $i \in [m]$.

Lời giải 9. Đặt $A = (A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_m)$ Giả sử $\exists k_{\min} : |B| \geq k$ và $B \not\subseteq A_i, \forall i \in [m]$. Khi này ta có thể đếm A bằng hai cách.

1. *Cách 1 (theo phần bù):* Trường hợp A nhỏ nhất chắc chắn là khi các A_i đều không lẫn sang B , và ta có được $A \geq n - k$
2. *Cách 2 (Đếm quét cực đại):* Giả sử $\exists x_i \in B$ sao cho $x \cup A_i \subset A$. Theo giả thuyết đề bài thì mỗi $|A_i \cap A| = 2$ và $|A_i \cap B| = 1$. Cho nên $|A| \leq \binom{k}{2}$

Tổng kết lại thì

$$n - k \leq \binom{k}{2} k^2 + k \geq 2n\Delta \Leftrightarrow 4 + 8nk \geq \frac{-1 + 2\sqrt{1 + 2n}}{2} \geq \sqrt{2n}$$

□

Bài toán 10. (Yannick Yao). Hai số hữu tỉ $\frac{m}{n}$ và $\frac{n}{m}$ được viết trên một bảng đen, với m và n là các số nguyên dương nguyên tố cùng nhau. Tại bất kỳ thời điểm nào, Evan có thể chọn hai số x và y được viết trên bảng và viết số trung bình cộng $\frac{x+y}{2}$ hoặc số trung bình nghịch đảo $\frac{2xy}{x+y}$ của chúng lên bảng. Tìm tất cả các cặp (m, n) sao cho Evan có thể viết 1 lên bảng trong một số bước hữu hạn.

Lời giải 10. Ta chứng minh bằng quy nạp rằng xuất phát từ 2 số a, b ta lấy trung bình cộng của các số thì sau n bước ta nhận được tất cả các số có dạng $\frac{ka + (2^n - k)b}{2^n}, \forall k = 0, \dots, 2^n$. Thay $(a, b) = \left(\frac{m}{n}, \frac{n}{m}\right)$ và chọn $m + n = 2^k$ ta được số 1.

Ta chứng minh rằng nếu $m + n \neq 2^k$ thì không viết được số 1. Xét $p \in \mathbb{P}$ sao cho $p \mid m + n$. Ta nghịch đảo modulo p , do $m + n \equiv 0 \pmod{p}$ nên $\frac{m}{n} \equiv \frac{n}{m} \equiv -1 \pmod{p}$

Mọi số được viết trên bảng đều $\equiv -1 \pmod{p}$ vì nếu $x, y \equiv -1 \pmod{p}$ thì $\frac{x+y}{2} \equiv \frac{-1-1}{2} \equiv -1 \pmod{p}$ và $\frac{2xy}{x+y} \equiv \frac{2}{-2} \equiv -1 \pmod{p}$. Vậy nên không bao giờ viết được 1 vì $1 \not\equiv -1 \pmod{p}$.

Như vậy để thỏa mãn đề bài thì chọn (m, n) có dạng $m + n = 2^k$ với k nguyên không âm bất kỳ. □

Bài toán 11. (Đồng Tháp TST 2022). Trên đường tròn có 2023 điểm phân biệt. Tìm số nguyên dương n nhỏ nhất sao cho với mọi cách chọn n điểm trong số các điểm trên, tồn tại hai điểm sao cho phần trong của một trong hai cung tròn có đầu mút là hai điểm nói trên chứa đúng 1012 điểm trong số 2023 điểm đã cho (phần trong của một cung tròn là các điểm của cung đó không kể hai đầu mút).

Lời giải 11. Ta chứng minh $n \geq 1011$ là giá trị nhỏ nhất cần tìm.

Ta thấy rằng một cặp điểm thỏa mãn là khi số các điểm nằm bên trong và ngoài cung tương ứng là 1012 và 1009. Giả sử 2023 điểm này là đều nhau và được đánh số từ $1 \rightarrow 2023$.

Thật vậy, với $n = 1010$. Khi đó, với cách chọn 1010 điểm liên tiếp trên đường tròn. Gọi A, B là hai điểm ở ngoài cùng có cung bên trong lớn nhất, và bên ngoài nhỏ nhất. Khi đó số các điểm trong và ngoài của cung AB là $1009 - 2 + 1 = 1008$ và $2023 - 1011 + 1 = 1013$, mà các điểm bên trong thì lại tạo ra cung trong nhỏ hơn và cung ngoài lớn hơn. Do đó $n \geq 1011$.

Với $n \geq 1011$. Ta chia 2023 điểm thành các cặp

$$(1, 1014), (2, 1015), \dots, (1010, 2023), (1011, 1), (1012, 2), (1013, 3), \dots, (2023, 1013) \quad (1)$$

Ta chọn ít nhất 1011 số, mỗi số được chọn sẽ nằm trong 2 cặp ở (1), mà lại có 2023 cặp. Khi đó sau 1011 lần bỏ vào, theo Dirichlet sẽ có ít nhất một cặp được bỏ vào 2 lần. \square

Bài toán 12. (Bình Phước TST 2023). Trên bàn có 99 tấm thẻ được đánh số từ 1 đến 4 và từ 6 đến 100. Hai bạn A và B luân phiên chơi trò chơi với luật như sau:

1. A là người thực hiện lượt chơi đầu tiên.
2. Trong mỗi lượt chơi, người chơi nhặt ra khỏi bàn 2 tấm thẻ được đánh hai số nguyên liên tiếp nhau sao cho số bé hơn không chia hết cho 10 và giữ một tấm thẻ trên tay đồng thời bỏ đi tấm thẻ còn lại.
3. Khi tới lượt chơi của mình, nếu người chơi không thể thực hiện được yêu cầu ii hoặc chọn được hai tấm thẻ nhưng tổng số của một trong hai tấm thẻ đó với một tấm thẻ tùy ý trên tay hai người chơi đang giữ bằng 101 thì là người thua cuộc.

Biết rằng hai người chơi có thể thấy được số ghi trên tất cả các tấm thẻ trên bàn và trong tay đối thủ. Hỏi ai là người có chiến thuật thắng.

Lời giải 12. Ta chứng minh rằng A là người chiến thắng. Ở lượt đầu, A lấy 95, 96 bỏ 95. Khi đó số 6 không được chọn. Vì số nhỏ hơn được chọn không chia hết cho 10 nên các cặp được chọn chỉ nằm trong từng đoạn $[1, 10], [11, 20], [21, 30], \dots, [91, 100]$.

Phân hoạch các tập thành $X = [1, 4], Y = [7, 10]$ và $Z = [11, 50], T = [51, 100]$. Nếu B chọn cặp trong X thì A chọn cặp trong Y theo vị trí đối xứng và ngược lại. Tương tự với tập Z và T. \square

Bài toán 1. (Trường hè Vinh 2023). Có k người trong một gia đình đi nghỉ mát trong thời gian 7 ngày tại khu du lịch. Buổi sáng, mỗi người chọn ăn một trong 3 món: xôi, phở hoặc bánh mì. Biết rằng trong bất kỳ 3 ngày nào, cũng có ít nhất một người mà trong 3 ngày này chọn ăn 3 món phân biệt. Tìm giá trị nhỏ nhất có thể của k .

Bài toán 2. (OLP 30/4/2021) Bộ hai số nguyên khác không (x, y) được gọi là "bộ số đẹp" nếu x là số lẻ, y là số chẵn, x, y nguyên tố cùng nhau và $x^2 - y^2$ là số chính phương.

1. Chứng minh rằng (x, y) là "bộ số đẹp" khi và chỉ khi tồn tại 2 số nguyên u, v khác 0 và khác tính chẵn lẻ, nguyên tố cùng nhau sao cho $(x, y) = (u^2 - v^2, 2uv)$.
2. Với mỗi bộ số đẹp (x, y) ta có thể tạo ra 1 bộ số đẹp mới bằng 1 trong 2 phép biến đổi: hoặc đổi dấu của 1 trong 2 số hoặc cộng 1 số nguyên k nào đó vào cả 2 số sao cho $(x + k, y + k)$

là bộ số đẹp. Chứng minh rằng với bất kỳ bộ số đẹp (x, y) và (z, t) cho trước ta luôn có thể biến đổi từ (x, y) thành (z, t) sau hữu hạn các bước biến đổi như trên.

Bài toán 3. (OLP 30/4/2023). Ký hiệu $(a_1, a_2, \dots, a_{2023})$ là một hoán vị của tập hợp $X = \{1; 2; \dots; 2023\}$ thỏa mãn tính chất $2(a_1 + a_2 + \dots + a_k)$ chia hết cho k với mọi $k = 1, 2, \dots, 2023$.

1. Chứng minh $a_{2023} \in \{1, 2023\}$.
2. Tính số các hoán vị trên.

Bài toán 4. (Đồng Nai TST 2023). Cho các ý sau:

- (a) Cho 2024 viên bi được xếp thành hàng ngang. Tính số các cách đặt 29 chiếc thẻ vào giữa các viên bi thỏa mãn ở giữa hai viên bi kề nhau chỉ có nhiều nhất một chiếc thẻ và các viên bi đã cho được thành 30 phần, mà mỗi phần có ít nhất 9 viên bi.
- (b) Cho 2024 viên bi giống nhau được đặt vào các đỉnh của hình đa giác đều có 2024 cạnh nội tiếp đường tròn (O) , mỗi đỉnh chỉ có 1 viên bi. Tính số các đặt 29 chiếc thẻ giống nhau vào trung điểm các cạnh của đa giác đã cho thỏa mãn tại mỗi trung điểm có nhiều nhất một chiếc thẻ và các viên bi đã cho được chia thành 29 phần, mà mỗi phần có ít nhất 9 viên bi (biết hai cách đặt thẻ được coi là như nhau nếu tồn tại phép quay quanh tâm O biến cách chia này thành cách chia kia).

Bài toán 5. (Hà Tĩnh TST 2023). Cho n số nguyên dương đôi một phân biệt a_1, a_2, \dots, a_n . Chứng minh rằng với mọi $i \in [n]$, tồn tại số nguyên dương b sao cho ba_i là lũy thừa của số nguyên dương với số mũ lớn hơn 1.

Lời giải 13. Ta chứng minh bằng quy nạp rằng xuất phát từ 2 số a, b ta lấy trung bình cộng của các số thì sau n bước ta nhận được tất cả các số có dạng $\frac{ka + (2^n - k)b}{2^n}, \forall k = 0, \dots, 2^n$. Thay $(a, b) = \left(\frac{m}{n}, \frac{n}{m}\right)$ và chọn $m + n = 2^k$ ta được số 1.

Ta chứng minh rằng nếu $m + n \neq 2^k$ thì không viết được số 1. Xét $p \in \mathbb{P}$ sao cho $p \mid m + n$. Ta nghịch đảo modulo p , do $m + n \equiv 0 \pmod{p}$ nên $\frac{m}{n} \equiv \frac{n}{m} \equiv -1 \pmod{p}$

Mọi số được viết trên bảng đều $\equiv -1 \pmod{p}$ vì nếu $x, y \equiv -1 \pmod{p}$ thì $\frac{x+y}{2} \equiv \frac{-1-1}{2} \equiv -1 \pmod{p}$ và $\frac{2xy}{x+y} \equiv \frac{2}{-2} \equiv -1 \pmod{p}$. Vậy nên không bao giờ viết được 1 vì $1 \not\equiv -1 \pmod{p}$. Như vậy để thỏa mãn đề bài thì chọn (m, n) có dạng $m + n = 2^k$ với k nguyên không âm bất kỳ. \square

Bài toán 6. (PTNK 2022). Cho $n, k \geq 2$ là hai số nguyên dương và a_0, a_1, \dots, a_k là các số nguyên dương cho trước. Đặt $S_n = \{1, 2, \dots, n\}$, ta ký hiệu A_n là số các bộ $(x_1, x_2, \dots, x_k) \in S_n^k$ thỏa điều kiện:

$$n \mid a_0 + a_1x_1 + \dots + a_kx_k.$$

- (a) Xét số nguyên tố $p \geq 5; a_0, a_1, \dots, a_k$ phân biệt và đều nhỏ hơn p . Tính A_{p^2} .
- (b) Tính A_n với trường hợp tổng quát.

Bài toán 13. (PTNK 2023). Cho n là một số nguyên dương. Một bảng ô vuông gồm n hàng và n cột gồm n^2 ô vuông đơn vị ta gọi là một bảng $n \times n$. Với mỗi số nguyên $k (1 \leq k \leq n)$,

trên mỗi hàng ta chọn k hàng liên tiếp và trên mỗi cột ta chọn k cột liên tiếp, khi đó k^2 ô vuông nằm ở phần giao nhau ta gọi là một bảng con $k \times k$ của bảng $n \times n$ ban đầu.

- (a) Điền các số $1, 2, 3, \dots, 81$ vào bảng 9×9 . Chứng minh rằng tồn tại bảng con 2×2 có tổng của 4 số được điền trong nó lớn hơn 137.
- (b) Giả sử n là số lẻ. Mỗi ô vuông đơn vị của bảng $n \times n$ ta điền một số thuộc $\{-1; 0; 1\}$ sao cho mỗi bảng con 2×2 có tổng của 4 số được điền trong nó là 0. Gọi S là tổng của n^2 số trong bảng $n \times n$. Tìm giá trị lớn nhất của S .

Lời giải 14. (a) Gọi □

Bài toán 14. (KHTN Lớp 10 - 2023). Viết một trăm số nguyên dương đầu tiên $1, 2, \dots, 100$ vào một bảng ô vuông kích thước 10×10 một cách tùy ý sao cho mỗi ô được viết đúng một số. Chứng minh rằng tồn tại hai ô kề nhau (2 ô có cạnh chung) mà hai số viết ở hai ô này có hiệu lớn hơn hoặc bằng 10.

Lời giải 15. Giả sử với mọi hai ô kề nhau thì hiệu của chúng luôn bé hơn 10. Xét ba tập hợp sau

$$A_x = \{1, 2, \dots, x\}$$

$$B_x = \{x + 1, x + 2, \dots, x + 9\}$$

$$C_x = \{x + 10, x + 11, \dots, 100\}$$

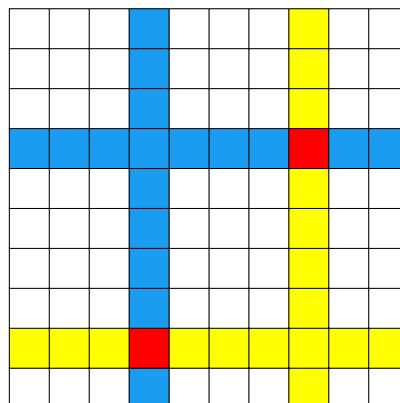
với x chạy trên $[2, 90]$. Để ý rằng hai số kề nhau thì không thể nằm trong cả hai tập A và C . Theo nguyên lý Dirichlet, sẽ tồn tại một hàng và một cột không chứa phần tử nào của B . Gọi hợp của hàng và cột đó là một "dấu cộng". Mọi số nằm trên dấu cộng sẽ chỉ có hai khả năng là toàn bộ thuộc A hoặc C . Ta giả sử đó là A thì $A \geq 19$.

Khi x chạy trên $[1, 90]$ thì dấu cộng sẽ thay đổi. Ta sẽ chứng minh rằng tồn tại một giá trị mà ở đó dấu cộng của A sẽ biến thành của C khi x tăng một đơn vị, hoặc ngược lại.

Với $x = 2$ thì $A = 2 < 19$ nên dấu cộng của $x = 2$ sẽ chứa C .

Với $x = 90$ thì $C = 10 < 19$ nên dấu cộng của $x = 90$ sẽ chứa A .

Khi này theo sự liên tục trong rời rạc thì sẽ tồn tại $i \in [2, 90]$ để dấu cộng chứa C tại i và chứa A tại $i + 1$.



Khi này thì hai dấu cộng sẽ giao nhau tại hai điểm. Mà lại khả năng C hoặc A mất đi một số nên sẽ tồn tại một số là giao của hai dấu cộng. □

Bài toán 15. (IMO Shortlist 2013 C1). Cho n là một số nguyên dương. Tìm số nguyên nhỏ nhất k với tính chất sau: Cho bất kỳ các số thực a_1, \dots, a_d sao cho $a_1 + a_2 + \dots + a_d = n$ và $0 \leq a_i \leq 1$ với $i = 1, 2, \dots, d$, ta có thể phân chia các số này thành k nhóm (một số trong số đó có thể là rỗng) sao cho tổng của các số trong mỗi nhóm không vượt quá 1.

Lời giải 16. Ta sẽ tìm cách phân hoạch đủ lớn, sao cho mỗi nhóm của k chỉ chứa ít nhất 1 phần tử để khi đó k sẽ có chặn dưới tốt nhất.

Thật vậy, để có tồn tại phân nhóm ít nhất không thể phân được nữa thì mỗi phân hoạch a_i phải lớn hơn $\frac{1}{2}$ để mỗi nhóm chỉ chứa đúng 1 phân hoạch. Xét phân hoạch $a_i = \frac{1}{2} + \frac{1}{d}, \forall i = 1, 2, \dots$

$$a_1 + a_2 + \dots + a_d = \frac{d}{2} + 1 = n$$

Suy ra $d = 2n - 2$ và $k_{\min} = 2n - 2$. □

Bài toán 16. (Japan MO Final 2016 P3). Cho n là một số nguyên dương. Trong vương quốc Skibidi có 2^n công dân và một vị vua. Trong ngôn ngữ tiền tệ, vương quốc sử dụng các tờ giấy bạc có mệnh giá là 2^n đồng và các đồng xu có mệnh giá là 2^a (với $a = 0, 1, \dots, n-1$). Mỗi công dân có vô số tờ giấy bạc (không tính đến lạm phát). Gọi S là tổng số đồng xu trong vương quốc. Một ngày đẹp trời, vua quyết định triển khai một chính sách sẽ được thực hiện mỗi đêm:

1. Mỗi công dân phải và anh ta phải chuyển một số tiền hữu hạn cho một công dân khác hoặc cho vua.
2. Mỗi công dân phải chuyển chính xác nhiều hơn \$1 số tiền mà anh ta nhận được từ một công dân khác.
3. Luôn phải có một công dân kết thúc quá trình này bằng cách đưa tiền cho vua.

Tìm giá trị nhỏ nhất của S sao cho vua có thể thu tiền mỗi đêm mà không bao giờ hết tiền.

Lời giải 17. Tuy mỗi người có vô hạn tiền giấy, nhưng lại có hữu hạn xu. Vậy nên người cuối cùng đưa tiền cho vua phải đưa k tờ tiền 2^n và ta gọi cách chuyển tiền này là \mathbb{H} . Ta hãy xét thuật toán như sau:

Để chuyển tiền thỏa mãn \mathbb{H} , người đầu tiên phải đưa một số tiền bằng $k2^n$ với $k \geq 1$, vì ta muốn S nhỏ nhất nên ta có thể tối ưu bằng cách để anh ta đưa k tờ tiền giấy. Và mỗi người tiếp theo là $2, 3, \dots, 2^n - 1$ sẽ góp \$1 xu vào đến người thứ 2^n số tiền góp lại hiện tại là $(k+1)2^n$ tính cả người thứ 2^n đã góp vào, vì tiền giấy của anh ta là vô hạn nên anh ta có thể đưa nhà vua $k+1$ tờ tiền bao nhiêu lần cũng được.

Khi này người thứ 2^n đang giữ 2^n đồng xu. Nếu ta chặn $S_{\min} = 2^n$ thì sẽ có vài người ở lượt sau không có \$1 xu nên không thể chuyển tiền được.

Vì vậy nên ta phải đưa cho mỗi người t xu sao cho sau khi chọn $2^n - 1$ người làm người cuối cùng đưa tiền cho vua, thì người này vẫn có thể tiếp tục chuyển tiền được.

Thật vậy, vì mỗi lần chuyển là tốn \$1 nên sau 2^n lần chuyển thì $t \geq 2^{n-1}$

Lấy tổng lại từng người thì ta được $S_{\min} = n2^{n-1}$, hoàn tất bài toán. □

Bài toán 17. (IMO Shortlist 2003) Cho A là một tập con gồm 101 phần tử của tập $S = [1000000]$. Chứng minh rằng tồn tại các số t_1, t_2, \dots, t_{100} trong S sao cho các tập

$$A_j = \{x + t_j \mid x \in A\}, \quad j = 1, 2, \dots, 100$$

là đôi một không giao nhau.

Lời giải 18. Xét tập hợp $D = \{x - y \mid x, y \in A\}$, khi đó hai tập A_i và A_j giao nhau khi và chỉ khi $t_i - t_j \in D$. Ngược lại, nếu $A_i \cap A_j = \emptyset$ thì khi đó $t_i - t_j \notin D$. Xét đồ thị $G = (V, E)$ có 10^6 đỉnh, với mỗi đỉnh v_i là tập A_i . Nếu $A_i \cap A_j = \emptyset$ thì có cạnh ij . Thật vậy, xét đỉnh i bất kỳ. Để đỉnh j kề i thì $t_i - t_j \notin D$, thế nên chọn j có $10^6 - |D| = 10^6 - 100 \cdot 101$ cách. Suy ra $d(i) = 10^6 - 100 \cdot 101$. Theo bổ đề bắt tay, ta có

$$|E(G)| = \frac{\sum_{i=1}^{10^6} d(i)}{2} = \frac{10^6(10^6 - 100 \cdot 101)}{2} > \frac{98 \cdot 10^{12}}{99 \cdot 2}$$

Theo định lý Turan, tồn tại một K_{100} ở G . Nói cách khác, tồn tại các tập A_i rời nhau, hoàn tất chứng minh. \square

Bài toán 18. (USAMO 2020). Cho các cặp số nguyên không âm $(a_1, b_1), (a_2, b_2), \dots, (a_{100}, b_{100})$. Đặt N là số các cặp (i, j) thỏa mãn $1 \leq i < j \leq 100$ và $|a_i b_j - a_j b_i| = 1$. Xác định giá trị lớn nhất của N qua tất cả các lựa chọn có thể của 100 cặp được sắp xếp.

Có thể thấy rằng, với mọi cách chọn của B thì A luôn có thể chọn được qua phép đối xứng. Vì vậy đến một lúc nào đó, hoặc là đến lượt B thì X, Y, Z, T đều rỗng, hoặc là mọi số còn lại đều không còn liên nhau trong các tập. Vậy nên A là người thắng cuộc.

Lời giải 19. Bài toán có thể phát biểu như sau: Cho n điểm nguyên ở góc phần tư thứ nhất của hệ trục Oxy . Tìm số tam giác lớn nhất có thể có diện tích là $\frac{1}{2}$ được tạo từ $O(0, 0)$ và 2 trong n điểm này. Gọi điểm thuộc tam giác có diện tích $\frac{1}{2}$ là điểm tốt.

Nhận xét 1: Mọi điểm tốt $M(a, b)$ đều thỏa mãn $(a, b) = 1$.

Chứng minh. Giả sử tồn tại $N(x, y)$ sao cho $|ax - by| = 1$. Khi đó theo định lý Bezout, ta được $(a, b) = 1$. \square

Gọi (u_n) là số tam giác tốt nhiều nhất có thể, ta có $u_2 = 1$.

Nhận xét 2: Xét điểm P_{n+1} tốt, khi đó P_{n+1} nằm trong nhiều nhất 2 tam giác tốt.

Chứng minh. Xét quỹ tích của $Q(x, y)$ sao cho $|ax - by| = 1$. Khi đó (x, y) nằm trên hai đường thẳng là $ax - by = 1$ và $ax - by = -1$ với $(x, y) = 1$ và hai đường này bị giới hạn bởi góc phần tư của đường tròn (O, OP) .

Khi đó chỉ tồn tại nhiều nhất hai điểm $Q(x_1, x_1)$ và $Q(x_2, x_2)$ mỗi điểm thỏa mãn phương trình trên.

Giả sử tồn tại $Q(x', y')$ sao cho $ax' - by' = 1$ và $(x', y') < (a, b)$. Khi đó ta có $a(x_1 - x') = b(y_1 - y') \Leftrightarrow \frac{a}{b} = \frac{x_1 - x'}{y_1 - y'}$

Vì $(a, b) = 1$ nên tồn tại số nguyên dương k sao cho $x_1 - x' = ka, y_1 - y' = kb$. Suy ra $(x', y') = (x_1 - ka, y_1 - kb)$. Nhưng vì $x_1 < a < ka, y_1 < b < kb$ nên vô lý. \square

Khi đó ta có được $u_{n+1} \leq u_n + 2 \leq \dots \leq u_2 + 2(n-2) = 2n - 1$

Vậy nên $u_n \leq 2n - 3 \Rightarrow u_{100} \leq 197$. Ta có thể chỉ ra một cấu hình thỏa mãn như sau:

$$(1, 0), (1, 1), (1, 2), (1, 3), \dots, (1, 99)$$

Ghép $(1, 0)$ lần lượt với các cặp còn lại và ghép 2 cặp kề nhau bất kỳ thì ta được nhiều nhất 197 cặp tốt. \square

Bài toán 19. (Korean MO 2023). Cho các tập hợp $A_0, A_1, \dots, A_{2023}$ thỏa mãn các điều kiện sau:

$$1. A_0 = \{3\}$$

$$2. A_n = \{x + 2 \mid x \in A_{n-1}\} \cup \{x(x+1)/2 \mid x \in A_{n-1}\} \text{ với mọi } n = 1, 2, \dots, 2023.$$

Tính $|A_{2023}|$.

Lời giải 20. Giả sử tồn tại hai dãy phép toán có cùng độ dài biến 3 thành cùng một số. Giả sử số đó là $\frac{2k(2k+1)}{2} = 2k^2 + k$

Ta được hai số trước đó là $2k^2 + k - 2$ và $2k$.

Xét số $\frac{2k(2k-1)}{2}$ thì cần tối thiểu $k-1$ phép toán để trở thành $2k^2 + k$ tuy nhiên điều này là không thể vì khi đó để được $2k$ thì phải xuất phát lớn nhất là 2 vô lý. Vậy nên

$$\{x + 2 \mid x \in A_{n-1}\} \cap \{x(x+1)/2 \mid x \in A_{n-1}\} = \emptyset$$

Khi đó ta được $|A_{2023}| = 2^{2023}$. \square

Bài toán 20. (India TST 2010). Cho bảng vuông 10×10 , mỗi ô (i, j) được điền bởi một số thực dương a_{ij} sao cho tổng các số thuộc mỗi hàng, mỗi cột của bảng luôn là 1. Chứng minh rằng tồn tại $j, k, l, m \in [10]$ với $j < k$ và $l < m$ sao cho

$$a_{jl}a_{km} + a_{jm}a_{kl} \geq \frac{1}{50}$$

Lời giải 21. Rõ ràng 4 điểm nói trên tạo ra một hình chữ nhật nằm trong bảng ô vuông đó (tổng tích các cạnh đối lớn hơn hoặc bằng $\frac{1}{50}$)

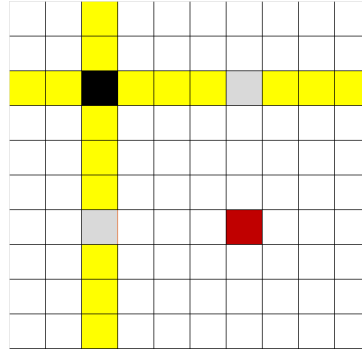
- Ta sẽ giả sử rằng với mọi bốn điểm như vậy thì hệ thức trên luôn bé hơn $\frac{1}{50}$

Ta đếm tổng giá trị các phần tử của tập hợp

$$S = \{a_{jl}a_{km} + a_{jm}a_{kl}\}$$

Cách 1: Chọn ra hai dòng bất kỳ và từ một trong hai dòng đó chọn ra 2 điểm, ta tạo được một hình chữ nhật. Ta được

$$|S| < \frac{1}{50} \binom{10}{2} \binom{10}{2}$$



Cách 2: Đếm dựa trên một điểm a_{ij} cho trước. Ta sẽ tìm một điểm b_{mn} nào đó để tạo nên một đường chéo.

Khi đó nếu ta lấy $\sum a_{ij}b_{mn}$ và nhân 2 lên chia cho 4 thì ta được S , vì mỗi lần chọn cặp (a, b) thì ta chọn ra 2 đường chéo, tức là sau khi đếm hết thì mỗi đường chéo được đếm hai lần.

- Nhưng nếu đếm như vậy thì mỗi cấu hình của S sẽ lặp lại 4 lần, tức là ô màu đen và đỏ đổi vị trí cho nhau, ô màu đen và đỏ thế chỗ cho 2 ô xám, ta được 4 cấu hình như nhau.

Gọi S_{ij} là tổng giá trị các phần tử trong S có chứa a_{ij} . Ta được

$$S_{ij} = a_{ij} \sum b_{mn}$$

Chọn a có 100 cách. Theo hình vẽ bên trên thì những chỉ những ô màu trắng mới chứa được b , nên do đó b có $100 - 10 - 9 = 81$ cách, viết lại

$$S_{ij} = a_{ij} \sum_{1}^{81} b_{mn}$$

Nếu nhìn vào bảng thì ta còn có thể làm gọn tổng này hơn nữa. Ta có

$$S_{ij} = a_{ij}[10 - 1 - (1 - a_{ij})] = a_{ij}(8 + a_{ij}) = a_{ij}^2 + 8a_{ij}$$

Cộng lại các S_{ij} ta được

$$|S| = \frac{1}{2} \sum_{1}^{100} S_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{1}^{100} a_{ij}^2 + 8a_{ij} = \frac{1}{2} \cdot 8 \cdot 10 + \frac{1}{2} \sum_{1}^{100} a_{ij}^2$$

Áp dụng bất đẳng thức Cauchy-Schwartz ta có

$$\sum_{i=1}^{100} a_{ij}^2 \geq \frac{\left(\sum_{i=1}^{100} a_{ij} \right)^2}{100} = 1$$

$$\text{Do đó } |S| \geq \frac{1}{2} \cdot 80 \cdot 10 + \frac{1}{2} = \frac{81}{2}$$

Từ đây cho ta được mâu thuẫn bài toán, suy ra điều phải chứng minh. □

Bài toán 21. (Japan MO Final 2017). Cho số nguyên dương $n \geq 3$. Có n người, mỗi ngày tổ chức một cuộc họp mà ít nhất 3 người tham dự. Mỗi người trong cuộc họp bắt tay với tất cả những người còn lại. Sau n cuộc họp, mỗi cặp người đã bắt tay đúng một lần. Chứng minh rằng mỗi cuộc họp đều có cùng số người tham dự.

Ta phát biểu hai lời giải theo ngôn ngữ lập luận và đồ thị.

Lời giải 22.

Nhận xét 1: Nếu A không tham gia ngày thứ m thì số ngày A tham gia phải ít nhất bằng số người tham gia ngày thứ m .

Chứng minh. Nếu những người ở ngày hôm đó đã bắt tay nhau, vậy nên họ không thể gặp lại lần nữa, tức để A có thể bắt tay với tất cả những người đó thì phải có mặt ở những ngày mà những người đó có mặt. □

Ta sẽ đếm tổng số lượng người vào tất cả các ngày bằng hai cách.

Không mất tính tổng quát, giả sử ngày thứ nhất có nhiều người tham gia nhất, và ngày thứ hai có nhiều người tham gia thứ nhì. Giả sử số người tham gia ngày 1 và ngày 2 lần lượt là a và b , thì ta có số người tham gia nhiều nhất phải là $a + b(n - 1)$.

Những người đã bắt tay vào ngày thứ nhất thì ngày thứ hai không thể xuất hiện cùng nhau, vì vậy có nhiều nhất một người A tham gia cả ngày một và hai.

Thế nên có $a - 1$ người ở ngày thứ nhất xuất hiện b lần khác nhau và A xuất hiện ít nhất 2 lần. Hơn nữa, những người không có mặt ở ngày thứ nhất sẽ xuất hiện ít nhất ở a ngày. Vậy nên tổng số người tham gia ít nhất là $(a - 1)b + a(n - a) + 2$. Ta có bất đẳng thức

$$(a - 1)b + a(n - a) + 2 \leq a + b(n - 1) \Leftrightarrow (a - b)(n - a) < a$$

Nếu $a \neq b$ thế thì $n - a < a \Leftrightarrow a > \frac{n}{2}$

Những người không có mặt vào ngày thứ nhất sẽ phải xuất hiện ít nhất trong $\frac{n}{2}$ ngày. Điều này rõ ràng là mâu thuẫn vì nếu người thứ nhất xuất hiện từ ngày 2 đến $\frac{n}{2}$ thì người thứ hai phải xuất hiện ngày $\frac{n}{2}$ đến ngày n , xét đến người ba thì anh ta luôn xuất hiện nhiều lần hoặc với người đầu hoặc người thứ hai, mâu thuẫn.

Điều này dẫn đến việc $a \leq \frac{n}{2} \Leftrightarrow n - a > a$. Để bất đẳng thức trên đúng thì $a = b$

Mà thế thì mọi người đều phải tham gia ít nhất a ngày nên vì thế số người tham gia mỗi ngày là như nhau, hoàn tất chứng minh. □

Cách 2: Bài toán có thể phát biểu lại như sau:

Bổ đề 2. Xét $G = (V, E)$ có n đỉnh và không có cạnh. Mỗi một lần, lấy ra ít nhất 3 đỉnh đôi một độc lập nhau và nối chúng lại với nhau. Sau n lần ta được một K_n đầy đủ. Chứng minh rằng số đỉnh mỗi lần lấy là như nhau.

Chứng minh. Gọi T_i là tập hợp các đỉnh ở lần lấy thao tác thứ i , $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$. Ký hiệu $T_i = |T_i|$. Gọi $A(u)$ là số lần xuất hiện của u sau n lần thao tác.

Nhận xét 1: Nếu $u \notin T_k$ bất kỳ thì $A(u) \geq T_k$.

Chứng minh. Giả sử $A(u) < T_k$. Vì mỗi lần T_k thì các cặp đỉnh không được chọn lại nên nếu $v_m, v_n \in T_k$ thì $\nexists j \in [n] : v_m, v_n \in T_j$. Mà vì $d(u) = n - 1$ nên sẽ tồn tại một đỉnh không kề v , vô lý. \square

Không mất tính tổng quát, giả sử $T_1 = \max(T) = a, T_2 = \max(T \setminus \{T_1\}) = b$. Đặt $S = \sum_{i=1}^n T_i$. Giả thuyết rằng $a > b$.

Nhận xét 2: $S \leq a + (n - 1)b$.

Chứng minh. Điều này có thể dễ dàng chứng minh bằng định nghĩa:

$$S = T_1 + T_2 + \dots + T_n \leq a + b + b + b + \dots + b = a + b(n - 1)$$

\square

Nhận xét 3: $S \geq a(n - a) + b(a - 1)$

Chứng minh. Để ý rằng $|T_1 \cap T_2| \leq 1$. Vì nếu không sẽ có $u, v \in T_1, T_2$ vô lý vì hai đỉnh bất kỳ chỉ được ghép 1 lần.

Khi này với $u \notin T_1$ thì theo nhận xét 1 ta có $A(u) \geq a$.

Với $v \in T_1 \setminus T_2$ thì sẽ có $A(v) \geq b$.

Tương tự với $w \in T_1 \cap T_2$ thì có $A(w) \geq 2$. Từ đó ta suy ra

$$S \geq a(n - a) + b(a - 1) + 2$$

\square

Kết hợp lại hai điều trên ta được

$$\begin{aligned} a + (n - 1)b &\geq a(n - a) + b(a - 1) + 2 \Leftrightarrow a \geq an - a^2 + ab + 2 - nb \\ &> (n - a)(a - b) \\ &> n - a \end{aligned}$$

Suy ra $a > \frac{n}{2}$. Do đó với $u, v, w \notin T_1$ thì $A(u), A(v), A(w) > \frac{n}{2}$. Theo Dirichlet thì tồn tại hai trong số 3 đỉnh trên cùng xuất hiện nhiều hơn 2 lần, mâu thuẫn. Vậy nên $a = b$. Kéo theo $|T_1| = |T_2| = \dots = |T_n|$, hoàn tất chứng minh. \square

Bài toán 22. (Japan MO Final 2018 P1). Cho các số nguyên dương từ 1 đến 100 được viết trên một bảng đen, mỗi số đúng một lần. Một phép toán bao gồm việc chọn hai số a và b trên bảng đen và xóa chúng, sau đó viết số ước chung lớn nhất của $a^2 + b^2 + 2$ và $a^2b^2 + 3$. Sau một số lượng phép toán, chỉ còn lại một số nguyên dương trên bảng đen. Chứng minh rằng số này không thể là số chính phương.

Lời giải 23. Ta chứng minh $3 \mid \gcd(a^2 + b^2 + 2, a^2b^2 + 3)$ khi và chỉ khi có một trong hai số chia hết cho 3.

Nếu $3 \mid a, b$ thì khi đó $3 \nmid a^2 + b^2 + 2$ nên $3 \nmid \gcd(a^2 + b^2 + 2, a^2b^2 + 3)$

Nếu $3 \nmid a, b$ thì $3 \nmid a^2b^2 + 3$ nên $3 \nmid \gcd(a^2 + b^2 + 2, a^2b^2 + 3)$

Nếu chỉ có a hoặc b chia hết cho 3, giả sử $3 \mid a$, khi đó ta có hai trường hợp

Nếu $b = 3k + 1, k \in \mathbb{Z}$ thì khi đó $a^2 + b^2 + 2 = a^2 + 9k^2 + 6k + 1 + 2 \equiv 0 \pmod{3}$

Nếu $b = 3k + 2, k \in \mathbb{Z}$ thì khi đó $a^2 + b^2 + 2 = a^2 + 9k^2 + 6k + 4 + 2 \equiv 0 \pmod{3}$

Khẳng định được chứng minh.

Mặt khác dễ dàng kiểm tra được rằng $9 \nmid \gcd(a^2 + b^2 + 2, a^2b^2 + 3)$

Vì từ 1 đến 100 có 33 số chia hết cho 3 và có 100 lượt nên tức là đến một lúc nào đó sẽ chỉ còn 33 số chia hết cho 3, và sau chẵn lượt tất nhiên là sẽ được một số chia hết cho 3, mà số này lại không chia hết cho 9 nên không thể là số chính phương. \square

Bài toán 23. (Japan MO Final 2019). Cho $n \geq 3$ là một số lẻ và xét một lưới ô vuông $n \times n$. Trò chơi bao gồm n^2 lượt, ở mỗi lượt, chúng ta sẽ thực hiện các thao tác sau theo tuần tự.

- Chúng ta sẽ chọn một ô chứa một số nguyên chưa được viết và viết một số nguyên từ 1 đến n^2 . Chúng ta chỉ có thể viết một số nguyên một lần duy nhất trong suốt trò chơi.
- Đối với mỗi hàng, cột bao gồm cả một ô, nếu tổng vài số nguyên nằm trên hàng, cột hoặc một ô là bội số của n , thì chúng ta sẽ nhận được 1 điểm.

Xác định giá trị lớn nhất có thể của điểm số như tổng số có thể đạt được vào cuối trò chơi.

Lời giải 24. Lấy module n các số và ta sử dụng n thay vì 0. Ta gọi r_i và c_i lần lượt là tổng các số thuộc hàng hoặc cột i . Khi đó số điểm lớn nhất mà hàng i có thể nhận được là $\left\lfloor \frac{r_i}{n} \right\rfloor$. Khi này số điểm lớn nhất ở hàng là

$$\sum_{i=1}^n \left\lfloor \frac{r_i}{n} \right\rfloor \leq \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} = \frac{n(n+1)}{2}$$

Lý do tổng vẫn theo mod n là vì số điểm khi này phải phụ thuộc vào các số mod n . Tương tự với cột thì ta có tổng điểm lớn nhất là $n(n+1)$. Giờ ta sẽ chỉ ra một cấu hình có thể đạt được giá trị lớn nhất. Viết vào ô (i, j) với $i < n$ số i nếu $2 \nmid j$ và $n - i$ ngược lại và viết n vào hàng cuối cùng. \square

Bài toán 7. (Japan MO Final 2021). Cho số nguyên dương $n \geq 2$. Hai người chơi A và B chơi một trò chơi trên lưới các ô vuông đơn vị $n \times 2021$. Đầu tiên, A tô mỗi ô màu đen hoặc trắng. B đặt một viên bi vào một trong các ô ở hàng trên cùng và chỉ định một trong các ô ở hàng dưới cùng làm goal. Sau đó, A thao tác $n - 1$ lần như sau:

- Khi ô có bi được sơn màu trắng, A di chuyển bi sang ô bên dưới.
- Nếu không, A hãy di chuyển viên bi đến ô tiếp theo ở bên trái hoặc bên phải, sau đó đến ô bên dưới.

Tìm giá trị nhỏ nhất của n sao cho A luôn có thể di chuyển một viên bi đến goal, bất kể lựa chọn của B .

Bài toán 24. (Japan MO Final 2022). Có 2022 ô vuông được đánh số thứ tự trên một hàng ngang. Hai người A và B cùng nhau chơi một trò chơi. Đầu tiên, những ô vuông số lẻ được đánh dấu chữ A và những ô vuông số chẵn được đánh dấu chữ B . Sau đó, bắt đầu từ A , họ thay phiên thực hiện những thao tác sau:

1. Người chơi sẽ chọn hai ô vuông được đánh dấu bằng tên của họ, sao cho hai ô đó không kề nhau, và tất cả các ô vuông nằm ở giữa hai ô đó đều được đánh dấu bằng tên của đối thủ và đổi tên tất cả các ô đó sang tên của mình.
2. Hai người chơi luân phiên chơi liên tục như vậy đến khi có một người không thể thao tác tiếp được nữa

Tìm số nguyên dương m lớn nhất sao cho A luôn có thể đảm bảo rằng có ít nhất m ô vuông được đánh dấu chữ A .

Lời giải 25. Ta có thể tổng quát bài toán này. Gọi $f(n)$ là số ô vuông lớn nhất A có thể đảm bảo là có tên mình trên lưới $2n \times 1$.

Xét lưới $2n \times 1$ thì bởi vì A đi đầu nên bất kể A chọn vị trí nào đồng nhất, ta có thể xem AAA ở lượt đầu là A khi này kích thước lưới trở thành $2(n-1) \times 1$ mà trong khi đó số lượng A và B vẫn là như nhau xen kẽ. Cấu hình này chính bằng $f(n-1)$. Do đó ta lập được hệ thức truy hồi:

$$\begin{cases} f(1) = 1, f(2) = 3 \\ f(n) = f(n-1) + 1 \end{cases}$$

Thế nên tìm được $f(n) = n$. Có được $f(1011) = 1011$. Bây giờ ta sẽ thiết lập một chiến thuật dành cho A để luôn có thể đảm bảo ít nhất được con số này.

Đầu tiên A sẽ bắt đầu thao tác từ trái sang, anh ta có thể thực hiện như sau:

$$\begin{aligned} ABABAB \dots AB &\rightarrow AAABAB \dots AB \rightarrow AAABAB \dots BBB \dots AB \\ &\rightarrow AAAAAB \dots BBB \dots AB \rightarrow \dots \end{aligned}$$

Số lượng chữ A được thể hiện như sau:

$$1011 \rightarrow 1012 \rightarrow 1011 \rightarrow 1012 \rightarrow \dots$$

Có thể thấy rằng bất kể B chọn ở đâu để đồng nhất thì A luôn giữ được một lượng quân nhất định từ bên trái sang và chúng chỉ có thể tăng mà không giảm được dưới 1011, hoàn tất bài toán. \square

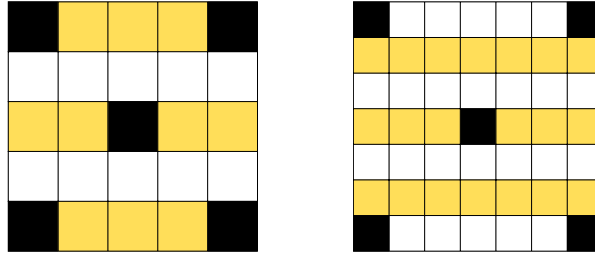
Bài toán 8. (Hong Kong TST 2009). Trong một trường học có 2008 học sinh. Học sinh là thành viên của một số ủy ban nhất định. Một ủy ban có tối đa 1004 thành viên và mỗi hai học sinh tham gia vào một ủy ban chung.

1. Xác định số ít nhất có thể của các ủy ban trong trường học.

2. Nếu yêu cầu thêm rằng hợp của bất kỳ hai ủy ban nào cũng không được vượt quá 1800 học sinh, thì câu trả lời trong (i) có đúng không?

Bài toán 25. (HMMT 02/2016). Cho số nguyên lẻ $n > 1$. Trên một bàn cờ $n \times n$ có ô trung tâm và 4 ô ở góc bị cắt đi. Chúng ta muốn chia $n^2 - 5$ hình vuông còn lại thành $\frac{1}{2}(n^2 - 5)$ cặp sao cho hai hình vuông ở mỗi cặp giao nhau tại chính xác một điểm. Tìm giá trị của n thỏa mãn điều đó.

Lời giải 26. Ta tô màu xen kẽ cho bảng ô vuông bằng hai màu trắng và vàng, với hàng màu vàng nằm ở hàng trung tâm. khi đó sẽ có hai trường hợp như sau:



Mỗi cặp hình vuông thỏa mãn được chọn sẽ chiếm 1 ô trắng và 1 ô vàng, tức là để tồn tại một cách chọn thỏa mãn thì số ô vàng phải bằng số ô trắng.

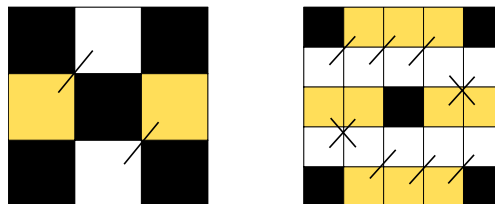
Trường hợp 1: hàng ở trên và dưới cùng được tô màu vàng. Khi này tổng số ô màu vàng là $\frac{n(n+1)}{2} - 5$, tổng số ô màu trắng là $\frac{n(n-1)}{2}$, khi này ta được

$$\frac{n(n+1)}{2} - 5 = \frac{n(n-1)}{2} \Leftrightarrow n = 5$$

Trường hợp 2: hàng ở trên và dưới cùng được tô màu trắng. Khi này tổng số ô màu vàng là $\frac{n(n-1)}{2} - 1$, tổng số ô màu trắng là $\frac{n(n+1)}{2} - 4$, khi này ta được

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

Vậy với $n \in \{3, 5\}$ thì tồn tại cách chọn cặp thỏa mãn đề bài. Ta có một cách ghép cặp thỏa mãn như sau cho từng trường hợp:



□

Bài toán 26. (USAJMO 2019). Có $a + b$ cái bát được sắp xếp thành một hàng ngang, được đánh số từ 1 đến $a + b$. Ban đầu, a bát đầu tiên mỗi bát chứa một quả táo và b bát cuối cùng mỗi bát chứa một quả lê. Một nước đi được gọi là **hợp lệ** bao gồm việc chuyển một quả táo từ bát i sang bát $i + 1$ và một quả lê từ bát j sang bát $j - 1$, với điều kiện là sự chênh lệch $i - j$ là chẵn. nhiều loại trái cây có thể nằm trong cùng một bát cùng một lúc. Mục tiêu là có

được b bát đầu tiên, mỗi bát chứa một quả lê và a bát cuối cùng, mỗi bát chứa một quả táo. Chứng minh rằng điều này có thể xảy ra khi và chỉ nếu tích ab là số chẵn.

Lời giải 27. Nhận xét 1: Tích ab là số chẵn. Giả sử cả a và b đều lẻ. Ta nhận thấy rằng mỗi bước đi ta lấy táo và lê ở các bát cùng tính chẵn lẻ chuyển sang các bát bên cạnh. Thế nên ý tưởng bất biến đó là hiệu số táo và số lê ở ô lẻ. Thật vậy, tô đen các ô lẻ.

Ban đầu số táo ô đen là $\frac{a+1}{2}$, số lê ô đen là $\frac{b-1}{2}$, hiệu bất biến là $\frac{a-b+2}{2}$.

Sau khi đạt được mục tiêu, số táo ô đen là $\frac{a-1}{2}$, số lê ô đen là $\frac{b+1}{2}$, hiệu bất biến là $\frac{a-b-2}{2}$, vô lý. Vậy nên tích ab phải chẵn.

Nhận xét 2: Với ab chẵn thì luôn tồn tại nước đi hợp lý để đạt được mục tiêu. Ta sẽ chứng minh điều này đúng bằng quy nạp. Nếu $(a, b) = (0, b)$ hoặc $(a, b) = (1, b)$ thì rõ ràng luôn đúng. Giả sử giả thuyết đúng với mọi trường hợp $\leq a+b-2$ và $\min a, b \geq 2$. Ta có hai trường hợp:

Trường hợp 1: $a+b$ chẵn. Xét $a+b$ ô. Ta đổi vị trí của táo ô 1 và lê ô $a+b-1$, táo ô 2 và lê ô $a+b$, đưa về $(a-2, b-2)$, đúng theo quy nạp.

Trường hợp 2: $a+b$ lẻ. Xét $a+b+2$ ô. Ta đổi vị trí của táo ô 1 và lê ô $a+b$, đưa về trường hợp $(a-1, b-1)$, đúng theo quy nạp.

Như vậy là chứng minh hoàn tất. □

Bài toán 27. (IMO 1993). Trên bàn cờ vô hạn ta thực hiện một trò chơi như sau: Đầu tiên xếp n^2 quân vào một hình vuông gồm $n \times n$ ô vuông cạnh liền kề sao cho trong mỗi ô vuông của hình vuông chứa một quân cờ, cách đi trong trò chơi là quân cờ chỉ được nhảy theo một chiều ngang hoặc chiều dọc qua một ô có chứa quân cờ ở ngay sát bên cạnh sang một bên ô trống tiếp ngay sau đó. Khi đó quân cờ ô bị nhảy qua sẽ bị loại bỏ. Tìm các giá trị của n để có thể kết thúc trò chơi sao cho trên bàn cờ chỉ còn lại đúng một quân cờ.

Lời giải 28.

Tô xanh, đỏ, vàng xen kẽ cho bàn cờ. Gọi A_1, A_2, A_3 lần lượt là số quân cờ nằm ở ô xanh, đỏ, vàng.

Nhận xét 1: $3 \nmid n$.

Chứng minh. Giả sử $3 \mid n$, để ý rằng sau mỗi bước đi thì tính chẵn lẻ của A_1, A_2, A_3 bị thay đổi, để thắng trò chơi thì phải có một số bằng 1. Nhưng vì A_1, A_2, A_3 luôn cùng tính chẵn lẻ nên dẫn tới vô lý. □

Nhận xét 2: Với cấu hình sau thì có thể làm mất đi 3 quân ở cột trung tâm (với dấu * tượng trưng cho mỗi quân cờ). Từ giờ ta sẽ gọi đây là nước đi (H) .

$$\begin{bmatrix} . & * & . \\ . & * & . \\ . & * & * \end{bmatrix}$$

Chứng minh. Di chuyển quân góc dưới phải \rightarrow giữa trên \rightarrow dưới trái. □

Nhận xét 3: Với $n = 1, 2, 4$ thì có thể thắng. Ta chỉ cần chứng minh với $n = 4$. Thực hiện liên tục (♣).

Chứng minh.

$$\begin{array}{ccccccc}
 \begin{bmatrix} * & * & * & * \\ * & * & * & * \\ * & * & * & * \\ * & * & * & * \end{bmatrix} & \rightarrow & \begin{bmatrix} . & . & . & * \\ * & * & * & * \\ * & * & * & * \\ * & * & * & * \end{bmatrix} & \rightarrow & \begin{bmatrix} . & . & . & * \\ . & . & . & * \\ * & * & * & * \\ * & * & * & * \end{bmatrix} & \rightarrow & \begin{bmatrix} . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ * & * & * & . \\ * & * & * & * \end{bmatrix} \\
 & & & & & & \\
 & \rightarrow & \begin{bmatrix} . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ * & * & * & . \\ * & * & * & * \end{bmatrix} & \rightarrow & \begin{bmatrix} . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ * & * & * & . \\ * & . & . & . \end{bmatrix} & \rightarrow & \begin{bmatrix} . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ * & . & . & . \end{bmatrix}
 \end{array}$$

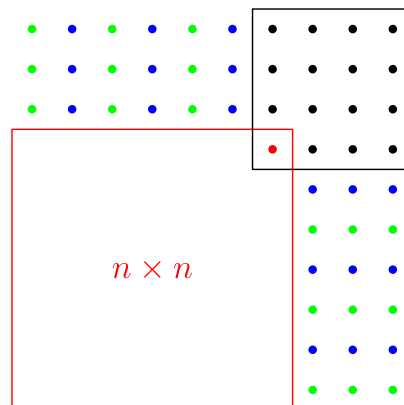
□

Nhận xét 4: Từ $(n+3) \times (n+3)$ có thể đưa về $n \times n$.

Chứng minh. Đối với mảng $3 \times k$ ở rìa ngoài, bằng nước đi (♣) ta có thể biến đổi như sau:

$$\begin{array}{ccccccc}
 \begin{bmatrix} * & * & * & * & * & * & \dots \\ * & * & * & * & * & * & \dots \\ * & * & * & * & * & * & \dots \end{bmatrix} & \rightarrow & \begin{bmatrix} . & * & * & * & * & * & \dots \\ . & * & * & * & * & * & \dots \\ . & * & * & * & * & * & \dots \end{bmatrix} & \rightarrow & \begin{bmatrix} . & . & * & * & * & * & \dots \\ . & . & * & * & * & * & \dots \\ . & . & * & * & * & * & \dots \end{bmatrix} & \rightarrow & \dots
 \end{array}$$

Khi đó khối $L \times n$ ở phía ngoài đồng loạt thu về còn khối 4×4 ở góc, với một quân là giao của khối 4×4 và $n \times n$, và bằng nước đi ở nhận xét 3, ta đã quy về $n \times n$.



Mặt khác, với $n = 2, 4$ thì có thể thắng, vì vậy theo quy nạp thì với $n = 3k + 1$ hoặc $n = 3k + 2$ với $k \geq 0$ thì có thể thắng. □

□

Bài toán 9. (Japan MO Final 2023). Trên một bảng ô vuông 5×5 , người ta đặt các Tetromino lên các hình vuông để trong mỗi hình vuông, có hai hoặc ít hơn viên được bao phủ (các viên này có thể xếp chồng lên nhau). Tìm số hình vuông lớn nhất được bao phủ bởi đúng một viên.

Bài toán 10. (Japan MO Final 2024). Trong mặt phẳng tọa độ, các điểm có tung độ và hoành độ nguyên thuộc 1 đến 2000 được gọi là điểm tốt. Hơn nữa, đối với bốn điểm $A(x_1, y_1)$, $B(x_2, y_2)$, $C(x_3, y_3)$, $D(x_4, y_4)$ có đường đa tuyến $ABCD$ được gọi là đường \mathbb{Z} nếu như:

1. Tất cả đều A, B, C, D là những điểm tốt.
2. $x_1 < x_2, y_1 = y_2$
3. $x_2 > x_3, y_2 - x_2 = y_3 - x_3$
4. $x_3 < x_4, y_3 = y_4$

Tìm giá trị nguyên dương n nhỏ nhất sao cho có n đường \mathbb{Z} là Z_1, Z_2, \dots, Z_n thỏa mãn với bất kỳ điểm P tốt nào, tồn tại một số nguyên $i \in [n]$ sao cho P nằm trên Z_i .

Bài toán 11. (RMM 2019). Hai con kiến đang di chuyển dọc theo các cạnh của một đa diện lồi. Đường đi của mỗi con kiến kết thúc tại điểm bắt đầu của nó, sao cho một con kiến không đi qua cùng một điểm hai lần trên đường đi của mình. Trên mỗi mặt F của đa diện được viết số cạnh của F thuộc về đường đi của con kiến đầu tiên và số cạnh của F thuộc về đường đi của con kiến thứ hai. Có một đa diện và một cặp đường đi mô tả như trên, sao cho chỉ có một mặt chứa một cặp số khác nhau không?

Bài toán 12. (APMO 2022). Cho n và k là hai số nguyên dương. Cathy đang chơi trò chơi sau đây. Có n viên bi và k hộp, với các viên bi được đánh số từ 1 đến n . Ban đầu, tất cả các viên bi được đặt trong một hộp. Mỗi lượt, Cathy chọn một hộp và sau đó di chuyển các viên bi có số nhỏ nhất, nói là i , đến một hộp trống hoặc hộp chứa viên bi $i + 1$. Cathy thắng nếu tại bất kỳ thời điểm nào có một hộp chỉ chứa viên bi n .

Xác định tất cả các cặp số nguyên (n, k) sao cho Cathy có thể thắng trò chơi này.

Bài toán 13. (Taiwan MO 2024). Cho n và k là các số nguyên dương. Một em bé sử dụng n^2 khối để tạo thành một lưới $n \times n$, với mỗi khối có một số nguyên dương không lớn hơn k . Bỏ đi ngang qua và nhận thấy rằng:

1. Mỗi hàng trên lưới có thể được xem như một dãy số học với số bên trái là số hàng đầu tiên, với tất cả chúng đều có hiệu số chung khác nhau;
2. Mỗi cột trên lưới có thể được xem như một dãy số học với số trên cùng là số cột đầu tiên, với tất cả chúng đều có hiệu số chung khác nhau.

Tìm giá trị nhỏ nhất có thể của k (dưới dạng một hàm của n).

Bài toán 14. (VMO 2009). Hãy xác định số lượng tập con T của S sao cho không có hai phần tử nào trong T , a và b , thỏa mãn điều kiện $|a - b| = \{1, n\}$, trong đó $S = \{1, 2, 3, \dots, 2n\}$ và $n \in \mathbb{Z}^+$.

Bài toán 15. (VMO 2010). Cho số nguyên dương n . Xem xét bảng vuông 3×3 . Sử dụng n màu để tô màu tất cả các ô của bảng sao cho:

1. Mỗi ô được tô màu bởi đúng một màu.

2. Hai bảng được tô màu giống nhau nếu chúng có thể được nhận từ nhau bằng cách quay một góc 90° hoặc 270° quanh trung tâm của bảng 3×3 .

Có bao nhiêu cách tô màu cho bảng vuông này thỏa mãn các điều kiện trên?

Bài toán 16. (Vietnam TST 2010). Chúng ta có n quốc gia. Mỗi quốc gia có m người sống trong nước đó ($n > m > 1$). Chúng ta chia $m \cdot n$ người thành n nhóm mỗi nhóm có m thành viên sao cho không có hai người nào trong bất kỳ nhóm nào đến từ cùng một quốc gia.

Chúng minh rằng có thể chọn n người vào một lớp sao cho họ đến từ các nhóm và các quốc gia khác nhau.

Bài toán 17. (VMO 2011). Cho một đa giác lồi $ABCDE$ thỏa mãn độ dài các cạnh và $AC, AD \leq \sqrt{3}$. Chọn 2011 điểm phân biệt bên trong đa giác này. Chứng minh rằng tồn tại một đường tròn đơn vị có trung tâm trên một cạnh của đa giác, và chứa ít nhất 403 điểm trong số 2011 điểm đã cho.

Bài toán 18. (Vietnam TST 2011). Cho n là một số nguyên lớn hơn 1. n học sinh được sắp xếp xung quanh một bàn tròn, mỗi người có một số kẹo nhất định (có thể có trường hợp một số học sinh không có kẹo) sao cho tổng số kẹo mà họ sở hữu là bội số của n . Họ trao đổi kẹo như sau:

1. Đối với số kẹo ban đầu của mỗi học sinh, ít nhất có một học sinh có nhiều kẹo hơn học sinh ngồi bên phải của mình, trong trường hợp đó, học sinh bên phải sẽ được nhận một viên kẹo từ học sinh đó.
2. Sau một vòng trao đổi, nếu có ít nhất một học sinh có kẹo nhiều hơn học sinh bên phải, thì học sinh đó sẽ trao một viên kẹo cho học sinh tiếp theo ngồi bên phải của mình.

Chứng minh rằng sau khi trao đổi kẹo hoàn tất (tức là khi đạt đến cân bằng), tất cả học sinh có cùng số kẹo.

Bài toán 19. (VMO 2012). Cho một nhóm gồm 5 cô gái, ký hiệu là G_1, G_2, G_3, G_4, G_5 và 12 chàng trai. Có 17 ghế được sắp xếp thành một hàng. Các học sinh đã được nhóm để ngồi trên ghế sao cho các điều kiện sau được đồng thời thỏa mãn:

- (a) Mỗi ghế có một người ngồi.
- (b) Thứ tự, từ trái sang phải, của các cô gái ngồi là $G_1; G_2; G_3; G_4; G_5$.
- (c) Giữa G_1 và G_2 phải có ít nhất ba chàng trai.
- (d) Giữa G_4 và G_5 phải có ít nhất một chàng trai và tối đa bốn chàng trai.

Có bao nhiêu cách sắp xếp như vậy là có thể?

Bài toán 20. (Vietnam TST 2012). Xét một lưới chữ nhật có kích thước $m \times n$ với m hàng và n cột. Có các đài phun nước trên một số ô của lưới. Một đài phun nước có thể phun nước lên bất kỳ ô kề cạnh nào, hoặc một ô trong cùng một cột sao cho có đúng một ô giữa chúng. Tìm số lượng đài phun nước tối thiểu sao cho mỗi ô có thể được phun nước trong các trường hợp:

- (a) $m = 4$
- (b) $m = 3$

Bài toán 21. (VMO 2013). Viết xuống một số lượng số a_1, a_2, \dots, a_n từ trái sang phải trên một dòng. Bước 1, chúng ta viết $a_1 + a_2$ giữa a_1, a_2 ; $a_2 + a_3$ giữa $a_2, a_3, \dots, a_{n-1} + a_n$ giữa a_{n-1}, a_n , và sau đó chúng ta có dãy mới $b = (a_1, a_1 + a_2, a_2, a_2 + a_3, a_3, \dots, a_{n-1}, a_{n-1} + a_n, a_n)$. Bước 2, chúng ta làm điều tương tự với dãy b để có dãy mới c lại... Và tiếp tục như vậy. Nếu chúng ta thực hiện 2013 bước, hãy đếm số lượng số 2013 xuất hiện trên dòng nếu

(a) $n = 2, a_1 = 1, a_2 = 1000$

(b) $n = 1000, a_i = i, i = 1, 2, \dots, 1000$

Bài toán 22. (Vietnam TST 2013). Một khối lập phương có kích thước $10 \times 10 \times 10$ bao gồm 1000 khối đơn vị, tất cả được tô màu trắng. A và B chơi một trò chơi trên khối lập phương này. A chọn một số trụ có kích thước $1 \times 10 \times 10$ sao cho không có hai trụ nào chia sẻ một đỉnh hoặc một cạnh, và chuyển tất cả các khối đơn vị được chọn thành màu đen. B được phép chọn một số khối đơn vị và hỏi A về màu của chúng. Ít nhất là bao nhiêu khối đơn vị mà B cần phải chọn để đối với mọi câu trả lời từ A, B luôn có thể xác định các khối đơn vị màu đen?

Bài toán 23. (VMO 2014). Cho một đa giác đều 103 đỉnh. 79 đỉnh được tô màu đỏ và các đỉnh còn lại được tô màu xanh. Gọi A là số cặp đỉnh liên tiếp màu đỏ và B là số cặp đỉnh liên tiếp màu xanh.

a) Tìm tất cả các giá trị có thể của cặp (A, B) .

b) Xác định số lượng cách tô màu không giống nhau theo cặp của đa giác thỏa mãn $B = 14$. Hai cách tô màu được gọi là giống nhau nếu chúng có thể được thu được từ nhau bằng cách xoay vòng tròn ngoại tiếp của đa giác.

Bài toán 24. (Vietnam TST 2015). Có 100 học sinh tham gia một kỳ thi và 25 thành viên của hội đồng. Mỗi học sinh được kiểm tra bởi một thành viên của hội đồng. Được biết rằng mỗi học sinh thích 10 thành viên của hội đồng.

(a) Chứng minh rằng chúng ta có thể chọn 7 thành viên của hội đồng sao cho mỗi học sinh đều thích ít nhất một thành viên của hội đồng.

(b) Chứng minh rằng chúng ta có thể tổ chức sao cho mỗi học sinh sẽ được kiểm tra bởi thành viên của hội đồng mà họ thích và mỗi thành viên của hội đồng sẽ kiểm tra tối đa 10 học sinh.

Bài toán 25. (VMO 2016). Cho m và n là các số nguyên dương. Một người đã trồng hai loại cây khác nhau trên một khu đất có kích thước lưới ô vuông là $m \times n$ (mỗi ô trồng một cây). Một khu vực được gọi là ẩn tượng nếu hai điều kiện sau đây được đồng thời thỏa mãn:

1. Số lượng cây của mỗi loại là bằng nhau

2. Trong mỗi hàng, số lượng cây của mỗi loại không nhỏ hơn một nửa số ô trên hàng đó và trong mỗi cột, số lượng cây của mỗi loại không nhỏ hơn một nửa số ô trên cột đó.

a) Tìm một khu vực ẩn tượng khi $m = n = 2016$;

b) Chứng minh rằng nếu có ít nhất một khu vực ẩn tượng thì $4|m$ và $4|n$.

Bài toán 26. (Vietnam TST 2016). Xét tập hợp A chứa 2000 số nguyên phân biệt và tập hợp

B chứa 2016 số nguyên phân biệt. K là số cặp số (m, n) thỏa mãn

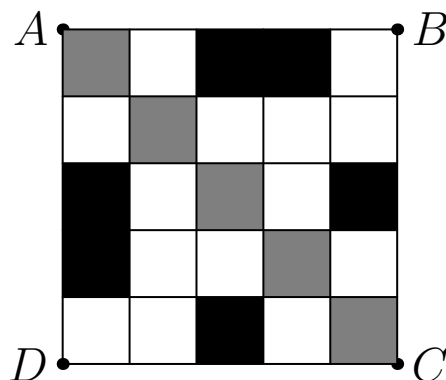
$$\begin{cases} m \in A, n \in B \\ |m - n| \leq 1000 \end{cases}$$

Tìm giá trị lớn nhất của K .

Bài toán 27. (VMO 2017). Cho số nguyên $n > 1$. Bảng vuông $ABCD$ kích thước $n \times n$ gồm n^2 ô vuông đơn vị, mỗi ô vuông đơn vị được tô bởi ba màu: đen, trắng, xám. Một cách tô màu được gọi là đối xứng nếu mỗi ô có tâm trên đường chéo AC được tô màu xám và mỗi cặp ô đối xứng qua AC được tô màu đen hoặc cùng màu trắng. Người ta điền vào mỗi ô xám số 0, mỗi ô trắng một số nguyên dương và mỗi ô đen một số nguyên âm. Một cách điền số như vậy được gọi là k -cân đối (với k là số nguyên dương) nếu thỏa mãn các điều kiện sau:

- Mỗi cặp ô đối xứng qua AC được điền cùng một số nguyên thuộc đoạn $[-k, k]$.
- Nếu một hàng và một cột giao nhau tại ô đen thì tập các số nguyên dương được điền trên hàng đó và tập số nguyên dương được điền trên cột đó không giao nhau; nếu một hàng và một cột giao nhau tại ô trắng thì tập các số nguyên âm được điền trên hàng đó và tập các số nguyên âm được điền trên cột đó không giao nhau.

(a) Đối với $n = 5$, tìm giá trị nhỏ nhất của k sao cho có một cách gán số k -cân đối cho lưới như sau:



(b) Cho $n = 2017$. Hãy tìm giá trị nhỏ nhất của k sao cho luôn có một cách gán số k -cân đối cho một cách tô màu đối xứng.

Bài toán 28. (Vietnam TST 2017). Có 44 lỗ khác nhau trên một đường thẳng và 2017 con kiến. Mỗi con kiến bò ra khỏi một lỗ và bò dọc theo đường thẳng với tốc độ không đổi vào một lỗ khác, sau đó lại vào. Đặt T là tập hợp các khoảng khắc mà con kiến ra hoặc vào lỗ. Cho biết rằng $|T| \leq 45$ và tốc độ của các con kiến là khác nhau. Chứng minh rằng tồn tại ít nhất hai con kiến không va chạm nhau.

Bài toán 29. (VMO 2018). Một nhà đầu tư có hai mảnh đất hình chữ nhật có kích thước 120×100 .

(a) Trên mảnh đất thứ nhất, cô ấy muốn xây dựng một ngôi nhà có mặt cắt hình chữ nhật kích thước 25×35 và chín chậu hoa tròn với đường kính 5 bên ngoài ngôi nhà. Chứng minh rằng ngay cả khi vị trí các chậu hoa được chọn ngẫu nhiên trên mảnh đất, diện tích còn lại vẫn đủ để xây dựng ngôi nhà như mong muốn.

- (b) Trên mảnh đất thứ hai, cô ấy muốn xây dựng một ao cá đa giác sao cho khoảng cách từ một điểm tùy ý trên mảnh đất, bên ngoài ao cá, đến mép ao gần nhất không quá 5. Chứng minh rằng chu vi của ao cá không nhỏ hơn $440 - 20\sqrt{2}$.

Bài toán 30. (Vietnam TST 2018). Đối với mỗi số nguyên dương m , một hình chữ nhật có kích thước $m \times 2018$ gồm các ô đơn vị được gọi là "hoàn chỉnh" nếu các điều kiện sau được thỏa mãn:

1. Trong mỗi ô được viết một số "0", một số "1" hoặc không gì cả
2. Đối với mọi chuỗi nhị phân S có độ dài 2018, ta có thể chọn một hàng và điền vào các ô trống sao cho các số trong hàng đó, nếu đọc từ trái sang phải, tạo ra S (trong trường hợp đặc biệt, nếu một hàng đã đầy và tạo ra S theo cùng một cách thức thì điều kiện ii. này được thỏa mãn).

Một hình chữ nhật hoàn chỉnh được gọi là tối thiểu, nếu ta loại bỏ bất kỳ hàng nào của nó và sau đó nó không còn hoàn chỉnh nữa.

- (a) Chứng minh rằng đối với mọi số nguyên dương $k \leq 2018$, tồn tại một hình chữ nhật tối thiểu có kích thước $2^k \times 2018$ với đúng k cột chứa cả 0 và 1.
- (b) Một hình chữ nhật tối thiểu có kích thước $m \times 2018$ có đúng k cột chứa ít nhất một số 0 hoặc 1 và các cột còn lại là trống. Chứng minh rằng $m \leq 2^k$.

Bài toán 31. (Vietnam TST 2018). Trong một lưới vuông $m \times n$, với góc trên bên trái là A , có một tuyến đường đi dọc theo cạnh của lưới bắt đầu từ A và ghé qua tất cả các điểm đơn lát (gọi là "nút") đúng một lần và kết thúc cũng tại A .

- (a) Chứng minh rằng tuyến đường này tồn tại nếu và chỉ nếu ít nhất một trong số m, n là số lẻ.
- (b) Nếu một tuyến đường như vậy tồn tại, thì số lượng điểm xoáy ít nhất là bao nhiêu?

Một điểm xoáy là một nút khác với A và nếu hai cạnh trên tuyến đường giao nhau tại nút đó là vuông góc.

Bài toán 28. (VMO 2019). Có một tờ giấy kích thước 5×5 với hai mặt được chia thành các ô vuông đơn vị cho cả hai mặt. Mỗi ô trên tờ giấy được sơn bằng một trong n màu sắc, mỗi màu được sử dụng cho một ô, sao cho hai ô ở cùng vị trí trên hai mặt được sơn bằng cùng một màu. Hai tờ giấy được sơn được coi là giống nhau nếu màu của hai ô tương ứng giống nhau. Chứng minh rằng không có nhiều hơn

$$\frac{1}{8} (n^{25} + 4n^{15} + n^{13} + 2n^7)$$

mảnh giấy màu đôi một không giống nhau.

Lời giải 29.

Ta có thể hiểu bài toán là đếm số cách tô một tờ giấy 5×5 bởi n màu sao cho khác nhau qua các phép quay và lật ngược. Thật vậy, ta có thể dùng ý tưởng của bổ đề Burnside để loại bỏ những cấu hình lặp lại. Tuy nhiên, khó khăn ở đây là nếu ta đếm thông thường (quy tắc nhân) rồi dùng Burnside thì có một vấn đề là có những cấu hình bị lặp ít hơn những cấu hình khác. Khi đó, ta phải chia từng trường hợp nhỏ để kiểm soát và cân bằng số lần lặp của từng cấu hình.

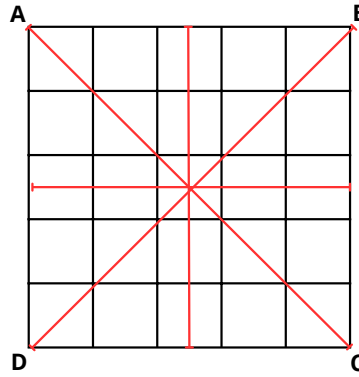
Ở đây ta có thể đếm theo quỹ đạo là D_8 , tức là mỗi cấu hình sẽ lặp lại (tối đa) 8 lần.

Theo lý thuyết quỹ đạo của khối nhị diện, ta có các trường hợp đếm lặp là $2^3, 2^2, 2^1, 2^2$ lần và quy ước các trường hợp lớn hơn kế thừa số trường hợp nhỏ hơn (tức là nếu lặp 4 lần cũng có nghĩa là lặp 1 và 2 lần).

Trường hợp 1: Tổng quát. Theo quy tắc nhân thì ta có n^{25} cách. Gọi những cấu hình ở trường hợp này là \mathcal{T}

Với mỗi cấu hình có khả năng lặp ở \mathcal{T} phải là một cách tô đối xứng. Ta có tổng cộng ba loại đối xứng: theo trục đứng (ngang), trục đường chéo, theo tâm như hình bên dưới, các trục là đường màu đỏ.

Gọi $\mathcal{A}, \mathcal{B}, \mathcal{C}$ lần lượt là các cách tô màu đối xứng theo trục đứng, đường chéo và tâm.



Trường hợp 2: Xét các cấu hình được đếm 4 lần ở \mathcal{T} , khi đó những cấu hình này phải là \mathcal{A} hoặc \mathcal{B} . Ví dụ như với trục ngang thì ta có thể tô trục bằng 5 màu và mỗi bên bằng 10 màu, tức là cần 15 màu (có thể trùng nhau).

	A				B
	1	2	3	4	5
	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15
	6	7	8	9	10
	1	2	3	4	5
D					C

Đối với trục đứng thì bản chất là quay 90° nên ta được $|\mathcal{A}| = 2n^{15}$. Mặt khác, rõ ràng $f: \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ là một song ánh, khi ta cho các số nằm trên trục ngang hoặc dọc lên đường chéo, và mỗi bên đều chứa 10 số, tức là qua phép quay 45° và ngược lại. Khi đó ta được $|\mathcal{A}|_{TH2} + |\mathcal{B}|_{TH2} = 4n^{15}$.

Trường hợp 3: Xét các cấu hình được đếm 2 lần ở \mathcal{T} . Khi này một cách đếm thỏa mãn là bao hàm những cấu hình đối xứng qua cả hai trục ngang-dọc hoặc $AC-BD$. Tiến hành tương tự, ta chỉ có thể tô hai trục bằng 3 màu. Khi đó sẽ chia thành 4 phần 2×2 , tô 4 ô này bằng 4 màu khác nhau. Ta được tổng cộng 7 màu. Tương tự cho trục chéo, ta được $|\mathcal{A}|_{TH3} + |\mathcal{B}|_{TH3} = 2n^7$.

A					B
	6	7	3	7	6
	5	4	2	4	5
	3	2	1	2	3
	5	4	2	4	5
	6	7	3	7	6
D					C

Trường hợp 4: Xét các cấu hình chỉ lặp lại 1 lần trong \mathcal{T} và cả các kiểu đối xứng không phải trục. Rõ ràng ta phải tính $|\mathcal{C}|$ vì $\mathcal{A} \cap \mathcal{B} \subset \mathcal{C}$. Thật vậy, chọn ô giữa làm tâm, thì khi đó ta được 12 cặp điểm và ảnh đối xứng của nó, tức là có thể dùng 13 màu bất kì, ta được $|\mathcal{C}| = n^{13}$.

A					B
	9	10	12	11	13
	7	6	4	5	8
	3	2	1	2	3
	8	5	4	6	7
	13	11	12	10	9
D					C

Cộng tất cả các trường hợp trên lại và áp dụng bổ đề Burnside, ta được tổng số các tô không đối xứng là

$$S = \frac{1}{8} (n^{25} + 4n^{15} + n^{13} + 2n^7)$$

□

Bài toán 29. (Vietnam TST 2019). Trong một quốc gia có $n \geq 2$ thành phố. Bất kỳ hai thành phố nào cũng có đúng một đường hàng không hai chiều. Chính phủ muốn cấp giấy phép cho một số hãng hàng không để chịu trách nhiệm với các đường hàng không này với các điều kiện sau:

- Mỗi đường hàng không chỉ có thể được cấp giấy phép cho đúng một hãng hàng không.
- Bằng cách chọn một hãng hàng không bất kỳ, chúng ta có thể di chuyển từ một thành phố đến bất kỳ thành phố nào khác, chỉ sử dụng các chuyến bay từ hãng hàng không này.

Số lượng tối đa các hãng hàng không mà chính phủ có thể cấp giấy phép để đáp ứng tất cả các điều kiện này là bao nhiêu?

Lời giải 30. Gọi k là số hãng của quốc gia đó. Xét $K_n = (V, E)$ có n đỉnh, mỗi đỉnh là một thành phố, đôi một kề nhau. Nếu thành phố u và v kề nhau bởi hãng a thì ta gán nhãn a cho uv . Ta sẽ dự đoán giá trị lớn nhất của k .

Để ý rằng một chu trình đi qua hết tất cả các đỉnh thì có độ dài nhỏ nhất là $n - 1$, nếu mỗi nhãn

được gán vào một chu trình dài $n - 1$ thì có

$$k \leq \frac{\binom{n}{2}}{n-1} = \frac{n}{2}$$

Ta sẽ chứng minh rằng có nhiều nhất $\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$ nhãn trong K_{2m} bằng quy nạp.

- **Trường hợp 1:** $n = 2m$.

Với $m = 1$ thì dễ dàng kiểm tra mệnh đề trên đúng.

Mệnh đề quy nạp: Với K_{2m} có $2m$ đỉnh ($m \geq 1$) thì có tối đa m nhãn.

Xét đồ thị K_{2m+2} có $2m + 2$ đỉnh. Thêm 2 đỉnh mới, gọi 2 đỉnh đó là u và v , khi này mỗi đỉnh sẽ nhận vào m nhãn từ các đỉnh thuộc K_{2m} . Nếu ta thêm 1 nhãn mới vào $m + 1$ cạnh còn lại của từng u và v thì hoàn tất bài toán.

- **Trường hợp 2:** $n = 2m + 1$.

Với $n = 2$ thì dễ dàng kiểm tra mệnh đề trên đúng.

Mệnh đề quy nạp: Với K_{2m+1} có $2m + 1$ đỉnh ($m \geq 1$) thì có tối đa m nhãn.

Xét đồ thị K_{2m+3} có $2m + 3$ đỉnh. Thêm 2 đỉnh mới, gọi 2 đỉnh đó là u và v , khi này mỗi đỉnh sẽ nhận vào m nhãn từ các đỉnh thuộc K_{2m+1} . Nếu ta thêm 1 nhãn mới vào $m + 1$ cạnh còn lại của u và $m + 2$ của v hoặc ngược lại thì hoàn tất bài toán.

□

Bài toán 30. (VMO 2020). Cho một số nguyên dương $n > 1$. Đặt T là một tập chứa tất cả các tập hợp có thứ tự $(x; y; z)$ sao cho x, y, z đều là các số nguyên dương phân biệt và $1 \leq x, y, z \leq 2n$. Ngoài ra, một tập A chứa các tập hợp có thứ tự $(u; v)$ được gọi là "kết nối" với T nếu với mọi $(x; y; z) \in T$ thì $\{(x; y), (x; z), (y; z)\} \cap A \neq \emptyset$.

(a) Tìm số phần tử của tập T .

(b) Chứng minh rằng tồn tại một tập "kết nối" với T có đúng $2n(n - 1)$ phần tử.

(c) Chứng minh rằng mọi tập "kết nối" với T có ít nhất $2n(n - 1)$ phần tử.

Lời giải 31. Theo quy tắc chỉnh hợp thì $|T| = A_{2n}^3 = 2n(2n - 1)(2n - 2)$

Ta sẽ tổng quát hóa bài toán. Xét $G = (V, E)$ có $2n$ đỉnh và các trường hợp riêng cho (x, y) với $x > y$. Nếu $(x, y) \notin A$ thì ta có cạnh xy . Rõ ràng là G không được tồn tại tam giác, vì nếu như có một tam giác uvw thì ta có $\{(u, v), (u, w), (v, w)\} \cup A = \emptyset$ trái giả thuyết. Lý do mà ta phải gọi phần bù như vậy là để tránh chuyện ta ghép 3 cặp (u, v, w) có $v < u < w$ chẳng hạn thì rõ ràng là các bộ đôi không bao giờ tạo thành tam giác được, vì sẽ có một cạnh bé thuộc G và một cạnh lớn không thuộc G . Cho nên theo định lý Mantel thì $|E(G)| \leq n^2$. Lấy phần bù của các cặp thì ta được số tập $(x, y) \in A$ là

$$\binom{2n}{2} - n^2 = n(2n - 1) - n^2 = n^2 - n$$

Chứng minh tương tự với $x < y$ thì ta sẽ có được $|A| \geq 2n(n - 1)$.

Dấu bằng xảy ra khi và chỉ khi G là đồ thị lưỡng phân $K_{n,n}$. Khi này ta chọn $A = \{(x, y) | 1 \leq x \leq n, n + 1 \leq y \leq 2n\}$ với x và y có thể đổi vị trí cho nhau. Khi ấy $|A| = 2n(n - 1)$ □

Bài toán 32. (Vietnam TST 2020). Cho n là một số nguyên dương, có $4n$ đội tham gia một giải bóng đá. Trong mỗi vòng đấu, chúng ta sẽ chia $4n$ đội thành $2n$ cặp, và mỗi cặp đội sẽ thi đấu cùng một lúc. Sau giải đấu, được biết rằng mỗi cặp đội đã thi đấu tối đa một trận. Tìm số nguyên dương nhỏ nhất a , sao cho chúng ta có thể sắp xếp một lịch thi đấu thỏa mãn các điều kiện trên, và nếu chúng ta thêm một vòng đấu nữa, luôn có một cặp đội đã thi đấu trận đấu.

Bài toán 33. (Vietnam TST 2020). Hãy giả sử n là một số nguyên dương. Trên một bảng có kích thước $(2n + 1) \times (2n + 1)$, mỗi ô được tô màu trắng hoặc đen. Trong mỗi hàng và mỗi cột, nếu số lượng ô màu trắng nhỏ hơn số lượng ô màu đen, chúng ta sẽ đánh dấu tất cả các ô màu trắng. Nếu số lượng ô màu trắng lớn hơn số lượng ô màu đen, chúng ta sẽ đánh dấu tất cả các ô màu đen. Đặt a là số lượng ô màu đen, và b là số lượng ô màu trắng, c là số lượng ô được đánh dấu.

Ví dụ đối với bảng 3×3 , $a = 3$, $b = 6$, $c = 4$.

				x		
				x		x
				x		

Chúng minh rằng bất kể tình huống tô màu ban đầu như thế nào, luôn có $c \geq \frac{1}{2} \min\{a, b\}$.

Bài toán 34. (VMO 2021). Một học sinh chia tất cả 30 viên bi vào 5 hộp được đánh số 1, 2, 3, 4, 5 (sau khi được chia, có thể có một hộp không có viên bi).

- Có bao nhiêu cách để chia các viên bi vào các hộp (các cách chia khác nhau nếu có một hộp có số bi khác nhau)?
- Sau khi chia, học sinh sẽ sơn các viên bi đó bằng một số màu (mỗi màu sơn được cho nhiều viên bi, một màu có thể được sơn cho nhiều viên bi), sao cho không có 2 viên bi trong cùng một hộp có màu giống nhau và từ bất kỳ 2 hộp nào cũng không thể chọn 8 viên bi đã được sơn bằng 4 màu. Chúng minh rằng đối với mỗi cách chia, học sinh phải sử dụng ít nhất 10 màu để sơn các viên bi.
- Hãy chỉ ra một cách chia sao cho với chính xác 10 màu, học sinh có thể sơn các viên bi sao cho thỏa mãn các điều kiện trong câu b).

Bài toán 35. (Vietnam TST 2021). Trên một bảng gồm 2021×2021 ô vuông, chọn ra k ô vuông đơn vị sao cho mỗi ô vuông được chọn có chung đỉnh với tối đa 1 ô vuông khác được chọn. Xác định giá trị lớn nhất của k .

Bài toán 36. (VMO 2022). Cho 4 viên xúc xắc đồng chất. Ký hiệu $x_i (1 \leq x_i \leq 6)$ là số chấm trên một mặt xuất hiện trên viên xúc xắc thứ i ($1 \leq i \leq 4$).

- Tìm các bộ số (x_1, x_2, x_3, x_4)
- Tìm xác suất để có một số x_j sao cho x_j bằng tổng của 3 số còn lại.
- Tìm xác suất để chúng ta có thể chia x_1, x_2, x_3, x_4 thành 2 nhóm có tổng bằng nhau.

Bài toán 37. (Vietnam TST 2022). Cho một đa diện lồi có 2022 mặt. Trong 3 mặt bất kỳ, đã có các số là 26, 4 và 2022 (mỗi mặt chứa 1 số). Người ta muốn điền vào mỗi mặt còn lại một số

thực là trung bình cộng của các số trong các mặt có cạnh chung với mặt đó. Chứng minh rằng chỉ có một cách để điền tất cả các số trong đa diện đó.

Bài toán 38. (Vietnam TST 2022). Cho một tập hợp $A = \{1; 2; \dots; 4044\}$. Người ta tô màu 2022 số trong đó bằng màu trắng và các số còn lại bằng màu đen. Với mỗi $i \in A$, gọi số quan trọng của i là số lượng tất cả các số trắng nhỏ hơn i và các số đen lớn hơn i . Với mọi số tự nhiên m , hãy tìm tất cả các số nguyên dương k mà tồn tại một cách tô màu các số sao cho có được k số quan trọng bằng m .

Bài toán 39. (VMO 2023). Có $n \geq 2$ lớp học được tổ chức thành $m \geq 1$ nhóm ngoại khóa cho sinh viên. Mỗi lớp học có sinh viên tham gia ít nhất một nhóm ngoại khóa. Mỗi nhóm ngoại khóa có chính xác a lớp mà các sinh viên trong nhóm này tham gia. Đối với bất kỳ hai nhóm ngoại khóa nào, không có nhiều hơn b lớp với sinh viên tham gia cả hai nhóm đồng thời.

- (a) Tìm m khi $n = 8, a = 4, b = 1$.
- (b) Chứng minh rằng $n \geq 20$ khi $m = 6, a = 10, b = 4$.
- (c) Tìm giá trị nhỏ nhất của n khi $m = 20, a = 4, b = 1$.

Bài toán 40. (Vietnam TST 2023). Một trường học có hai lớp học A và B lần lượt có m và n học sinh. Các học sinh của hai lớp học ngồi thành một vòng tròn. Sau đó, mỗi học sinh được tặng một số kẹo bằng số học sinh liên tiếp ngồi bên trái của anh ta đến từ lớp của anh ta. Sau khi phân phát kẹo, giáo viên quyết định nhóm các học sinh sao cho trong mỗi nhóm, tất cả các học sinh nhận được cùng một số lượng kẹo, và bất kỳ hai học sinh nào từ hai nhóm khác nhau đều phải nhận số lượng kẹo khác nhau.

- (a) Số học sinh tối đa mà một nhóm có thể có là bao nhiêu?
- (b) Loại trừ nhóm mà mỗi học sinh không nhận được kẹo, số học sinh tối đa mà một nhóm có thể có là bao nhiêu?

Bài toán 41. (Vietnam TST 2023). Cho $n \geq 3$ là một số nguyên và S là một tập hợp gồm n phần tử. Xác định số nguyên lớn nhất k_n sao cho: đối với mỗi cách chọn k_n 3–phần tử của S , tồn tại một cách tô màu các phần tử của S bằng hai màu sao cho không có phần tử nào trong các 3–phần tử được chọn là đơn sắc.

Bài toán 42. (VMO 2024). Cho k viên bi được đặt lên các ô của một lưới 2024×2024 sao cho mỗi ô có tối đa một viên bi và không có hai viên bi nào được đặt trên hai ô kề nhau (hai ô kề nhau được xác định là các ô có cạnh chung).

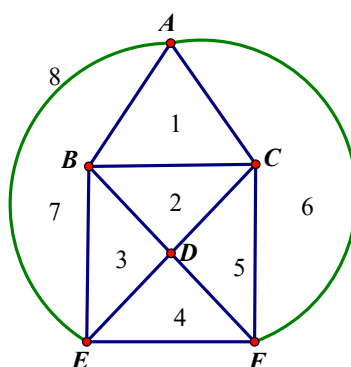
- (a) Giả sử $k = 2024$. Tìm cách đặt các viên bi sao cho mỗi ô có tối đa một viên bi và không có hai viên bi nào được đặt trên hai ô kề nhau (hai ô kề nhau được xác định là các ô có cạnh chung).
- (b) Xác định giá trị lớn nhất của k sao cho đối với tất cả các sắp xếp của k viên bi thỏa mãn các điều kiện trên, chúng ta có thể di chuyển một trong những viên bi đã đặt lên một trong các ô kề cạnh của nó và sắp xếp mới vẫn thỏa mãn các điều kiện trên.

Bài toán 31. (VMO 2024). Trong không gian, có một đa diện lồi D sao cho đối với mỗi đỉnh của D , có một số lẻ cạnh đi qua đỉnh đó. Chúng ta chọn một mặt F của D sau đó gán mỗi

cạnh của D một số nguyên dương sao cho đối với tất cả các mặt của D khác với F , tổng các số được gán trên các cạnh của mặt đó là một số nguyên dương chia hết cho 2024. Chứng minh rằng tổng các số được gán trên các cạnh của F cũng là một số nguyên dương chia hết cho 2024.

Lời giải 32. Bình luận: Đối với các bài toán hình học tổ hợp, đặc biệt là đa diện trong không gian, ý tưởng quen thuộc là ta luôn có thể đưa bài toán về chứng minh đồ thị phẳng. Nguồn gốc của ý tưởng này là cách chứng minh công thức về số cạnh, đỉnh và mặt đa diện của Euler.

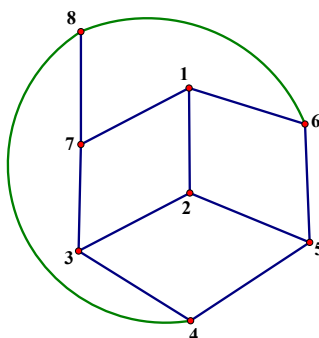
Ta chọn một mặt đáy sau đó mở rộng mặt đáy này ra, các mặt khác của đa diện sẽ trở thành các miền trong mặt đáy, do các cạnh, đỉnh và miền vẫn được bảo toàn nên ta có thể đưa bài toán về đồ thị, với mặt đáy là F . Ta có hình minh họa như sau.



Gọi đồ thị đang xét là $G(V, E)$. Từ giờ ta quy ước $w(u)$ là trọng số của cạnh u và $sum(P)$ là tổng các $w(u)$ của miền P và $2024 \mid sum(P)$ với mọi P .

Bình luận: Ý tưởng chính của bài toán đồ thị này là ta cố gắng đưa về đồ thị phẳng lưỡng phân, khi đó bài toán dễ dàng chứng minh được khi ta chỉ cần so sánh số cạnh theo 2 cách. Tới đây tôi chợt nhớ ra trong quá khứ từng tồn tại một bài toán cực kì cổ điển là bài toán đi qua 7 cây cầu của Euler. Khi đó Euler chọn các vùng đất là đỉnh và cạnh là cây cầu của đồ thị. Vậy tại sao ta không làm điều tương tự đối với bài toán này?

Ta chọn các miền làm đỉnh của đồ thị mới, hai miền kề nhau được nối bởi 1 cạnh, khi đó đồ thị trở thành



Gọi đồ thị này là $G'(V', E')$. Việc chứng minh G' là đồ thị phẳng cũng không khó, nếu ta vẽ các đỉnh tương ứng với vị trí của từng miền của G thì rõ ràng G' phẳng vì không có 2 miền nào được nối chéo nhau.

Rõ ràng $f : G \rightarrow G'$ là song ánh nên không mất tính tổng quát ban đầu. Ta để ý rằng mỗi cạnh của G' đều cắt duy nhất một cạnh của G tương ứng ban đầu nên ta có thể xem v' là v . Và mỗi

đỉnh của G được bao bọc bởi các cạnh của G' nên đỉnh trở thành miền. Tóm lại, ta được điều như sau:

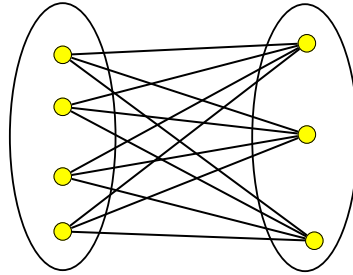
$$f : G \rightarrow G', \text{ cạnh} \mapsto \text{cạnh}, \text{ đỉnh} \mapsto \text{miền}, \text{ miền} \mapsto \text{đỉnh}$$

Khi này, $\text{sum}(P)$ có thể được hiểu là tổng $w(u)$ nằm trên cạnh chứa đỉnh P

Tiếp theo ta cần chứng minh G' lưỡng phân. Theo bổ đề Koenig, cần chứng minh các chu trình của G' đều chẵn. Ta biết rằng mỗi miền của G' đều được tạo bởi chẵn các cạnh. Thật vậy, ta xét một chu trình đi qua các cạnh của F . Khi này ta thu hẹp chu trình lại theo từng miền.

Đặt độ dài ban đầu của chu trình bị thu hẹp là x , độ dài miền bất kì là y . Rõ ràng là ta có $2 \mid x + y$, hay $x \equiv y \pmod{2}$ (vì ta bớt ra $y - 1$ cạnh do miền chẵn và thêm vào 1 nên tính chẵn lẻ giữ nguyên). Mà y chẵn nên x chẵn.

Cứ thu hẹp các chu trình liên tục như thế thì rõ ràng mọi chu trình đều chẵn. Theo bổ đề trên thì G' lưỡng phân.



Chia G' thành 2 phe là phe X có chứa F và phe Y không chứa F như hình. Ta tiến hành đếm trọng số các cạnh theo hai cách.

Cách 1 (theo phe Y): Rõ ràng phe Y không chứa F nên ta luôn có

$$\sum_{P \in Y} \text{sum}(P) = \sum_{A \in G'} \text{sum}(A) \div 2024$$

Cách 2 (theo phe X): Ta có

$$\sum_{f \in F} \text{sum}(f) + \sum_{p \in X \setminus F} \text{sum}(p) = \sum_{A \in G'} \text{sum}(A) \div 2024$$

Mặt khác, rõ ràng $\sum_{p \in X \setminus F} \text{sum}(p) \div 2024$ nên do đó ta phải có $\sum_{f \in F} \text{sum}(f) \div 2024$. Nói cách khác, tổng các trọng số của các cạnh chứa đỉnh F phải chia hết cho 2024, mà khi ta quy về G về đa diện, đỉnh F trở thành miền F thành mặt F có tổng trọng số các cạnh chia hết cho 2024. Điều này cho ta điều phải chứng minh. \square

Bài toán 32. (Vietnam TST 2024). Trong một khu vườn có các ô vuông 2024×2024 , người ta trồng ba loại hoa: hoa hồng, hoa cúc và hoa lan. Người ta muốn trồng hoa sao cho các điều kiện sau được thỏa mãn:

1. Mỗi ô được trồng tối đa một loại hoa. Một số ô có thể để trống và không trồng hoa.
2. Đối với mỗi ô được trồng A , có đúng 3 ô khác được trồng trong cùng một cột hoặc hàng sao cho ba ô đó được trồng với các loại hoa khác nhau so với ô A .

3. Mỗi loại hoa được trồng ít nhất trong 1 ô.

Số lớn nhất của các ô có thể được trồng hoa là bao nhiêu?

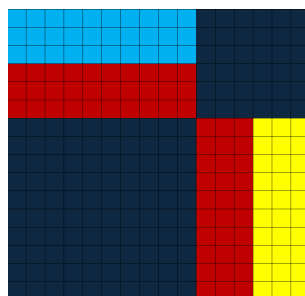
Lời giải 33. Gọi u, v, w là nhãn cúc, hồng, lan. Và ta sẽ tìm cách gán nhiều nhãn u, v, w nhất đồng thời thỏa mãn các điều kiện bài toán. Ta sẽ *divide and conquer* bài toán này để dễ xử lý hơn. Không mất tính tổng quát, ta xét một hàng bất kì (làm tương tự với cột). Rõ ràng sẽ có 3 khả năng xảy ra đối với các ô: có 1 nhãn duy nhất, có 2 nhãn khác nhau, có 3 nhãn khác nhau. Trường hợp tầm thường là không có nhãn nào hết thì ta không để ý đến.

- **Trường hợp 1: chỉ có 1 nhãn duy nhất.** Rõ ràng là bất kì một cột nào giao với 1 ô thuộc hàng này cũng chỉ chứa đúng 1 nhãn duy nhất.
- **Trường hợp 2: có 2 nhãn khác nhau.** Ta thấy rằng là hàng này chỉ có thể chứa tối đa 6 ô dán nhãn, vì nếu không, theo nguyên lý Dirichlet, tồn tại một nhãn được dán 4 lần, mâu thuẫn điều 3.
- **Trường hợp 3: có 3 nhãn khác nhau.** Tương tự với trường hợp 2, ta cũng biết được hàng này chỉ có thể chứa tối đa 6 ô dán nhãn.

Ta gọi trường hợp 1 là loại cách dán A , trường hợp 2 và 3 là cách dán loại B và chúng cũng tương tự nhau.

Bản chất của bài toán này là yêu cầu đi tìm cách dán nhãn nhiều nhất mà không quan tâm đến mỗi loại nhãn có bao nhiêu cái, nên ta chỉ cần chỉ ra một cách dán tối ưu là được.

Nếu có tối đa k hàng cũng dán cùng nhãn cùng loại B , ta có được hình chữ nhật $R_1 = 6 \times k$. Thì ta sẽ có ít nhất $2024 - k$ hàng còn lại cùng dán loại A và được hình chữ nhật $R_2 = (2024 - k) \times (2024 - 6)$. Tuy nhiên, do hàng và cột là như nhau, nên nếu ta xoay R_2 lại thì rõ ràng để thỏa mãn điều 3 thì chiều dài của R_2 phải là một cách dán nhãn loại B . Nói cách khác $2024 - k \leq 6$. Tương đương $k \geq 2018$. Vì vậy $R_1 + R_2 \leq 2018.6 + 6.2018 = 12.2018$. Và đây là một cách minh họa có kiểu dán nhãn đó.



Tất nhiên các nhãn có thể chọn tùy ý, miễn có ít nhất 2 nhãn trở lên. □

Bài toán 43. (IMO Shortlist 2010 C1). Trong một buổi hòa nhạc, 20 ca sĩ sẽ biểu diễn. Đối với mỗi ca sĩ, có một nhóm (có thể trống) các ca sĩ khác để anh ấy muốn biểu diễn muộn hơn tất cả các ca sĩ từ bộ đó. Có thể xảy ra rằng có chính xác 2010 đơn đặt hàng của các ca sĩ để tất cả mong muốn của họ được thỏa mãn?

Bài toán 44. (IMO Shortlist 2010 C2). Trên một vài hành tinh, có 2^n quốc gia ($n \geq 4$). Mỗi quốc gia có một lá cờ rộng n đơn vị và cao một đơn vị gồm có n ô vuông 1×1 , mỗi ô có thể có màu xanh hoặc vàng. Không có hai quốc gia nào có cùng lá cờ. Chúng ta nói rằng một tập hợp n lá cờ là đa dạng nếu các lá cờ đó có thể sắp xếp thành $n \times n$ ô vuông sao cho n ô vuông trên đường

chéo chính có cùng màu. Xác định giá trị nhỏ nhất của m sao cho mới mọi m là cờ phân biệt, luôn tồn tại n lá cờ tạo nên một tập đa dạng.

Bài toán 45. (IMO Shortlist 2010 C3). 2500 quân vua được đặt trên bàn cờ 100×100 sao cho

1. Không vị vua nào có thể bắt được bất kỳ vị vua nào khác (tức là không có hai vị vua nào được đặt trong hai ô vuông có chung một đỉnh)
2. Mỗi hàng và mỗi cột chứa chính xác 25 vị vua.

Tìm số lượng sắp xếp như vậy. (Hai cách sắp xếp khác nhau bằng cách xoay hoặc đối xứng được cho là khác nhau.)

Bài toán 46. (IMO/IMO Shortlist 2010 C4). Mỗi hộp trong số sáu hộp $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6$ ban đầu chứa một đồng xu. Ta có các hoạt động như sau:

- **Loại 1:** Chọn một hộp không trống $B_j, 1 \leq j \leq 5$, loại bỏ một đồng xu khỏi B_j và thêm hai đồng xu vào B_{j+1} ;
- **Loại 2:** Chọn một hộp không trống $B_k, 1 \leq k \leq 4$, loại bỏ một đồng xu khỏi B_k và hoán đổi số đồng xu (có thể trống) của các hộp B_{k+1} và B_{k+2} .

Xác định xem có tồn tại một chuỗi hữu hạn các phép toán thuộc các loại trên hay không, sao cho năm hộp B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 trở nên trống rỗng, trong khi hộp B_6 chứa chính xác $2010^{2010^{2010}}$ xu.

Bài toán 47. (IMO Shortlist 2011 C1). Cho $n > 0$ là một số nguyên. Chúng ta có một cái cân và n quả cân trọng lượng $2^0, 2^1, \dots, 2^{n-1}$. Chúng ta đặt từng quả cân lên cân sao cho đĩa bên phải không bao giờ nặng hơn đĩa bên trái. Ở mỗi bước, chúng ta chọn một trong các quả cân chưa được đặt lên cân và đặt nó lên đĩa bên trái hoặc đĩa bên phải cho đến khi tất cả các quả cân đã được đặt xong. Hãy xác định số cách có thể thực hiện được điều này.

Bài toán 48. (IMO Shortlist 2011 C2). Giả sử rằng sinh viên 1000 đang đứng thành một vòng tròn. Chứng minh rằng tồn tại một số nguyên k với $100 \leq k \leq 300$ sao cho trong vòng tròn này tồn tại một nhóm liên kề gồm $2k$ học sinh, trong đó nửa đầu chứa số nữ sinh bằng nửa sau.

Bài toán 49. (IMO Shortlist 2011 C4). Xác định số nguyên dương lớn nhất k thỏa mãn tính chất sau: Tập hợp các số nguyên dương có thể được phân chia thành k tập con A_1, A_2, \dots, A_k sao cho mọi số nguyên $n \geq 15$ và tất cả $i \in \{1, 2, \dots, k\}$ tồn tại hai phần tử riêng biệt của A_i có tổng là n .

Bài toán 50. (IMO Shortlist 2012 C1). Một vài số nguyên dương được viết thành một hàng. Liên tục lặp lại, Alice chọn hai số liên kề x và y sao cho $x > y$ và x nằm ở bên trái của y , và thay thế cặp (x, y) bằng $(y + 1, x)$ hoặc $(x - 1, x)$. Chứng minh rằng cô ấy chỉ có thể thực hiện hữu hạn nhiều lần lặp như vậy.

Bài toán 51. (IMO Shortlist 2012 C2). Cho $n \geq 1$ là một số nguyên. Số lượng tối đa các cặp phần tử rời nhau của tập $\{1, 2, \dots, n\}$ sao cho tổng của các cặp khác nhau là các số nguyên khác nhau không vượt quá n ?

Bài toán 52. (IMO Shortlist 2012 C3). Trong một bảng vuông 999×999 , một số ô có màu trắng và các ô còn lại có màu đỏ. Gọi T là số bộ ba (C_1, C_2, C_3) của các ô, hai ô đầu tiên trong

cùng một hàng và hai ô cuối cùng trong cùng một cột, với C_1, C_3 màu trắng và C_2 màu đỏ. Tìm giá trị lớn nhất T có thể đạt được.

Bài toán 53. (IMO Shortlist 2012 C7). Cho 2^{500} điểm nằm trên một đường tròn được đánh theo số thứ tự $1, 2, \dots, 2^{500}$. Chứng minh rằng có thể chọn ra 100 cặp điểm rời nhau để nối một số điểm trong số này sao cho 100 tổng của các cặp số tại điểm cuối của dây cung đã chọn là bằng nhau.

Bài toán 54. (IMO Shortlist 2013 C1). Cho n là một số nguyên dương. Tìm số nguyên nhỏ nhất k có tính chất sau; Cho bất kỳ số thực a_1, \dots, a_d sao cho $a_1 + a_2 + \dots + a_d = n$ và $0 \leq a_i \leq 1$ với $i = 1, 2, \dots, d$, nó có thể phân chia các số này thành các nhóm k (một số có thể trống) sao cho tổng các số trong mỗi nhóm nhiều nhất là 1.

Bài toán 55. (IMO/IMO Shortlist 2013 C2). Một cấu hình gồm các điểm 4027 trong mặt phẳng được gọi là Colombia nếu nó bao gồm 2013 điểm đỏ và 2014 điểm xanh, và không có ba điểm nào trong cấu hình thẳng hàng. Bằng cách vẽ một số đường, mặt phẳng được chia thành nhiều vùng. Việc sắp xếp các đường là tốt cho cấu hình Colombia nếu hai điều kiện sau được thỏa mãn:

1. Không có đường thẳng nào đi qua bất kỳ điểm nào của hình.
2. Không có vùng nào chứa điểm có cả hai màu.

Tìm giá trị nhỏ nhất của k sao cho với bất kỳ cấu hình Colombia nào có 4027 điểm, có sự sắp xếp hợp lý cho k đường thẳng.

Bài toán 56. (IMO Shortlist 2014 C3). Cho $n \geq 2$ là một số nguyên. Xét một bàn cờ vua $n \times n$ gồm n^2 ô đơn vị. Một cấu hình của n quân xe trên bảng này là hòa bình nếu mỗi hàng và mỗi cột chứa đúng một quân xe. Tìm số nguyên dương lớn nhất k sao cho, đối với mỗi cấu hình hòa bình của n quân xe, tồn tại một ô vuông $k \times k$ không chứa quân xe trên bất kỳ ô đơn vị nào trong k^2 ô của nó.

Bài toán 57. (IMO Shortlist 2015 C3). Cho một tập hợp hữu hạn A gồm các số nguyên dương, một phân hoạch của A thành hai tập hợp không giao nhau và khác rỗng A_1 và A_2 được gọi là tốt nếu bội chung nhỏ nhất của các phần tử trong A_1 bằng với ước chung lớn nhất của các phần tử trong A_2 . Tìm giá trị nhỏ nhất của n sao cho tồn tại một tập hợp gồm n số nguyên dương với chính xác 2015 phân hoạch tốt.

Bài toán 58. (IMO Shortlist 2015 C4). Cho n là một số nguyên dương. Hai người chơi A và B chơi một trò chơi trong đó họ lần lượt chọn các số nguyên dương $k \leq n$. Các quy tắc của trò chơi là:

1. Một người chơi không thể chọn một số đã được chọn bởi bất kỳ người chơi nào trong các lượt chơi trước đó.
2. Một người chơi không thể chọn một số liền kề với bất kỳ số nào mà người chơi đã chọn trước đó trong các lượt chơi trước đó.
3. Trò chơi hòa nếu tất cả các số đã được chọn; nếu không, người chơi không thể chọn được số nào nữa thì sẽ thua cuộc.

Người chơi A thực hiện lượt chơi đầu tiên. Xác định kết quả của trò chơi, giả sử cả hai người chơi sử dụng chiến lược tối ưu.

Bài toán 59. (IMO Shortlist 2016 C2). Tìm tất cả các số nguyên dương n sao cho tất cả các ước số dương của n có thể được đặt vào các ô của một bảng hình chữ nhật dưới các ràng buộc sau:

1. Mỗi ô chứa một ước số khác nhau
2. Tổng của tất cả các hàng bằng nhau
3. Tổng của tất cả các cột bằng nhau.

Bài toán 60. (IMO Shortlist 2016 C3). Cho n là một số nguyên dương nguyên tố với 6. Người ta sơn các đỉnh của một đa giác đều n đỉnh bằng ba màu sao cho có một số lẻ đỉnh mỗi màu. Chứng minh rằng tồn tại một tam giác cân có ba đỉnh có ba màu khác nhau.

Bài toán 61. (IMO Shortlist 2016 C5). Cho $n \geq 3$ là một số nguyên dương. Tìm số lượng đường chéo tối đa có thể chọn trong một đa giác đều n đỉnh, sao cho không có hai đường chéo nào cắt nhau bên trong hoặc chúng vuông góc với nhau.

Bài toán 62. (IMO Shortlist 2016 C8). Cho n là một số nguyên dương. Xác định số nguyên dương nhỏ nhất k có tính chất sau: có thể đánh dấu k ô trên một bảng $2n \times 2n$ sao cho tồn tại một phân chia duy nhất của bảng thành các ô vuông 1×2 và 2×1 , không có ô nào chứa hai ô đã đánh dấu.

Bài toán 63. (IMO Shortlist 2017 C1). Một hình chữ nhật \mathcal{R} với độ dài cạnh là số nguyên lẻ được chia thành các hình chữ nhật nhỏ có độ dài cạnh là số nguyên. Chứng minh rằng luôn tồn tại ít nhất một trong các hình chữ nhật nhỏ mà khoảng cách từ bốn cạnh của \mathcal{R} đến hình chữ nhật nhỏ đó đều là số lẻ hoặc đều là số chẵn.

Bài toán 64. (IMO Shortlist 2017 C2). Cho n là một số nguyên dương. Một chuỗi nhện là một chuỗi bất kỳ gồm $3n$ chữ cái, với đúng n lần xuất hiện của mỗi chữ cái a, b , và c . Định nghĩa một hoán vị là sự hoán đổi của hai chữ cái liên tiếp trong một chuỗi nhện. Chứng minh rằng đối với bất kỳ chuỗi nhện X nào, luôn tồn tại một chuỗi nhện Y sao cho X không thể được thay đổi thành Y bằng ít hơn $3n^2/2$ lần hoán vị.

Bài toán 65. (IMO Shortlist 2017 C3). Sir Alex chơi trò chơi sau trên một hàng gồm 9 ô. Ban đầu, tất cả các ô đều trống. Trong mỗi lượt, Sir Alex được phép thực hiện chính xác một trong hai thao tác sau:

1. Chọn bất kỳ số nào có dạng 2^j , với j là một số nguyên không âm, và đặt nó vào một ô trống.
2. Chọn hai ô (không nhất thiết phải kề nhau) có cùng một số trong đó; gọi số đó là 2^j . Thay thế số trong một ô bằng 2^{j+1} và xóa số trong ô kia.
3. Cuối cùng, một ô chứa 2^n , với n là một số nguyên dương đã cho, trong khi các ô khác đều trống.

Xác định số lượng lớn nhất các bước mà Sir Alex có thể đã thực hiện theo n .

Bài toán 66. (IMO Shortlist 2017 C4). Cho một số nguyên $N \geq 2$. Một tập hợp gồm $N(N+1)$ cầu thủ bóng đá, không có hai người cùng chiều cao, đứng thành một hàng. Sir Alex muốn loại bỏ $N(N-1)$ người từ hàng này, để lại một hàng mới gồm $2N$ người trong đó thỏa mãn N điều kiện sau:

- (1) Không ai đứng giữa hai người cao nhất,

(2) Không ai đứng giữa người thứ ba và người thứ tư cao nhất,

⋮

(N) Không ai đứng giữa hai người thấp nhất.

Chứng minh rằng điều này luôn có thể thực hiện được.

Bài toán 67. (IMO Shortlist 2017 C5). Tom và Jerry chơi một trò chơi trên một trục số. Điểm bắt đầu của Jerry - A_0 , và điểm bắt đầu của Tom - B_0 , là cùng một điểm. Sau $n - 1$ lượt chơi, Jerry đang ở điểm A_{n-1} và Tom ở điểm B_{n-1} . Trong lượt chơi thứ n của trò chơi, ba sự kiện xảy ra theo thứ tự:

1. Jerry di chuyển đến một điểm A_n sao cho khoảng cách giữa A_{n-1} và A_n là chính xác 1.
2. Một thiết bị theo dõi báo cáo một điểm P_n cho Tom. Đảm bảo duy nhất của thiết bị theo dõi với Tom là khoảng cách giữa P_n và A_n không vượt quá 1.
3. Tom di chuyển rõ ràng đến một điểm B_n sao cho khoảng cách giữa B_{n-1} và B_n là chính xác 1.

Liệu có luôn luôn có thể, không phụ thuộc vào cách Jerry di chuyển như thế nào và không phụ thuộc vào các điểm được báo cáo bởi thiết bị theo dõi, Tom có thể chọn cách di chuyển của mình sao cho sau 10^9 lượt chơi, Tom có thể đảm bảo khoảng cách giữa Tom và Jerry không vượt quá 100?

Bài toán 68. (IMO Shortlist 2017 C6). Cho số nguyên dương $n > 1$. Một khối lập phương $n \times n \times n$ được tạo thành từ n^3 khối lập phương đơn vị. Mỗi khối lập phương đơn vị được sơn bằng một màu. Đối với mỗi hộp $n \times n \times 1$ bao gồm n^2 khối lập phương đơn vị (trong bất kỳ ba hướng nào cũng được), chúng ta xem xét tập hợp các màu hiện diện trong hộp đó (mỗi màu chỉ được liệt kê một lần). Bằng cách này, chúng ta có được $3n$ tập hợp màu, được chia thành ba nhóm theo từng hướng.

Đối với mỗi tập trong bất kỳ nhóm nào, cùng một tập xuất hiện trong cả hai nhóm còn lại. Xác định số lớn nhất có thể của các màu hiện diện theo n .

Bài toán 69. (IMO Shortlist 2018 C1). Cho số nguyên dương $n \geq 3$. Chứng minh rằng tồn tại một tập hợp S gồm $2n$ số nguyên dương thỏa mãn tính chất sau: Đối với mọi $m = 2, 3, \dots, n$ tập hợp S có thể được phân chia thành hai tập con có tổng các phần tử bằng nhau, với một trong số các tập con có kích thước là m .

Bài toán 70. (IMO Shortlist 2018 C3). Cho n là một số nguyên dương đã cho. Sisyphus thực hiện một chuỗi các lượt trên một bảng gồm $n + 1$ ô liên tiếp, được đánh số từ 0 đến n từ trái sang phải. Ban đầu, n viên đá được đặt vào ô số 0, và các ô khác đều trống. Ở mỗi lượt, Sisyphus chọn bất kỳ ô không trống nào, ví dụ với k viên đá, lấy một trong những viên đá này và di chuyển nó sang phải tối đa k ô (viên đá phải ở trong bảng). Mục tiêu của Sisyphus là di chuyển tất cả n viên đá đến ô số n .

Chứng minh rằng Sisyphus không thể đạt được mục tiêu trong ít hơn

$$\left\lceil \frac{n}{1} \right\rceil + \left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil + \left\lceil \frac{n}{3} \right\rceil + \dots + \left\lceil \frac{n}{n} \right\rceil$$

lượt.

Bài toán 71. (IMO Shortlist 2018 C4). Một tam giác anti-Pascal là một mảng tam giác đều của các số sao cho, trừ những số ở hàng dưới cùng, mỗi số là giá trị tuyệt đối của hiệu giữa hai số ngay dưới nó. Ví dụ, dưới đây là một tam giác anti-Pascal có bốn hàng chứa tất cả các số nguyên từ 1 đến 10.

$$\begin{array}{cccc} & & 4 & & \\ & 2 & & 6 & \\ & 5 & 7 & 1 & \\ 8 & 3 & 10 & 9 & \end{array}$$

Có tồn tại một tam giác anti-Pascal với 2018 hàng chứa mọi số nguyên từ 1 đến $1+2+3+\dots+2018$ không?

Bài toán 72. (IMO Shortlist 2018 C6). Đặt a và b là hai số nguyên dương khác nhau. Quá trình vô hạn sau diễn ra trên một bảng ban đầu rỗng.

1. Nếu có ít nhất một cặp số bằng nhau trên bảng, chúng ta chọn một cặp như vậy và tăng một trong các thành phần của nó lên a và còn lại lên b .
2. Nếu không có cặp nào tồn tại, chúng ta viết hai lần số 0.

Chúng minh rằng, bất kể chúng ta chọn như thế nào trong (1), thì hoạt động (2) sẽ được thực hiện chỉ có một số lần hữu hạn.

Bài toán 73. (IMO Shortlist 2019 C2). Cho một tập hợp gồm n khối, mỗi khối có trọng lượng ít nhất là 1; tổng trọng lượng của chúng là $2n$. Chúng minh rằng đối với mọi số thực r với $0 \leq r \leq 2n - 2$ luôn có thể chọn một tập con của các khối có tổng trọng lượng ít nhất là r nhưng không quá $r + 2$.

Bài toán 74. (IMO Shortlist 2019 C3). Ngân hàng Bath phát hành các đồng xu với kí hiệu H ở một mặt và kí hiệu T ở mặt còn lại. Harry có n đồng xu này được sắp xếp thành một dãy từ trái sang phải. Anh ta lặp đi lặp lại thực hiện phép toán sau: nếu có chính xác $k > 0$ đồng xu hiển thị H , thì anh ta lật ngược đồng xu thứ k từ bên trái; nếu không, tất cả các đồng xu hiển thị T và anh ta dừng lại. Ví dụ, nếu $n = 3$ quá trình bắt đầu với cấu hình THT sẽ là $THT \rightarrow HHT \rightarrow HTT \rightarrow TTT$, dừng lại sau ba phép toán.

- (a) Chúng minh rằng, đối với mỗi cấu hình ban đầu, Harry sẽ dừng lại sau một số lần phép toán hữu hạn.
- (b) Đối với mỗi cấu hình ban đầu C , đặt $L(C)$ là số lần phép toán trước khi Harry dừng lại. Ví dụ, $L(THT) = 3$ và $L(TTT) = 0$. Xác định giá trị trung bình của $L(C)$ qua tất cả 2^n cấu hình ban đầu có thể có C .

Bài toán 75. (IMO Shortlist 2020 C1). Cho số nguyên dương n . Tìm số hoán vị a_1, a_2, \dots, a_n của $1, 2, \dots, n$ thỏa mãn

$$a_1 \leq 2a_2 \leq 3a_3 \leq \dots \leq na_n$$

Bài toán 76. (IMO Shortlist 2020 C2). Trong một đa giác đều 100 đỉnh, 41 đỉnh được tô màu đen và 59 đỉnh còn lại được tô màu trắng. Chứng minh rằng tồn tại 24 hình tứ giác lồi Q_1, \dots, Q_{24} có các đỉnh là các đỉnh của đa giác 100 đỉnh, sao cho các hình tứ giác Q_1, \dots, Q_{24} không giao nhau, và mỗi hình tứ giác Q_i có ba đỉnh màu của một màu và một đỉnh của màu khác.

Bài toán 77. (IMO Shortlist 2020 C4). Các số Fibonacci F_0, F_1, F_2, \dots được định nghĩa theo công thức truy hồi $F_0 = 0, F_1 = 1$, và $F_{n+1} = F_n + F_{n-1}$ cho $n \geq 1$. Cho một số nguyên $n \geq 2$, xác định kích thước nhỏ nhất của một tập hợp S các số nguyên sao cho đối với mọi $k = 2, 3, \dots, n$ có một số $x, y \in S$ sao cho $x - y = F_k$.

Bài toán 78. (IMO Shortlist 2020 C5). Cho p là một số nguyên tố lẻ, và đặt $N = \frac{1}{4}(p^3 - p) - 1$. Các số $1, 2, \dots, N$ được tô màu một cách tùy ý bằng hai màu, đỏ và xanh. Đối với mọi số nguyên dương $n \leq N$, đặt $r(n)$ là tỷ lệ của các số nguyên trong tập $1, 2, \dots, n$ được tô màu đỏ. Chứng minh rằng tồn tại một số nguyên dương $a \in 1, 2, \dots, p-1$ sao cho $r(n) \neq a/p$ cho tất cả các $n = 1, 2, \dots, N$.

Bài toán 79. (IMO Shortlist 2020 C6). Có $4n$ viên sỏi có trọng số $1, 2, 3, \dots, 4n$. Mỗi viên sỏi được tô một trong n màu và có bốn viên sỏi của mỗi màu. Chứng minh rằng chúng ta có thể sắp xếp các viên sỏi thành hai đồng sao cho cả hai điều kiện sau đây đều được thỏa mãn:

- (a) Tổng trọng lượng của cả hai đồng là như nhau.
- (b) Mỗi đồng chứa hai viên sỏi của mỗi màu.

Bài toán 80. (IMO Shortlist 2020 C8). Người chơi A và B chơi một trò chơi trên một bảng đen ban đầu có sẵn 2020 số 1. Trong mỗi vòng, người chơi A xóa hai số x và y khỏi bảng đen, và sau đó người chơi B viết một trong các số $x + y$ và $|x - y|$ lên bảng đen. Trò chơi kết thúc ngay khi, ở cuối một vòng nào đó, một trong các điều sau được thực hiện:

1. Một trong các số trên bảng đen lớn hơn tổng của tất cả các số khác;
2. Chỉ còn các số 0 trên bảng đen.

Người chơi B sau đó phải tặng cho người chơi A bằng số bánh quy mà có trên bảng đen. Người chơi A muốn nhận được nhiều bánh quy nhất có thể, trong khi người chơi B muốn tặng ít bánh quy nhất có thể. Xác định số bánh quy mà A nhận được nếu cả hai người chơi chơi một cách tối ưu.

Bài toán 81. (IMO Shortlist 2021 C1). Cho S là một tập hợp vô hạn các số nguyên dương, sao cho tồn tại bốn số phân biệt theo cặp $a, b, c, d \in S$ với $\gcd(a, b) \neq \gcd(c, d)$. Chứng minh rằng tồn tại ba số phân biệt theo cặp $x, y, z \in S$ sao cho $\gcd(x, y) = \gcd(y, z) \neq \gcd(z, x)$.

Bài toán 82. (IMO Shortlist 2021 C2). Cho $n \geq 3$ là một số nguyên cố định. Có $m \geq n + 1$ viên ngọc trên một dây chuyền tròn. Bạn muốn sơn các viên ngọc bằng n màu, sao cho giữa bất kỳ $n + 1$ viên liên tiếp mỗi màu xuất hiện ít nhất một lần. Tìm giá trị lớn nhất của m cho nhiệm vụ này không thể thực hiện được.

Bài toán 83. (IMO Shortlist 2021 C5). Cho n và k là hai số nguyên sao cho $n > k \geq 1$. Có $2n + 1$ học sinh đang đứng thành một vòng tròn. Mỗi học sinh S có $2k$ người hàng xóm - nghĩa là k học sinh gần nhất với S bên trái và k học sinh gần nhất với S bên phải.

Giả sử rằng $n + 1$ học sinh là nữ và n học sinh còn lại là nam. Chứng minh rằng tồn tại một cô gái với ít nhất k cô gái trong số hàng xóm của cô ấy.

Bài toán 84. (IMO Shortlist 2021 C6). Một thợ săn và một con thỏ chơi một trò chơi trên lưới vuông vô hạn. Trước tiên, thợ săn chọn một cách tô màu cho các ô với số màu hữu hạn. Sau đó, con thỏ bí mật chọn một ô để bắt đầu. Mỗi phút, con thỏ báo cáo màu của ô hiện tại cho thợ săn, và sau đó di chuyển bí mật đến một ô kề cạnh mà nó chưa từng ghé qua trước đó (hai ô được coi là kề nhau nếu chúng có một cạnh chung). Thợ săn chiến thắng nếu sau một khoảng thời gian hữu hạn, một trong hai điều sau xảy ra:

1. Con thỏ không thể di chuyển nữa.
2. Thợ săn có thể xác định ô mà con thỏ đã bắt đầu.

Hãy xác định xem liệu có chiến lược chiến thắng cho thợ săn hay không.

Bài toán 85. (IMO 2022). Ngân hàng Oslo phát hành hai loại tiền xu: nhôm (ký hiệu là A) và đồng (ký hiệu là B). Alpha có n đồng xu nhôm và n đồng xu đồng được sắp xếp thành một hàng theo thứ tự ban đầu tùy ý. Một chuỗi là bất kỳ dãy con nào các đồng xu liên tiếp có cùng loại. Cho một số nguyên dương cố định $k \leq 2n$, Beta lặp đi lặp lại thao tác sau: anh ta xác định chuỗi dài nhất chứa đồng xu thứ k từ bên trái và di chuyển tất cả đồng xu trong chuỗi đó sang đầu bên trái của hàng. Ví dụ: nếu $n = 4$ và $k = 4$, quá trình bắt đầu từ $AABBBABA$ sẽ là

$$AABBBABA \rightarrow BBBA AABA \rightarrow AAABBBBA \rightarrow BBBBAAAA \rightarrow \dots$$

Tìm tất cả các cặp (n, k) với $1 \leq k \leq 2n$ sao cho với mỗi cách xếp các đồng xu lúc đầu, tại một thời điểm nào đó trong quá trình, n đồng xu ngoài cùng bên trái có cùng loại.

Bài toán 86. (IMO Shortlist 2022 C3). Trong mỗi ô vuông của một khu vườn có dạng bảng ô vuông cỡ 2022×2022 , ban đầu có một cái cây cao 0. Một người làm vườn và một thợ đốn gỗ thay phiên nhau chơi trò chơi sau, người làm vườn sẽ chơi ở lượt đầu tiên:

- (1) Người làm vườn chọn một ô vuông trong vườn. Sau đó mỗi cây trên ô vuông đó và tất cả các ô vuông xung quanh trở thành cao hơn một đơn vị.
- (2) Người thợ đốn gỗ chọn bốn ô vuông khác nhau trong vườn. Sau đó mỗi cây có chiều cao dương trên các ô vuông đó sẽ trở thành thấp hơn một đơn vị.

Ta nói rằng một cái cây là hùng vĩ nếu chiều cao của nó ít nhất là 10^6 . Tìm số k lớn nhất sao cho người làm vườn có thể đảm bảo cuối cùng sẽ có k cây hùng vĩ trong vườn, bất kể người thợ đốn gỗ chơi như thế nào.

Bài toán 87. (IMO Shortlist 2022 C4). Cho một số nguyên $n > 3$. Giả sử rằng n đứa bé được sắp xếp thành một vòng tròn và n đồng xu được phân phát cho chúng (một số bé có thể không có đồng xu nào). Ở mỗi bước, bé có ít nhất 2 đồng xu có thể đưa 1 đồng xu cho mỗi bé ngay bên phải và bên trái của mình. Hãy tìm tất cả các cách phân phát các đồng xu ban đầu sao cho sau một số hữu hạn bước, mỗi bé có đúng một đồng xu.

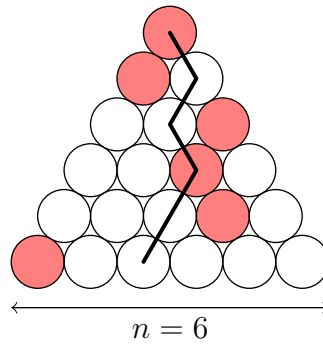
Bài toán 88. (IMO Shortlist 2022 C8). Cho n là một số nguyên dương. Hình vuông Bắc Âu là một bảng ô vuông $n \times n$ chứa tất cả các số nguyên từ 1 đến n^2 sao cho mỗi ô chứa đúng một số.

Hai ô khác nhau được gọi là *kề* nếu chúng có chung một cạnh. Mỗi ô chỉ kề với các ô chứa số lớn hơn được gọi là *thung lũng*. Đường lên dốc là một dãy gồm một hoặc nhiều ô sao cho các điều kiện sau được thỏa mãn đồng thời:

1. Ô đầu tiên trong dãy là một thung lũng.
2. Mỗi ô tiếp theo trong dãy kề với ô trước đó.
3. Các số trên các ô trong dãy lập thành một dãy tăng theo thứ tự.

Tìm, theo n , số nhỏ nhất đường lên dốc có thể có trong một hình vuông Bắc Âu.

Bài toán 89. (IMO 2023). Cho n là một số nguyên dương. Một tam giác Nhật Bản bao gồm các $1 + 2 + \dots + n$ hình tròn được sắp xếp theo hình tam giác đều sao cho với mỗi $i \in [n]$, hàng thứ i chứa chính xác i hình tròn, có đúng một trong số đó được tô màu đỏ. Con đường ninja trong tam giác Nhật Bản là một chuỗi n các vòng tròn thu được bằng cách bắt đầu ở hàng trên cùng, sau đó liên tục đi từ một vòng tròn đến một trong hai vòng tròn ngay bên dưới nó và kết thúc ở hàng dưới cùng. Dưới đây là một ví dụ về tam giác Nhật Bản với $n = 6$



Như một hàm số theo n , tìm lớn nhất k sao cho trong mỗi tam giác Nhật Bản có một con đường ninja chứa ít nhất k các vòng tròn màu đỏ.

B . Lời giải