

Αριθμοί και Σχήματα

Στράτος Πρασίδης

Πανεπιστήμιο Αιγαίου

22 Νοεμβρίου 2022

Φυσικοί Αριθμοί

Ορίζουμε τους φυσικούς αριθμούς:

$$\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$$

Ιδιότητες:

- Δύο πράξεις ορίζονται και είναι κλειστές στους φυσικούς αριθμούς: η πρόσθεση και ο πολλαπλασιασμός.
- Κάποιες φορές, η αφαίρεση και η διαίρεση ορίζονται αλλά όχι πάντα:

$$3 - 2 = 1, \quad 2 - 3 \notin \mathbb{N}, \quad 6 : 3 = 2, \quad 5 : 2 \notin \mathbb{N}.$$

- Είναι αριθμοί όπου για κάθε έναν έχουμε τον επόμενό του. Ουσιαστικά ορίζονται από την πράξη $+1$ ξεκινώντας από το 0.

Από τον ορισμό τους, οι φυσικοί αριθμοί έχουν κάποιες, πιο τεχνικές, ιδιότητες:

- ① (Αρχή της Καλής Διάταξης) Κάθε υποσύνολο του \mathbb{N} έχει ένα ελάχιστο στοιχείο.
- ② (Αρχή της Μαθηματικής Επαγωγής) Έστω $P(n)$ είναι μια πρόταση που εξαρτάται από έναν φυσικό αριθμό n . Υποθέτουμε ότι
 - ① Για κάποιον φυσικό αριθμό n , η $P(k)$ αληθεύει.
 - ② Για κάθε $n \geq k$, αν η $P(n)$ αληθεύει, τότε και η $P(n + 1)$ αληθεύει.

Τότε η $P(n)$ ισχύει για κάθε $n \geq k$.

Οι παραπάνω ιδιότητες είναι ισοδύναμες. Είναι πολύ χρήσιμες ιδιότητες στις αποδείξεις που εξαρτώνται από φυσικούς αριθμούς ή που ανάγονται σε φυσικούς αριθμούς.

Παραστατικά:



Υποθέτουμε ότι έχουμε μια άπειρη σκάλα και ξέρουμε δυο πράγματα:

- 1 Μπορούμε να ανεβούμε στο πρώτο σκαλοπάτι.
- 2 Εάν μπορέσουμε να φτάσουμε σε ένα σκαλοπάτι, τότε μπορούμε να ανεβούμε στο επόμενο.

Απ' αυτές τις δυο προτάσεις συμπεραίνουμε ότι μπορούμε να φτάσουμε σε κάθε σκαλοπάτι της σκάλας.

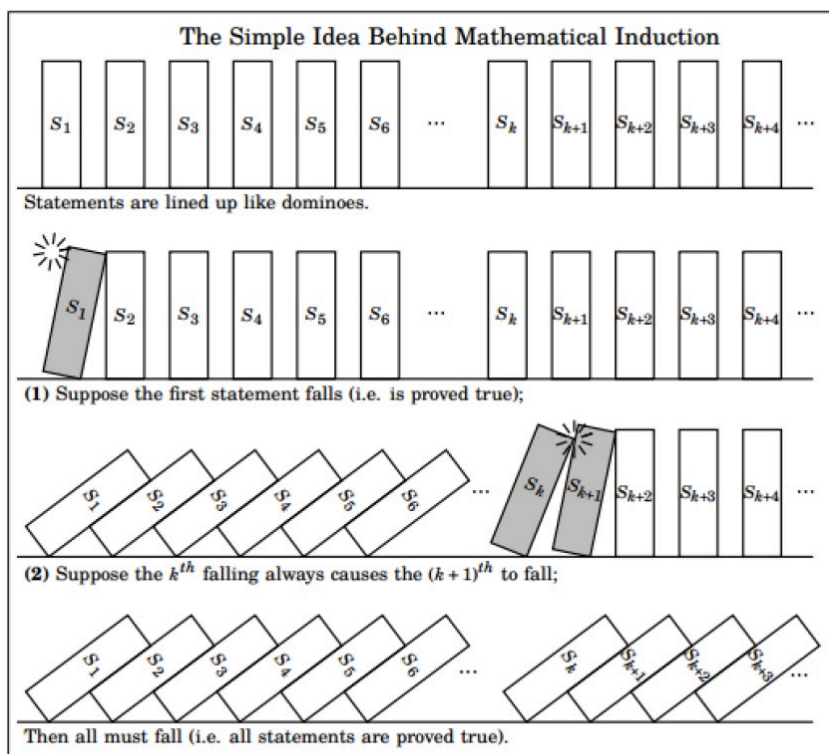
Με άλλον τρόπο:



Υποθέτουμε ότι έχουμε μια άπειρη συλλογή από ντόμινο και ξέρουμε δυο πράγματα:

- 1 Υποθέτουμε ότι πέφτει το πρώτο ντόμινο.
- 2 Εάν πέσει κάποιο ντόμινο τότε θα πέσει και το επόμενο.

Απ' αυτές τις δυο προτάσεις συμπεραίνουμε ότι όλα τα ντόμινο θα πέσουν.



Παραδείγματα Επαγωγής-1

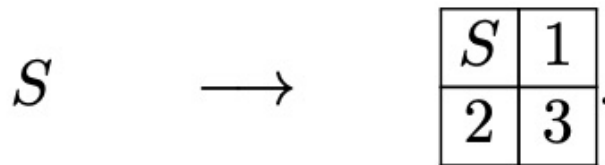
(1) Μια ομάδα n πειρατών πρόκειται να μοιράσει έναν θησαυρό, από χρυσό, έτσι ώστε κάθε πειρατής θα πάρει ένα ίσο μερίδιο. Όμως οι πειρατές δεν είναι αντικειμενικοί, και κάθε πειρατής έχει την δικιά του άποψη του τι είναι το $\frac{1}{n}$ του θησαυρού. Να δώσετε μια στρατηγική μοιρασιάς του θησαυρού.

Θα χρησιμοποιήσουμε επαγωγή στο n . Για $n = 1$ το αποτέλεσμα είναι προφανές. Υποθέτουμε ότι έχουμε μια μέθοδο να μοιραστούν $k - 1$ πειρατές τον θησαυρό. Τώρα υποθέτουμε ότι έχουμε μια ομάδα από k -πειρατές.

Παίρνουμε ένα κομμάτι του θησαυρού και το βάζουμε σε έναν καινούργιο σωρό. Συνεχίζουμε αυτήν την διαδικασία μέχρις ότου ένας πειρατής δηλώσει ότι αυτό είναι το δίκαιο μερίδιο του θησαυρού γι' αυτόν. Οι υπόλοιποι $k - 1$ πειρατές πιστεύουν ότι αυτό το μερίδιο δεν είναι δίκαιο γι' αυτούς, διαφορετικά θα είχαν επιλέξει τον καινούργιο σωρό νωρίτερα.

Από την υπόθεση της επαγωγής, οι υπόλοιποι πειρατές $k - 1$ μπορούν τώρα να μοιράσουν τον υπόλοιπο θησαυρό.

(2) Δείξτε ότι μπορούμε να υποδιαιρέσουμε κάθε τετράγωνο σε n τετράγωνα, για κάθε $n \geq 6$. Σ' αυτήν την περίπτωση θα χρησιμοποιήσουμε ένα επαγωγικό επιχείρημα λίγο διαφορετικό. Η πρώτη παρατήρηση είναι ότι αν μπορέσουμε να κατασκευάσουμε ένα τετράγωνο S με $n - 3$ υποτετράγωνα, τότε μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα τετράγωνο με n υποτετράγωνα:



Τότε αν έχουμε 6 υποτετράγωνα, μπορούμε να κατασκευάσουμε υποδιαιρέσεις με 6, 9, 12, 15 ... υποτετράγωνα. Αν έχουμε 7 υποτετράγωνα, μπορούμε να κατασκευάσουμε υποδιαιρέσεις για 7, 10, 13, 16 ..., και αν έχουμε 8 υποτετράγωνα, μπορούμε να κατασκευάσουμε υποδιαιρέσεις για 8, 11, 14, 17 ... υποτετράγωνα.

Άρα πρέπει να υποδιαιρέσουμε ένα τετράγωνο σε 6, 7 και 8 τετράγωνα και τότε μπορούμε να υποδιαιρέσουμε κάθε τετράγωνο σε οποιοδήποτε αριθμό υποτετραγώνων.

Γι' αυτά τα υποτετράγωνα έχουμε

1		2
		3
4	5	6

1		2	
3	4	5	
6	7		

1			2
			3
			4
5	6	7	8

(3) Ένα ΑΤΜ μηχάνημα έχει μόνο νομίσματα των €5 και κέρματα των €2. Δείξτε ότι το μηχάνημα μπορεί να δώσει οποιοδήποτε ακέραιο ποσό, μεγαλύτερο των €3, του ζητηθεί. Έστω n είναι το ποσό για ανάληψη. Θα δώσουμε την απόδειξη με επαγωγή. Για $n = 4$ είναι εύκολο να δούμε ότι είναι $2 + 2$. Τώρα υποθέτουμε ότι μπορούμε να κάνουμε ανάληψη το ποσό των € k . Θα δείξουμε ότι μπορούμε να πάρουμε € $k + 1$.

Θα διακρίνουμε περιπτώσεις:

- Αν στο ποσό k υπάρχουν δυο δέυρα, τότε τα αφαιρούμε και τα αντικαθιστούμε με ένα πεντάευρο
- Αν υπάρχει ένα πεντάευρο, τότε το αφαιρούμε και το αντικαθιστούμε με τρία δέυρα.
- Αν υπάρχουν ένα πεντάευρο και ένα δέυρο, τα αφαιρούμε και τα αντικαθιστούμε με τέσσερα δέυρα.

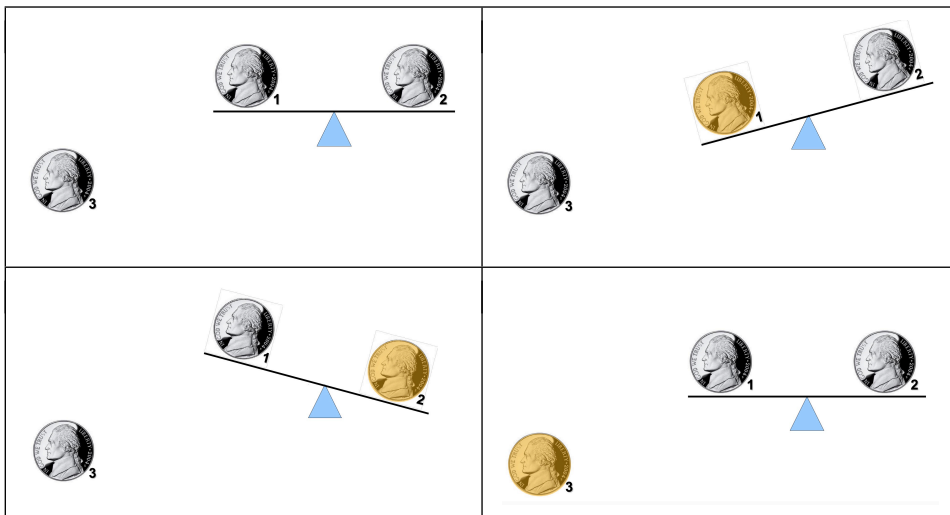
Σε κάθε περίπτωση μπορούμε να κάνουμε ανάληψη $\in k + 1$.

Το πρόβλημα έχει και μια άλλη διαφορετική λύση. Θέλουμε να πάρουμε $\in n$.

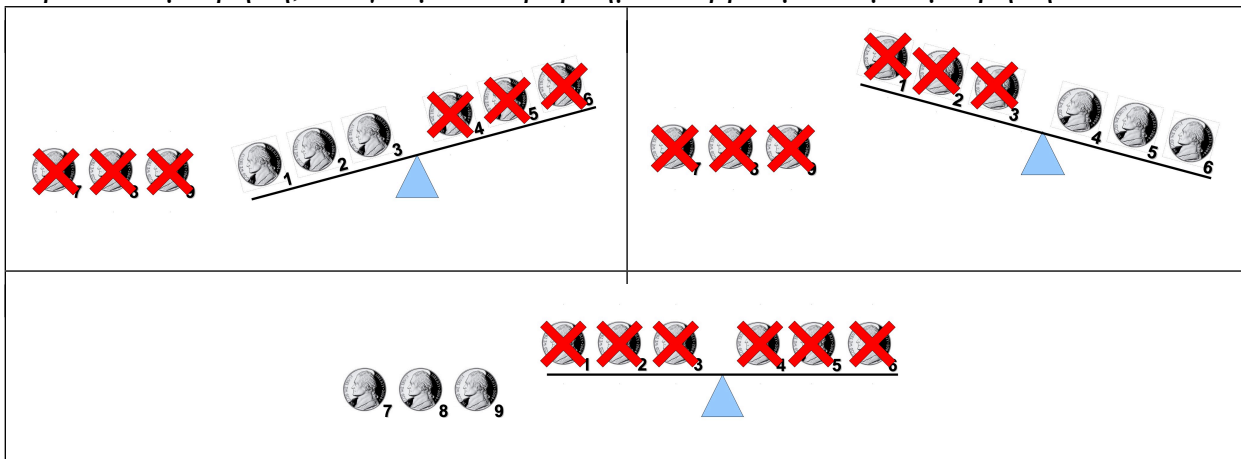
- Αν το n είναι άρτιος, τότε μπορούμε να το πάρουμε μόνο με δίδευρα.
- Αν το n είναι περιττός τότε, επειδή το $n - 5$ είναι άρτιος, μπορούμε να το πάρουμε ως ένα πεντάευρο και τα υπόλοιπα δίδευρα.

(4) Δίνονται τρία ίδια νομίσματα, δυο από τα οποία είναι γνήσια και ένα πλαστό. Το πλαστό νόμισμα ζυγίζει πιο πολύ από τα άλλα. Χρησιμοποιώντας μια ζυγαριά μόνο μια φορά, να βρείτε το πλαστό νόμισμα.

Ο παρακάτω πίνακας δίνει την απάντηση:



Πιο δύσκολο πρόβλημα: Δίνονται εννιά όμοια νομίσματα έτσι ώστε οκτώ απ' αυτά είναι όμοια και το άλλο πλαστό, που ζυγίζει περισσότερο. Να βρείτε το πλαστό νόμισμα με δυο ζυγίσματα. Με την παρακάτω μέτρηση, ανάγουμε το πρόβλημα να βρούμε σε μια μέτρηση το πλαστό νόμισμα.



Εδώ παρατηρούμε ένα μοτίβο:

- ❶ Εάν δεν κάνουμε καμία μέτρηση, τότε μπορούμε να βρούμε το πλαστό από μια συλλογή ενός νομίσματος, γιατί γνωρίζουμε ότι υπάρχει ένα πλαστό.
- ❷ Εάν κάνουμε μια μέτρηση, τότε μπορούμε να βρούμε το πλαστό από μια συλλογή τριών νομισμάτων.
- ❸ Εάν κάνουμε δυο μετρήσεις, τότε μπορούμε να βρούμε το πλαστό από μια συλλογή εννιά νομισμάτων.

Παρατηρούμε ότι $3^0 = 1$, $3^1 = 3$, $3^2 = 9$.

Να δείξετε ότι με n μετρήσεις μπορούμε να βρούμε το πλαστό από μια συλλογή 3^n νομισμάτων.

Θα αποδείξουμε την πρόταση με μαθηματική επαγωγή. Η πρόταση ισχύει για $n = 0$, όπως ήδη παρατηρήσαμε. Υποθέτουμε ότι η πρόταση ισχύει για k .

Πιο συγκεκριμένα, υποθέτουμε ότι με $n = k$ μετρήσεις μπορούμε να βρούμε το πλαστό νόμισμα από μια συλλογή 3^k νομισμάτων. Θα δείξουμε την πρόταση για $n = k + 1$.

Χωρίζουμε την συλλογή των 3^{k+1} νομισμάτων σε τρεις ομάδες των 3^k νομισμάτων. Τις ομάδες αυτές τις ονομάζουμε A , B και C . Τοποθετούμε τα νομίσματα των A και B στην ζυγαριά. Τότε διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις:

- 1 Η A είναι βαρύτερη, οπότε το πλαστό βρίσκεται στην A .
- 2 Η B είναι βαρύτερη, οπότε το πλαστό βρίσκεται στην B .
- 3 Οι A και B έχουν το ίδιο βάρος. Τότε το πλαστό είναι στην C .

Σε κάθε περίπτωση το πλαστό βρίσκεται σε μια συλλογή 3^k νομισμάτων. Από την υπόθεση της επαγωγής, με k μετρήσεις μπορούμε να βρούμε το πλαστό.

Με την αρχική μέτρηση, συνολικά κάναμε $k + 1$ μετρήσεις, αποδεικνύοντας την πρόταση.

(5) Όλα τα αυτοκίνητα έχουν το ίδιο χρώμα (**βρείτε το λάθος**).

Θα χρησιμοποιήσουμε μαθηματική επαγωγή. Για $n = 1$ προφανώς ισχύει. Υποθέτουμε σε κάθε συλλογή k αυτοκινήτων, όλα τα αυτοκίνητα έχουν το ίδιο χρώμα.

Θα δείξουμε ότι σε κάθε συλλογή $k + 1$ αυτοκινήτων, όλα τα αυτοκίνητα έχουν το ίδιο χρώμα. Παίρνουμε μια συλλογή $k + 1$ αυτοκινήτων. Από την υπόθεση τα πρώτα k αυτοκίνητα έχουν το ίδιο χρώμα και τα τελευταία k αυτοκίνητα έχουν το ίδιο χρώμα.

Άρα όλα τα αυτοκίνητα έχουν το ίδιο χρώμα.

Παραδείγματα Επαγωγής-2

(1) Να δείξετε ότι

$$1 + 2 + \dots + n = \frac{n(n+1)}{2}, n \geq 1.$$

Πρώτα το ελέγχουμε εμπειρικά:

$$1 + 2 = 3 = \frac{2 \cdot 3}{2}$$

$$1 + 2 + 3 = 6 = \frac{3 \cdot 4}{2}$$

$$1 + 2 + 3 + 4 = 10 = \frac{4 \cdot 5}{2} \text{ (Αγία Τετράκτυς)}$$

$$1 + 2 + 3 + 4 + 5 = 15 = \frac{5 \cdot 6}{2}$$

Ελέγχουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = 1$:

$$1 = \frac{1 \cdot 2}{2} = 1.$$

Υποθέτουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = m \geq 1$. Δηλαδή υποθέτουμε ότι

$$1 + 2 + \cdots + m = \frac{m(m+1)}{2}.$$

Θα δείξουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = m + 1$. Δηλαδή θα δείξουμε ότι

$$1 + 2 + \cdots + m + (m+1) = \frac{(m+1)(m+2)}{2}.$$

Απλά χρησιμοποιούμε την υπόθεση:

$$(1 + 2 + \cdots + m) + (m+1) = \frac{m(m+1)}{2} + m+1 = \frac{m(m+1) + 2(m+1)}{2} = \frac{(m+1)(m+2)}{2}.$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί ναδειχτεί χωρίς την χρήση της Μαθηματικής Επαγωγής, πολύ απλά. Η μέθοδος αυτή επινοήθηκε από τον Gauss όταν ήταν μαθητής δημοτικού. Το πρόβλημα που έβαλε ο δάσκαλος στους μαθητές τους ήταν οι μαθητές να βρουν το άθροισμα

$$1 + 2 + \dots + 100.$$

Ο δάσκαλος παρατήρησε ότι ο Gauss τελείωσε πολύ γρήγορα. Ο Gauss παρατήρησε ότι

$$1 + 100 = 2 + 99 = 3 + 98 = \dots = 50 + 51 = 101.$$

και έχουμε 50 τέτοια ζευγάρια. Άρα το άθροισμα είναι

$$101 \cdot 50 = 5050.$$

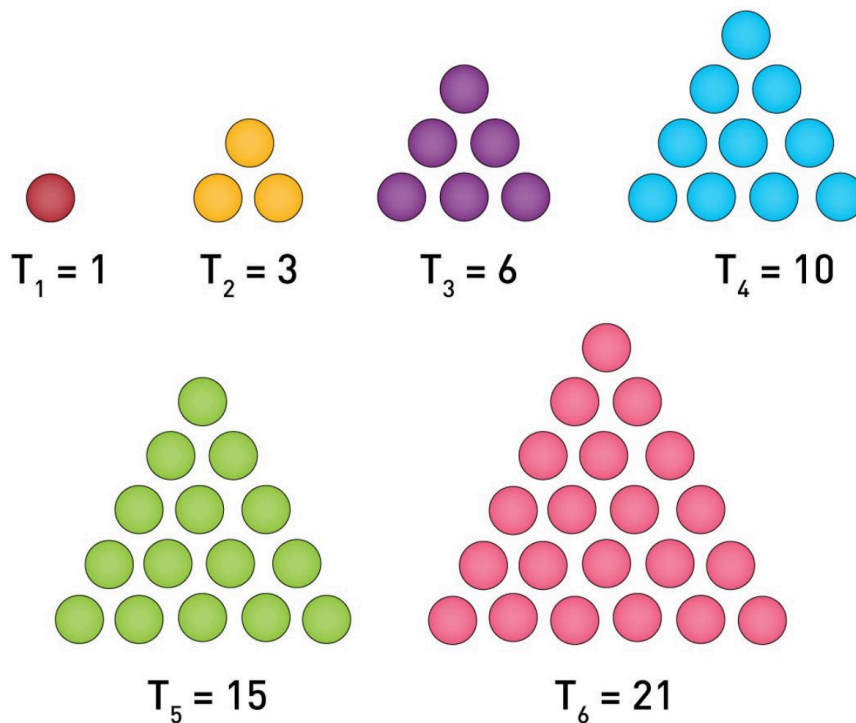
Θα εφαρμόσουμε το παραπάνω πιο συστηματικά. Έστω

$$S_n = 1 + 2 + \cdots + n.$$

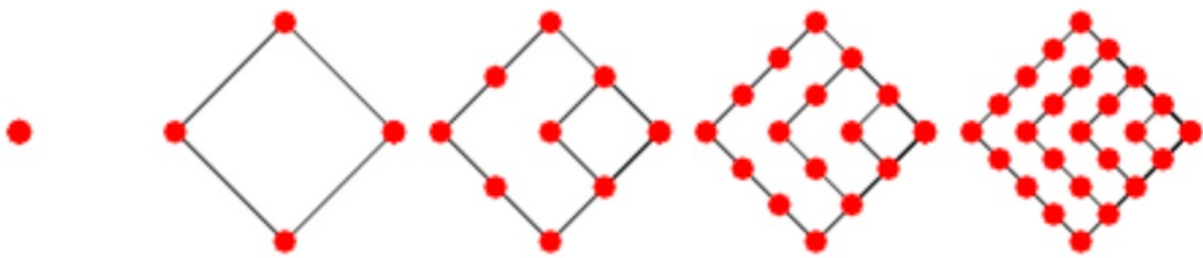
Γράφουμε το S με δυο τρόπους και προσθέτουμε

$$\begin{array}{r} S_n = 1 + 2 + \cdots + n \\ S_n = n + (n-1) + \cdots + 1 \\ \hline 2S_n = (n+1) + (n+1) + \cdots + (n+1) = n(n+1) \Rightarrow S_n = \frac{n(n+1)}{2} \end{array}$$

Οι αριθμοί S_n ονομάζονται **τριγωνικοί** γιατί μπορούν να κατανεμηθούν σε τρίγωνο:



Συνεχίζοντας αυτήν ορολογία, ορίζουμε τους **τετραγωνικούς αριθμούς**, ως αριθμούς που μπορούν να αναπαρασταθούν σε τετράγωνα:



Παρατηρούμε ότι οι αριθμοί αυτοί είναι τέλεια τετράγωνα ακεραίων:

1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121, 144, 169, ...

Θέτουμε $Q_n = n^2$ για τον n -οστό τετράγωνο αριθμό. Παρατηρούμε

$$Q_{n+1} - Q_n = (n+1)^2 - n^2 = \cancel{n^2} + 2n + 1 - \cancel{n^2} = 2n + 1.$$

Ξεκινάμε με το επόμενο σχήμα:



Παρατηρούμε ότι

- ❶ Ο συνολικός αριθμός των τριγώνων είναι n^2 .
- ❷ Ο αριθμός των πράσινων τριγώνων είναι

1, 3, 6, 10, 15, 21

δηλαδή S_n .

- ❸ Ο αριθμός των άσπρων τριγώνων είναι

0, 1, 3, 6, 10

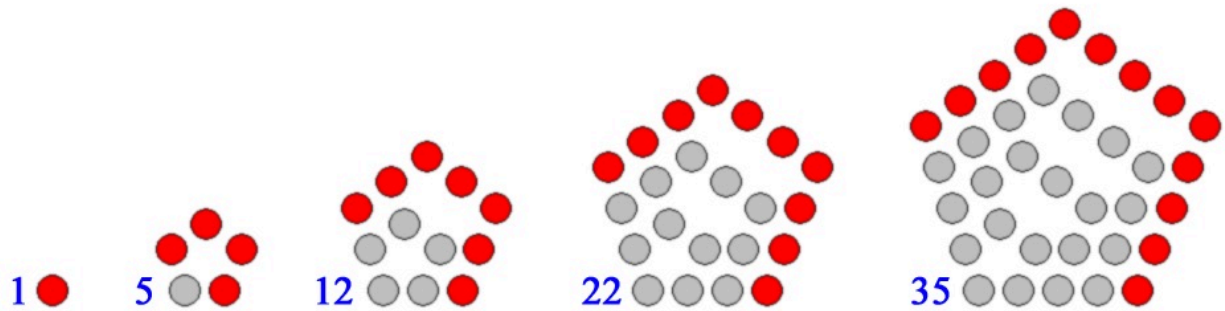
δηλαδή S_{n-1} .

Άρα $S_n + S_{n-1} = n^2$.

Θα αποδείξουμε την παραπάνω σχέση:

$$\begin{aligned} S_n + S_{n-1} &= \frac{n(n+1)}{2} + \frac{(n-1)n}{2} = \frac{n(n+1) + (n-1)n}{2} \\ &= \frac{n^2 + n + n^2 - n}{2} = \frac{2n^2}{2} = n^2 \end{aligned}$$

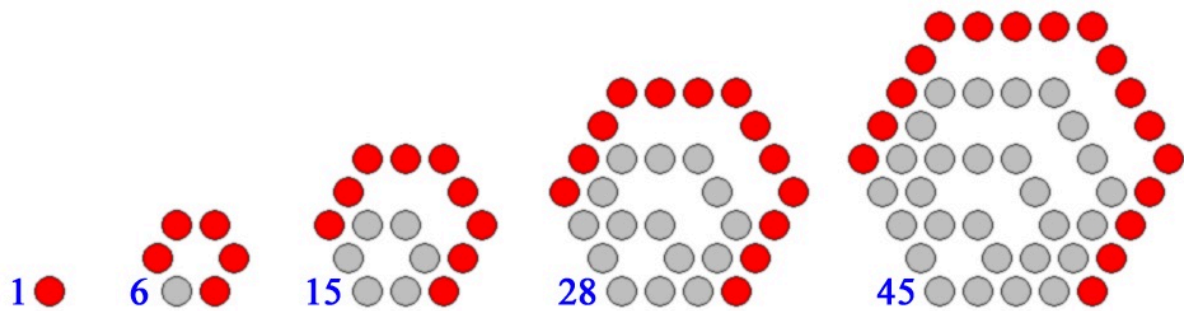
Επίσης υπάρχουν πεντάγωνοι αριθμοί:



με γενική φόρμουλα

$$P_n = \frac{3n^2 - n}{2}.$$

και εξάγωνοι



με γενική φόρμουλα:

$$H_n = 2n^2 - n$$

Γενικά, μπορούμε να ορίσουμε s -γωνικούς αριθμούς αν μπορούν να αναπαρασταθούν σε ένα κανονικό s -γωνο. Ο τύπος για τον n -οστο τέτοιο αριθμό δίνεται:

$$P(s, n) = \frac{(s-2)n^2 - (s-4)n}{2} = (s-2)\frac{n(n-1)}{2} + n.$$

Για $n = 3$:

$$P(3, n) = \frac{n^2 + n}{2} = \frac{n(n+1)}{2} = T_n.$$

(2) Να δείξετε ότι

$$1^2 + 2^2 + \dots + n^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}, n \geq 1.$$

Πρώτα το ελέγχουμε εμπειρικά:

$$1^2 + 2^2 = 5 = \frac{2 \cdot 3 \cdot 5}{6}$$

$$1^2 + 2^2 + 3^2 = 14 = \frac{3 \cdot 4 \cdot 7}{6}$$

$$1^2 + 2^2 + 3^2 + 4^2 = 30 = \frac{4 \cdot 5 \cdot 9}{6}$$

$$1^2 + 2^2 + 3^2 + 4^2 + 5^2 = 55 = \frac{5 \cdot 6 \cdot 11}{6}$$

Ελέγχουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = 1$:

$$1 = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3}{6} = 1.$$

Υποθέτουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = m \geq 1$. Δηλαδή υποθέτουμε ότι

$$1^2 + 2^2 + \dots + m^2 = \frac{m(m+1)(2m+1)}{6}.$$

Θα δείξουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = m + 1$. Δηλαδή θα δείξουμε ότι

$$1^2 + 2^2 + \dots + m^2 + (m + 1)^2 = \frac{(m + 1)(m + 2)(2(m + 1) + 1)}{6} = \frac{(m + 1)(m + 2)(2m + 3)}{6}.$$

Απλά χρησιμοποιούμε την υπόθεση:

$$\begin{aligned} (1^2 + 2^2 + \dots + m^2) + (m + 1)^2 &= \frac{m(m + 1)(2m + 1)}{6} + (m + 1)^2 \\ &= \frac{m(m + 1)(2m + 1) + 6(m + 1)^2}{6} \\ &= \frac{(m + 1)[m(2m + 1) + 6(m + 1)]}{6} \\ &= \frac{(m + 1)(2m^2 + m + 6m + 6)}{6} \\ &= \frac{(m + 1)(2m^2 + 7m + 6)}{6} \end{aligned}$$

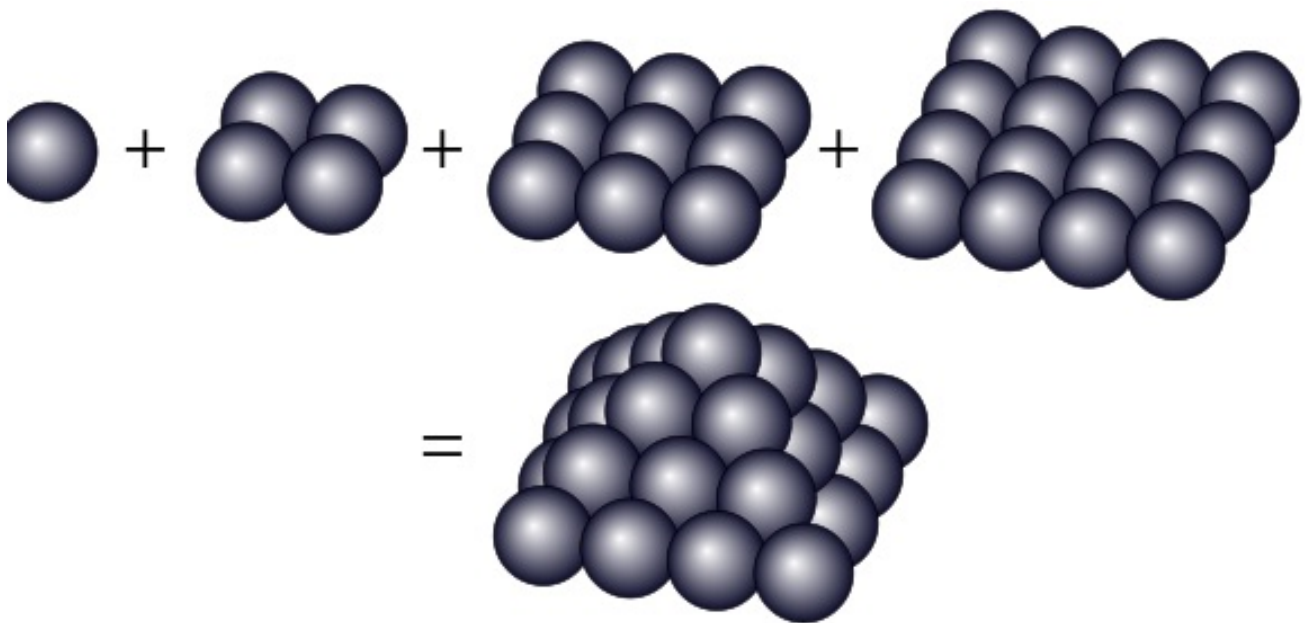
Παρατηρούμε ότι

$$(m + 2)(2m + 3) = 2m^2 + 3m + 4m + 6 = 2m^2 + 7m + 6.$$

Συνοψίζοντας

$$1^2 + 2^2 + \dots + m^2 + (m + 1)^2 = \frac{(m + 1)(m + 2)(2m + 3)}{6}$$

Παραστατικά:



Γι' αυτό αυτοί οι αριθμοί ονομάζονται **τετράγωνοι πυραμοειδείς αριθμοί**.

(3) Να δείξετε ότι

$$1^3 + 2^3 + \dots + n^3 = \frac{n^2(n+1)^2}{4} = \left(\frac{n(n+1)}{2}\right)^2 = (1 + 2 + \dots + n)^2, n \geq 1.$$

Ελέγχουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = 1$:

$$1 = \frac{1 \cdot 2^2}{4} = 1.$$

Υποθέτουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = m \geq 1$. Δηλαδή υποθέτουμε ότι

$$1^3 + 2^3 + \dots + m^3 = \frac{m^2(m+1)^2}{4}.$$

Θα δείξουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = m + 1$. Δηλαδή θα δείξουμε ότι

$$1^3 + 2^3 + \dots + m^3 + (m + 1)^3 = \frac{(m + 1)^2(m + 2)^2}{4}.$$

Απλά χρησιμοποιούμε την υπόθεση:

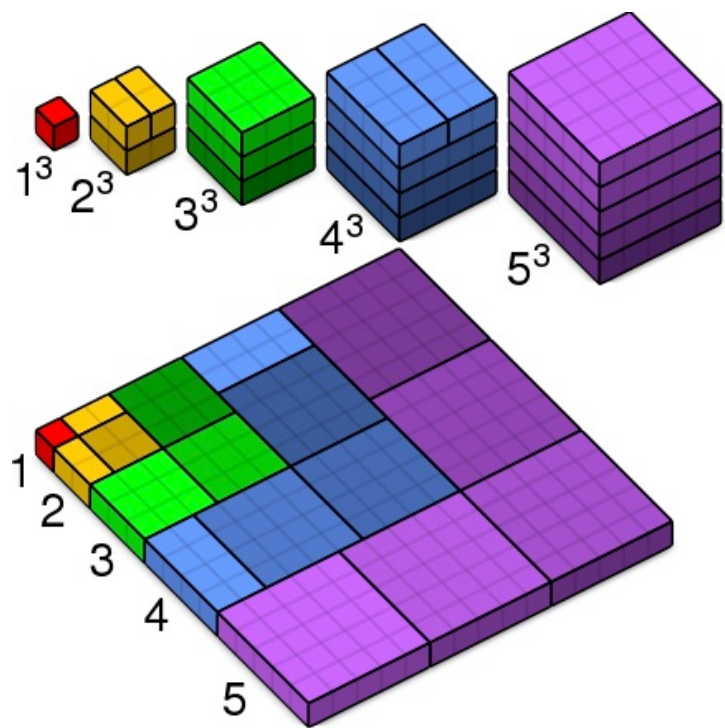
$$\begin{aligned}(1^3 + 2^3 + \dots + m^3) + (m + 1)^3 &= \frac{m^2(m + 1)^2}{4} + (m + 1)^3 \\ &= \frac{m^2(m + 1)^2 + 4(m + 1)^3}{4} \\ &= \frac{(m + 1)^2[m^2 + 4(m + 1)]}{4} \\ &= \frac{(m + 1)^2(m^2 + 4m + 4)}{4} \\ &= \frac{(m + 1)^2(m + 2)^2}{4}\end{aligned}$$

Χρησιμοποιούμε το διώνυμο του Νεύτωνα:

$$(m + 2)^2 = m^2 + 2 \cdot 2 \cdot m + 2^2 = m^2 + 4m + 4.$$

Οι υπόλοιπες ισότητες είναι συνέπεια του πρώτου παραδείγματος

Γεωμετρικά:

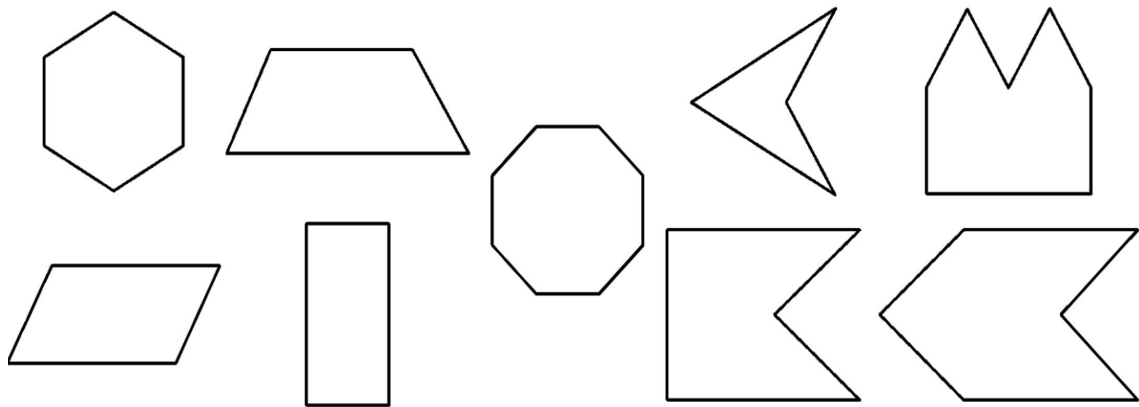


(4) Να δείξετε ότι ο αριθμός των διαγωνίων ενός κυρτού n -γώνου είναι $n(n - 3)/2$, για $n \geq 4$.

Διαγώνιος είναι το ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει μια κορυφή με μια μη-γειτονική κορυφή.

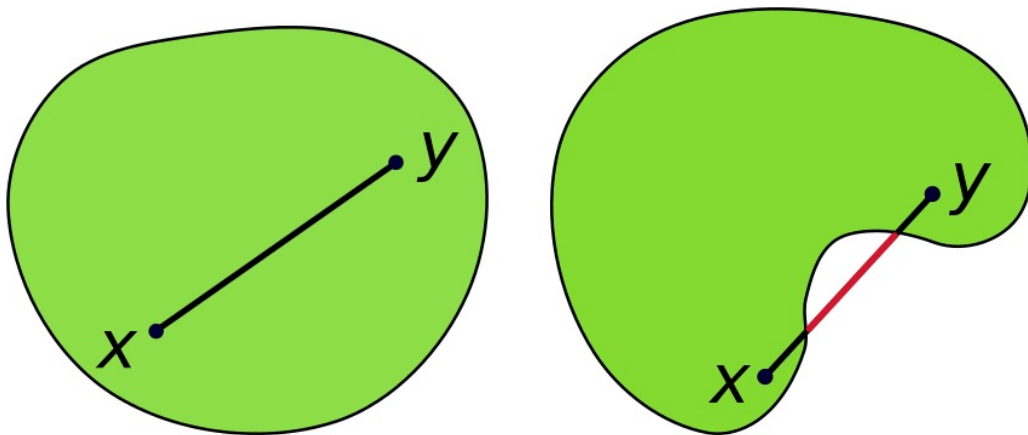
Ένα σχήμα (μια περιοχή) στο επίπεδο ή στον χώρο ονομάζεται **κυρτό** αν το ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει δυο σημεία του περιέχεται στο σχήμα.

Κάποια σχήματα

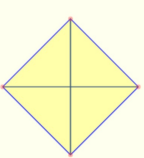
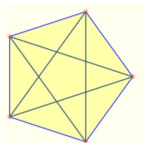
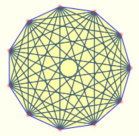
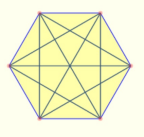
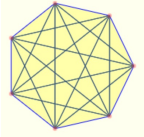
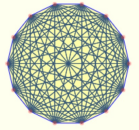
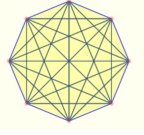
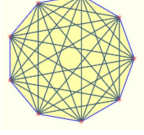
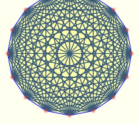


Τα πρώτα πέντε είναι κυρτά και τα άλλα τέσσερα δεν είναι

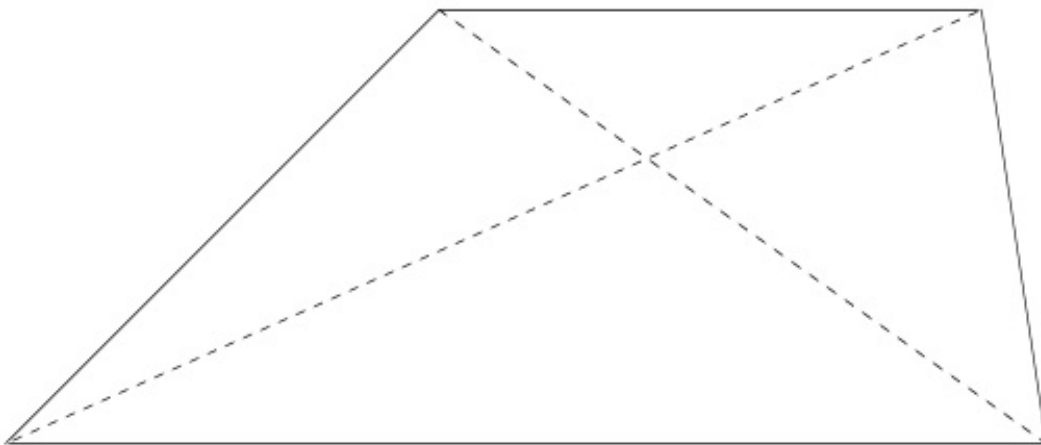
Και πιο παραστατικά:



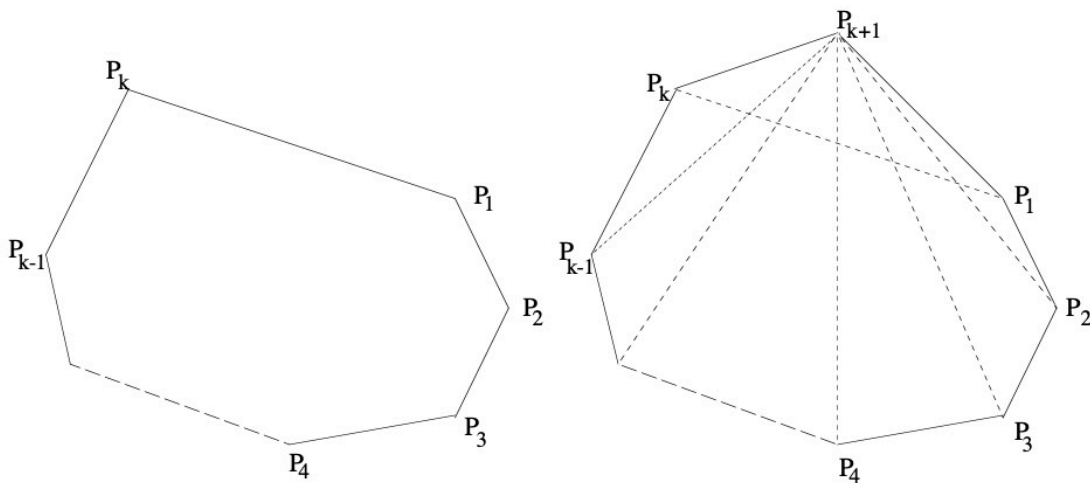
Πρώτα να δούμε κάποια παραδείγματα.

	2		5		44
	9		14		77
	20		27		104

Ελέγχουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = 4$. Τότε, έχουμε δυο διαγώνιους. Αλλά και $4(4 - 3)/2 = 2$ και η πρόταση ισχύει.



Υποθέτουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = k \geq 4$, δηλαδή υποθέτουμε ότι ένα κυρτό k -γώνο έχει $k(k - 3)/2$ διαγώνιους. Θα δείξουμε ότι ένα κυρτό $(k + 1)$ -γώνο έχει $(k + 1)(k - 2)/2$ διαγώνιους.



Όταν προσθέσουμε μια ακόμη κορυφή σε ένα κυρτό k -γώνο, οι διαγώνιοι που είχαμε πριν παραμένουν. Από την υπόθεση έχουμε ήδη $k(k-3)/2$ διαγώνιους.

Επίσης, έχουμε τις διαγώνιους από την κορυφή P_{k+1} στις όλες τις κορυφές, εκτός των γειτονικών, P_1 και P_k , δηλαδή επιπλέον $(k-2)$ -διαγώνιους. Επίσης, το ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει το P_1 με το P_k , που ήταν πλευρά, τώρα είναι διαγώνιος. Άρα ο αριθμός των διαγώνιων συνολικά είναι:

$$\frac{k(k-3)}{2} + k - 2 + 1 = \frac{k^2 - 3k}{2} + k - 1 = \frac{k^2 - 3k + 2k - 2}{2} = \frac{k^2 - k - 2}{2} = \frac{(k+1)(k-2)}{2}.$$

(5) Δείξτε ότι $n^2 \geq 2n + 1$, $n \geq 3$.

Παρατηρούμε ότι η αριστερή πλευρά είναι εκθετική ως προς το n και η δεξιά γραμμική. Σε γενικές γραμμές, εκθετικές συναρτήσεις είναι μεγαλύτερες των γραμμικών, για **μεγάλες τιμές** του n .

Παρατηρούμε ότι η υπόθεση $n \geq 3$ είναι απαραίτητη:

$$n = 0 : 0 < 1.$$

$$n = 1 : 1 < 3.$$

$$n = 2 : 4 < 5.$$

Ελέγχουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = 3$, $3^2 = 9 > 7 = 2 \cdot 3 + 1$.

Υποθέτουμε ότι ισχύει για $n = k$. Δηλαδή $k^2 \geq 2k + 1$, όπου $k \geq 3$.

Θα δείξουμε ότι $(k + 1)^2 \geq 2(k + 1) + 1 = 2k + 3$. Ξεκινάμε αναλύοντας την αριστερή πλευρά της σχέσης:

$$(k + 1)^2 = k^2 + 2k + 1 > 2k + 1 + 2k + 1 = 2(k + 1) + 2k > 2(k + 1) + 1,$$

γιατί $2k \geq 6 > 1$.

(6) Να δείξετε ότι

$$n^2 \leq 2^n, \quad n \geq 4.$$

Σ' αυτήν την περίπτωση, παρατηρούμε ότι η αριστερή πλευρά είναι δυνάμεις του n ενώ η δεξιά πλευρά είναι δύναμη κάποιου σταθερού αριθμού. Και πάλι, για μεγάλες δυνάμεις, η αριστερή πλευρά γίνεται μικρότερη από την δεξιά:

$$n = 0 : 0 < 1.$$

$$n = 1 : 1 < 2.$$

$$n = 2 : 4 = 4.$$

$$n = 3 : 9 > 8.$$

$$n = 4 : 16 = 16.$$

$$n = 5 : 25 < 32$$

Γι' αυτό ξεκινάμε από το $n \geq 4$.

Ελέγχουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = 4$, γιατί η σχέση ξεκινάει από το 4:

$$4^2 = 16 = 2^4.$$

Υποθέτουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = k \geq 4$. Δηλαδή υποθέτουμε ότι $k^2 \leq 2^k$.

Θα δείξουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = k + 1$. Δηλαδή θα δείξουμε ότι $(k + 1)^2 \leq 2^{k+1}$. Οπότε

$$2^{k+1} = 2 \cdot 2^k \geq 2k^2 = k^2 + k^2 \geq k^2 + 2k + 1 = (k + 1)^2.$$

Παρατηρήστε ότι χρησιμοποιήσαμε το προηγούμενο παράδειγμα στο τέταρτο βήμα.

(7) Δείξτε ότι $(2n)!(n+1) > 4^n(n!)^2$ για $n > 1$.

(Υπενθυμίζουμε ότι $n! = 1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot n$).

Η σχέση αυτή είναι πιο πολύπλοκη. Απλά, τα παραγωγικά μεγαλώνουν πολύ γρήγορα σε σχέση με τις δυνάμεις.

$$n = 0 : 1 = 1.$$

$$n = 1 : 2 \cdot 2 = 4 \cdot 1.$$

$$n = 2 : 4! \cdot 3 = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 3 = 72 > 4^2 \cdot (2!)^2 = 16 \cdot 4 = 64.$$

Για $n = 3$, ας συγκρίνουμε το $6! \cdot 4 = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 4$ και το $4^3 \cdot (3!)^2 = 4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3$ χωρίς την χρήση υπολογιστών:

$$1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 4 \sim 4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3.$$

και τελικά η αριστερή πλευρά είναι μεγαλύτερη της δεξιάς.

Ελέγχουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = 2$, $4! \cdot 3 = 72 > 4^2 \cdot (2!)^2 = 64$.

Υποθέτουμε ότι ισχύει για $n = k$, $(2k)!(k+1) > 4^k(k!)^2$.

Θα δείξουμε ότι ισχύει για $n = k + 1$ δηλαδή $(2k+2)!(k+2) > 4^{k+1}((k+1)!)^2$. Ξεκινάμε από την αριστερή πλευρά της σχέσης προσπαθούμε να την μετασχηματίσουμε ώστε να χρησιμοποιήσουμε την υπόθεση της επαγωγής:

$$(2k+2)!(k+2) = (2k)!(2k+1)(2k+2)(k+2) = (2k)!(2k+1)2(k+1)(k+2)$$

Εφαρμόζοντας την υπόθεση της επαγωγής,

$$(2k+2)!(k+2) > 2(2k+1)(k+2)4^k(k!)^2$$

Για να ολοκληρώσουμε την απόδειξη, αρκεί να δείξουμε ότι το δεξί μέρος της παραπάνω σχέσης είναι μεγαλύτερο του δεξιού μέρους της αρχικής σχέσης

$$2(2k+1)(k+2)4^k(k!)^2 > 4^{k+1}((k+1)!)^2$$

Άρα

$$\begin{aligned} 2(2k+1)(k+2)4^k(k!)^2 &> 4^{k+1}((k+1)!)^2 = 4 \cdot 4^k(k!)^2(k+1)^2 \Leftrightarrow (2k+1)(k+2) > 2(k+1)^2 \\ \Leftrightarrow 2k^2 + 4k + k + 2 &> 2k^2 + 4k + 2 \Leftrightarrow 5k > 4k. \end{aligned}$$

Η τελευταία σχέση προφανώς ισχύει για $k \geq 2$.

(8) Να δείξετε ότι $n! > 3^n$, $n \geq 7$.

Η ιδέα και πάλι είναι ότι, γενικά, τα παραγοντικά είναι μεγαλύτερα από τις δυνάμεις σταθερού αριθμού γιατί στα παραγοντικά πολλαπλασιάζουμε με αριθμούς που αυξάνουν ενώ στις δυνάμεις πολλαπλασιάζουμε με έναν σταθερό αριθμό.

Αρχικά ελέγχουμε κάποιες τιμές:

$$n = 0 : 1 = 1, \quad n = 1 : 1 < 3, \quad n = 2 : 2 < 9 \quad n = 3 : 1.2.3 = 6 < 3.3.3 = 27.$$

$$n = 4 : 1.2.3.4 = 24 < 3.3.3.3 = 81, \quad n = 5 : 1.2.3.4.5 = 120 < 3.3.3.3.3 = 243.$$

$n = 6 : 1.2.3.4.5.6 = 720 < 3.3.3.3.3.3 = 729$ $n = 7 : 1.2.3.4.5.6.7 = 5040 > 2187$. Από δω και πέρα, η ανισότητα διατηρείται γιατί στο επόμενο βήμα, πολλαπλασιάζουμε την αριστερή πλευρά με έναν αριθμό μεγαλύτερο του 3 και την δεξιά επί 3.

Ελέγχουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = 7$, κάτι που το κάναμε ήδη:

$$7! = 1.2.3.4..5.6.7 = 5040 > 2187 = 3^7.$$

Υποθέτουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = m \geq 7$, δηλαδή $m! > 3^m$. Θα δείξουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = m + 1$. Δηλαδή θα δείξουμε ότι $(m + 1)! > 3^{m+1}$.

Υπολογίζουμε

$$(m + 1)! = (m + 1).m! > (m + 1)3^m > 3.3^m = 3^{m+1}$$

κι αυτό γιατί $m > 7$ και επομένως $m + 1 > 3$.

(9) Μπορεί ναδειχτεί ότι $(2 + \sqrt{3})^n$ μπορεί να γραφτεί ως $a_n + b_n\sqrt{3}$, $a_n, b_n \in \mathbb{N}$. Να δείξετε ότι ισχύει $a_n^2 - 3b_n^2 = 1$.

Αυτή η σχέση βγαίνει ουσιαστικά από την ανάπτυξη της δεξιάς πλευράς, κάνοντας όλους τους πολλαπλασιασμούς και χρησιμοποιώντας ότι $(\sqrt{3})^2 = 3$.

Και πάλι ας κάνουμε κάποιους υπολογισμούς για να δούμε πως δουλεύει η διαδικασία:

$$n = 0 : (2 + \sqrt{3})^0 = 1 \Rightarrow a_0 = 1, b_0 = 0 \Rightarrow 1^2 + 0^2 = 1.$$

$$n = 1 : (2 + \sqrt{3})^1 = 2 + \sqrt{3} \Rightarrow a_1 = 2, b_1 = 1 \Rightarrow 2^2 - 3 \cdot 1^2 = 1.$$

$$n = 2 : (2 + \sqrt{3})^2 = 2^2 + 2 \cdot 2 \cdot \sqrt{3} + (\sqrt{3})^2 = 4 + 4\sqrt{3} + 3 = 7 + 4\sqrt{3} \Rightarrow \\ a_2 = 7, b_2 = 4 \Rightarrow 7^2 - 3 \cdot 4^2 = 49 - 3 \cdot 16 = 1.$$

$$n = 3 : (2 + \sqrt{3})^3 = 2^3 + 3 \cdot 2^2 \cdot \sqrt{3} + 3 \cdot 2 \cdot (\sqrt{3})^2 + (\sqrt{3})^3 = 8 + 12\sqrt{3} + 3 \cdot 2 \cdot 3 + 3\sqrt{3} = \\ 26 + 15\sqrt{3} \Rightarrow a_3 = 26, b_3 = 15 \Rightarrow 26^2 - 3 \cdot 15^2 = 676 - 3 \cdot 225 = 1.$$

Παρατηρούμε ότι $(\sqrt{3})^3 = \sqrt{3} \cdot (\sqrt{3})^2 = 3\sqrt{3}$.

Μπορούμε να κάνουμε τους υπολογισμούς διαφορετικά για $n = 3$:

$$\begin{aligned}(2 + \sqrt{3})^3 &= (2 + \sqrt{3})^2(2 + \sqrt{3}) = (7 + 4\sqrt{3})(2 + \sqrt{3}) \\ &= 14 + 7\sqrt{3} + 8\sqrt{3} + 4 \cdot 3 = 26 + 15\sqrt{3}.\end{aligned}$$

όπως παραπάνω.

Ελέγχουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = 0$. Σ' αυτήν την περίπτωση $a_0 = 1$, $b_0 = 0$. Οπότε

$$a_0^2 - 3b_0^2 = 1^2 - 3 \cdot 0^2 = 1,$$

οπότε ισχύει. Υποθέτουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = m \geq 1$. Δηλαδή υποθέτουμε ότι

$$(2 + \sqrt{3})^m = a_m + b_m\sqrt{3}, \quad a_m^2 - 3b_m^2 = 1.$$

Θα δείξουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = m + 1$. Δηλαδή θα δείξουμε ότι $a_{m+1}^2 - 3b_{m+1}^2 = 1$.

Χρησιμοποιούμε την υπόθεση:

$$\begin{aligned}(2 + \sqrt{3})^{m+1} &= (2 + \sqrt{3})(2 + \sqrt{3})^m = (2 + \sqrt{3})(a_m + b_m\sqrt{3}) \\ &= 2a_m + 2b_m\sqrt{3} + a_m\sqrt{3} + 3b_m \\ &= (2a_m + 3b_m) + (a_m + 2b_m)\sqrt{3}.\end{aligned}$$

Άρα, $a_{m+1} = 2a_m + 3b_m$ και $b_{m+1} = a_m + 2b_m$. Τότε

$$\begin{aligned}a_{m+1}^2 - 3b_{m+1}^2 &= (2a_m + 3b_m)^2 - 3(a_m + 2b_m)^2 \\ &= 4a_m^2 + 12a_mb_m + 9b_m^2 - 3(a_m^2 + 4a_mb_m + 4b_m^2) \\ &= 4a_m^2 + \cancel{12a_mb_m} + 9b_m^2 - 3a_m^2 - \cancel{12a_mb_m} - 12b_m^2 \\ &= a_m^2 - 3b_m^2 = 1.\end{aligned}$$

(10) (Ανισότητα του Bernoulli) Δείξτε ότι $(1 + x)^n \geq 1 + nx$ για $n \geq 1$ και $x \geq -1$.

Αν ελέγξουμε την σχέση για κάποιες τιμές του x :

$x = -1$: $0 \geq 1 - n$, που ισχύει για κάθε $n \geq 1$.

$x = 0$: $1^n \geq 1$.

$x = 1$: $2^n \geq 1 + n$, που ισχύει για κάθε $n \geq 1$, γιατί η αριστερή πλευρά είναι εκθετική και η δεξιά γραμμική.

$x = 2$: $3^n \geq 1 + 2n$, που ισχύει για κάθε $n \geq 1$, γιατί η αριστερή πλευρά είναι εκθετική και η δεξιά γραμμική, όπως και πριν.

Τώρα ελέγχουμε ως προς τις τιμές του n :

$n = 1$: $1 + x \geq 1 + x$, προφανές.

$n = 2$: $(1 + x)^2 = \cancel{1 + 2x} + x^2 \geq \cancel{1 + 2x}$, προφανές γιατί $x^2 \geq 0$, για κάθε x .

$n = 3$: $(1 + x)^3 = \cancel{1 + 3x} + 3x^2 + x^3 \geq \cancel{1 + 3x}$. Για να δούμε ότι ισχύει, πρέπει να δείξουμε ότι

$$0 \leq 3x^2 + x^3 = x^2(3 + x)$$

Το $x^2 \geq 0$ και $3 + x > 0$ γιατί $x \geq -1 \Rightarrow 3 + x \geq 3 - 1 = 2 > 0$.

Ελέγχουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = 1$, $1 + x = 1 + x$. Υποθέτουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = k$, δηλαδή $(1 + x)^k \geq 1 + kx$, για $x \geq -1$. Θα δείξουμε $(1 + x)^{k+1} \geq 1 + (k + 1)x$.

$$(1 + x)^{k+1} = (1 + x) \underbrace{(1 + x)^k \geq (1 + kx)}_{\text{από την υπόθεση}} (1 + x) = 1 + kx + x + kx^2 \geq 1 + (k + 1)x$$

Κι αυτό γιατί $kx^2 \geq 0$.

Είναι μια ενδιαφέρουσα ανισότητα. Για παράδειγμα:

- $\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \geq 1 + n \cdot \frac{1}{n} = 2.$

- $\left(1 + \frac{1}{n+1}\right)^n \geq 1 + n \cdot \frac{1}{n+1} = \frac{n+1}{n+1} + \frac{n}{n+1} = \frac{2n+1}{n+1}.$

(11) Δείξτε ότι ένα σύνολο με n στοιχεία έχει 2^n υποσύνολα.

Και πάλι ας κάνουμε κάποια παραδείγματα:

$n = 0$: Το σύνολο με κανένα στοιχείο είναι το κενό \emptyset και έχει ένα υποσύνολο, τον εαυτό του.

$n = 1$: Το σύνολο έχει ένα στοιχείο $S = \{a\}$ και έχει δυο υποσύνολο, το \emptyset και το $\{a\}$.

$n = 2$: Το σύνολο έχει δυο στοιχεία $S = \{a, b\}$ και έχει τα εξής υποσύνολα:

$$\emptyset, \{a\}, \{b\}, \{a, b\} = S.$$

$n = 3$: Το σύνολο έχει δυο στοιχεία $S = \{a, b, c\}$ και έχει τα εξής υποσύνολα:

$$\emptyset, \{a\}, \{b\}, \{c\}, \{a, b\}, \{a, c\}, \{b, c\}, \{a, b, c\} = S.$$

$n = 4$: Το σύνολο έχει δυο στοιχεία $S = \{a, b, c, d\}$ και έχει τα εξής υποσύνολα:

$$\emptyset, \{a\}, \{b\}, \{c\}, \{d\}, \{a, b\}, \{a, c\}, \{a, d\}, \{b, c\}, \{b, d\}, \{c, d\}, \\ \{a, b, c\}, \{a, b, d\}, \{a, c, d\}, \{b, c, d\}, \{a, b, c, d\} = S.$$

Παρατηρούμε κάποιο μοτίβο στην παραπάνω κατασκευή:

- Πάντα εμφανίζονται το \emptyset και το σύνολο S .
- Τα υποσύνολα ενός συνόλου είναι επίσης και υποσύνολα κάθε υπερσυνόλου του.
- Μπορούμε να κατασκευάσουμε τα υποσύνολα ενός συνόλου προσθέτοντας στοιχεία στα υποσύνολα υποσυνόλων του.
- Παρατηρούμε ότι ο αριθμός υποσυνόλων εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των στοιχείων και όχι από την φύση τους.

Ελέγχουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = 0$. Σ' αυτήν την περίπτωση το σύνολο είναι κενό και έχει ένα υποσύνολο, τον εαυτό. Άρα η σχέση ισχύει. Έστω ότι η πρόταση ισχύει για ένα σύνολο με k στοιχεία. Δηλαδή ένα τέτοιο σύνολο έχει 2^k υποσύνολα. Θα δείξουμε ότι ένα σύνολο με $k + 1$ -στοιχεία, $S = \{x_1, \dots, x_{k+1}\}$ έχει 2^{k+1} υποσύνολα.

Από την υπόθεση, το σύνολο $\{x_1, \dots, x_k\}$ έχει 2^k υποσύνολα. Για κάθε ένα απ' αυτά τα υποσύνολα, μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα ακόμη με την πρόσθεση του x_{k+1} σ' αυτό. Άρα έχουμε ακόμη 2^k υποσύνολα. Συνολικά λοιπόν έχουμε $2^k + 2^k = 2 \cdot 2^k = 2^{k+1}$ υποσύνολα.

Θα δώσουμε μια δεύτερη απόδειξη αυτού του παραδείγματος χρησιμοποιώντας το Διώνυμο του Νεύτωνα.

12) Για $n \geq 3$, να δείξετε ότι υπάρχουν n φυσικοί, όλοι διαφορετικοί, έτσι ώστε

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \dots + \frac{1}{a_n} = 1.$$

Για $n = 3$, έχουμε

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = 1.$$

$$\left(\frac{3}{2 \cdot 3} + \frac{2}{2 \cdot 3} + \frac{1}{6} = \frac{3}{6} + \frac{2}{6} + \frac{1}{6} = 1 \right).$$

Υποθέτουμε ότι η πρόταση ισχύει για $n = k$, δηλαδή υπάρχουν k φυσικοί, όλοι διαφορετικοί, έτσι ώστε

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \dots + \frac{1}{a_k} = 1.$$

Θα δείξουμε ότι ισχύει για $n = k + 1$, δηλαδή υπάρχουν $k + 1$ φυσικοί, όλοι διαφορετικοί, έτσι ώστε

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \dots + \frac{1}{a_{k+1}} = 1.$$

Ξεκινάμε με την υπόθεση, δηλαδή υπάρχουν k φυσικοί, όλοι διαφορετικοί, έτσι ώστε

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \dots + \frac{1}{a_k} = 1.$$

Διαιρούμε δια 2 την παραπάνω σχέση:

$$\frac{1}{2a_1} + \frac{1}{2a_2} + \dots + \frac{1}{2a_k} = \frac{1}{2}.$$

Τώρα προσθέτουμε το $1/2$ και στις δυο πλευρές της εξίσωσης

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2a_1} + \frac{1}{2a_2} + \dots + \frac{1}{2a_k} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1.$$

Παρατηρούμε

- Επειδή $a_i \neq a_j \Rightarrow 2a_i \neq 2a_j, i \neq j$.
- Επίσης, επειδή $a_i \neq 1, 2a_i \neq 2$, για όλα τα i .

Άρα έχουμε εκφράσει το 1 ως άθροισμα $k + 1$ κλασμάτων με αριθμητή 1.

(13) Να βρεθεί ο τύπος για το άθροισμα

$$S_n = 2 + 5 + \cdots + (3n - 1)$$

και να αποδειχθεί χρησιμοποιώντας μαθηματική επαγωγή.

Υπολογίζουμε το άθροισμα για κάποιες τιμές του n :

$$n = 1: S_1 = 2.$$

$$n = 2: S_2 = 2 + 5 = 7.$$

$$n = 3: S_3 = 2 + 5 + 8 = 15.$$

$$n = 4: S_4 = 2 + 5 + 8 + 11 = 26.$$

$$n = 5: S_5 = 2 + 5 + 8 + 11 + 14 = 40.$$

$$n = 6: S_6 = 2 + 5 + 8 + 11 + 14 + 17 = 57.$$

Θα συγκρίνουμε το άθροισμα με το άθροισμα $1 + 2 + \dots + n$. Έτσι υποθέτουμε ότι ο όρος $n/2$ θα βρίσκεται στο S_n . Έτσι υπολογίζουμε το $2/n \cdot S_n$:

$$\frac{2}{1}S_1 = 2, \quad \frac{2}{2}S_2 = 7, \quad \frac{2}{3}S_3 = 10, \quad \frac{2}{4}S_4 = 13, \quad \frac{2}{5}S_5 = 16, \quad \frac{2}{6}S_6 = 19.$$

$$\frac{2}{n}S_n = 3n + 1 \Rightarrow S_n = \frac{n(3n + 1)}{2}.$$

Θα αποδείξουμε τον τύπο χρησιμοποιώντας μαθηματική επαγωγή. Για $n = 1$

$$S_1 = 2 = \frac{1(3 \cdot 1 + 1)}{2}.$$

Υποθέτουμε ότι ισχύει για $n = k$, δηλαδή υποθέτουμε ότι

$$S_k = \frac{k(3k + 1)}{2}.$$

Θέλουμε να δείξουμε την εξίσωση για $n = k + 1$, δηλαδή

$$S_{k+1} = \frac{(k+1)(3(k+1) + 1)}{2} = \frac{(k+1)(3k + 3 + 1)}{2} = \frac{(k+1)(3k + 4)}{2}$$

Παρατηρούμε ότι

$$(k+1)(3k+4) = 3k^2 + 4k + 3k + 4 = 3k^2 + 7k + 4$$

Άρα αρκεί να δείξουμε ότι

$$S_{k+1} = \frac{3k^2 + 7k + 4}{2}.$$

Υπολογίζουμε, χρησιμοποιούμε την υπόθεση:

$$\begin{aligned} S_{k+1} &= S_k + (3(k+1) + 1) = S_k + (3k + 2) = \frac{k(3k+1)}{2} + 3k + 2 \\ &= \frac{k(3k+1) + 2(3k+2)}{2} = \frac{3k^2 + k + 6k + 4}{2} = \frac{3k^2 + 7k + 4}{2} \end{aligned}$$

ολοκληρώνοντας την απόδειξη.

(14) Να βρεθεί ο τύπος για το άθροισμα

$$P_n = 1 \cdot 2 + 2 \cdot 3 + \cdots + n \cdot (n + 1)$$

και να αποδειχθεί χρησιμοποιώντας μαθηματική επαγωγή.

Υπολογίζουμε το άθροισμα για κάποιες τιμές του n :

$$n = 1: P_1 = 2.$$

$$n = 2: P_2 = 2 + 6 = 8.$$

$$n = 3: P_3 = 2 + 6 + 12 = 20.$$

$$n = 4: P_4 = 2 + 6 + 12 + 20 = 40.$$

$$n = 5: P_5 = 2 + 6 + 12 + 20 + 30 = 70.$$

$$n = 6: P_6 = 2 + 6 + 12 + 20 + 30 + 42 = 112.$$

$$P_n = \frac{n(n+1)(n+2)}{3}.$$

Θα συγκρίνουμε το άθροισμα με το άθροισμα $1^2 + 2^2 + \dots + n^2$. Έτσι υποθέτουμε ότι ο όρος $n(n+1)/6$ θα βρίσκεται στο S_n . Έτσι υπολογίζουμε το $6/n(n+1) \cdot P_n$:

$$\frac{6}{1 \cdot 2} P_1 = 6, \quad \frac{6}{2 \cdot 3} P_2 = 8, \quad \frac{6}{3 \cdot 4} P_3 = 10, \quad \frac{6}{4 \cdot 5} P_4 = 12, \quad \frac{6}{5 \cdot 6} P_5 = 14, \quad \frac{6}{6 \cdot 7} P_6 = 16.$$

$$\frac{6}{n(n+1)} P_n = 2n + 4 \Rightarrow P_n = \frac{n(n+1)(2n+4)}{6} = \frac{n(n+1)(n+2)}{3}.$$

Θα αποδείξουμε τον τύπο χρησιμοποιώντας μαθηματική επαγωγή. Για $n = 1$

$$P_1 = 1 \cdot 2 \frac{1 \cdot 2 \cdot 3}{3}.$$

Υποθέτουμε ότι ισχύει για $n = k$, δηλαδή υποθέτουμε ότι

$$P_k = \frac{k(k+1)(k+2)}{3}.$$

Θέλουμε να δείξουμε την εξίσωση για $n = k + 1$, δηλαδή

$$P_{k+1} = \frac{(k+1)(k+2)(k+3)}{3}$$

Υπολογίζουμε, χρησιμοποιούμε την υπόθεση:

$$\begin{aligned} P_{k+1} &= P_k + (k+1)(k+2) = \frac{k(k+1)(k+2)}{3} + (k+1)(k+2) \\ &= \frac{k(k+1)(k+2) + 3(k+1)(k+2)}{3} = \frac{(k+1)(k+2)(k+3)}{3} \end{aligned}$$

ολοκληρώνοντας την απόδειξη.

(15) Να δείξετε ότι

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \cdots + \frac{1}{2^n} < 1, \quad n \geq 1.$$

Φυσικά ισχύει για $n = 1$ ($1/2 < 1$). Υποθέτουμε ότι ισχύει για $n = k$:

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \cdots + \frac{1}{2^k} < 1,$$

και θέλουμε να δείξουμε ότι ισχύει για $n = k + 1$, δηλαδή

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \cdots + \frac{1}{2^k} + \frac{1}{2^{k+1}} < 1.$$

Αν χρησιμοποιήσουμε την υπόθεση άμεσα έχουμε

$$\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \cdots + \frac{1}{2^k} \right) + \frac{1}{2^{k+1}} < 1 + \frac{1}{2^{k+1}}$$

που δεν οδηγεί πουθενά. Γι' αυτό θα χρησιμοποιήσουμε άλλη μέθοδο.

Αρχικά, κάνουμε κάποιες πράξεις:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \cdots + \frac{1}{2^k} + \frac{1}{2^{k+1}} &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \cdots + \frac{1}{2^k} \right) \\ &< \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot 1 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1, \end{aligned}$$

και η ανισότητα ισχύει από την υπόθεση.

(16) Εξετάστε αν ισχύει ο τύπος:

$$\sum_{i=1}^n i = \frac{1}{2} \left(n + \frac{1}{2} \right)^2 .$$

Υποθέτουμε ότι η σχέση ισχύει για $n = k$, δηλαδή:

$$\sum_{i=1}^k i = \frac{1}{2} \left(k + \frac{1}{2} \right)^2 .$$

Θα δείξουμε την σχέση για $n = k + 1$, δηλαδή

$$\sum_{i=1}^{k+1} i = \frac{1}{2} \left(k + 1 + \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(k + \frac{3}{2} \right)^2 = \frac{1}{2} \left(k^2 + 2 \cdot k \cdot \frac{3}{2} + \frac{9}{4} \right) = \frac{1}{2} \left(k^2 + 3k + \frac{9}{4} \right) .$$

και τελικά

$$\sum_{i=1}^{k+1} i = \frac{1}{2} \cdot \frac{4k^2 + 12k + 9}{4} = \frac{4k^2 + 12k + 9}{8} .$$

Χρησιμοποιούμε την υπόθεση:

$$\sum_{i=1}^{k+1} i = \sum_{i=1}^k i + k + 1 = \frac{1}{2} \left(k + \frac{1}{2} \right)^2 + k + 1.$$

Κάνουμε τις πράξεις:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left(k + \frac{1}{2} \right)^2 + k + 1 &= \frac{1}{2} \left(k^2 + 2 \cdot k \cdot \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \right) + k + 1 = \frac{k^2 + k}{2} + \frac{1}{8} + k + 1 \\ \frac{4k^2 + 4k}{8} + \frac{1}{8} + \frac{8k + 8}{8} &= \frac{4k^2 + 12k + 9}{8} \end{aligned}$$

ολοκληρώνοντας την απόδειξη.

ΒΡΕΙΤΕ ΤΟ ΛΑΘΟΣ

Δεν ισχύει για $n = 1$:

$$1 \neq \frac{9}{8}.$$

Το Διώνυμο του Νεύτωνα

Ήδη χρησιμοποιήσαμε τον διώνυμο του Νεύτωνα για $n = 2, 3$. Το διώνυμο μας δίνει το ανάπτυγμα του $(a + b)^n$ ως προς τις δυνάμεις του a και του b . Ειδικότερα ισχύει

$$(a + b)^n = \sum_{s=0}^n \binom{n}{s} a^{n-s} b^s, \quad C_s^n = \binom{n}{s} = \frac{n!}{(n-s)!s!} = \frac{n(n-1)\dots(n-s+1)}{s!}$$

Οι συντελεστές C_s^n δίνουν τον αριθμό των επιλογών s αντικειμένων από μια συλλογή n αντικειμένων, χωρίς επανάθεση και χωρίς να μας ενδιαφέρει η σειρά τους.

Θα το εξετάσουμε αυτό πιο αναλυτικά. Ξεκινάμε με μια συλλογή n αντικειμένων. Έχουμε n επιλογές για το πρώτο αντικείμενο, $n - 1$ επιλογές για το δεύτερο και $n - s + 1$ για το s αντικείμενο. Μ' αυτόν τον τρόπο επιλέξαμε s αντικείμενα αλλά με δεδομένη σειρά.

Η ερώτηση τώρα είναι με πόσους τρόπους μπορούμε να διατάξουμε s αντικείμενα. Και πάλι χρησιμοποιούμε τον ίδιο τρόπο. Για το πρώτο έχουμε s επιλογές, για το δεύτερο $s - 1$ επιλογές, και τελικά για το τελευταίο 1 επιλογή. Δηλαδή έχουμε $s(s - 1) \dots 1 = s!$ επιλογές.

Άρα τελικά έχουμε

$$\frac{n(n-1)\dots(n-s+1)}{s!} = \frac{n!}{(n-s)!s!} = \binom{n}{s} = C_s^n.$$

Κάποιες βασικές ιδιότητες τους είναι:

- 1 $C_0^n = 1 = C_n^n$. Κι αυτό γιατί υπάρχει μόνο ένας τρόπος να επιλέξουμε 0 ή n αντικείμενα από μια συλλογή n αντικειμένων.
- 2 $C_s^n = C_{n-s}^n$. Αυτό ισχύει γιατί η επιλογή s αντικειμένων ισοδυναμεί με την επιλογή των υπόλοιπων $n-s$ αντικειμένων.
- 3 $C_1^n = C_{n-1}^n = n$. Επειδή υπάρχουν n διαφορετικοί τρόποι να επιλέξουμε ένα αντικείμενο από μια συλλογή n αντικειμένων.

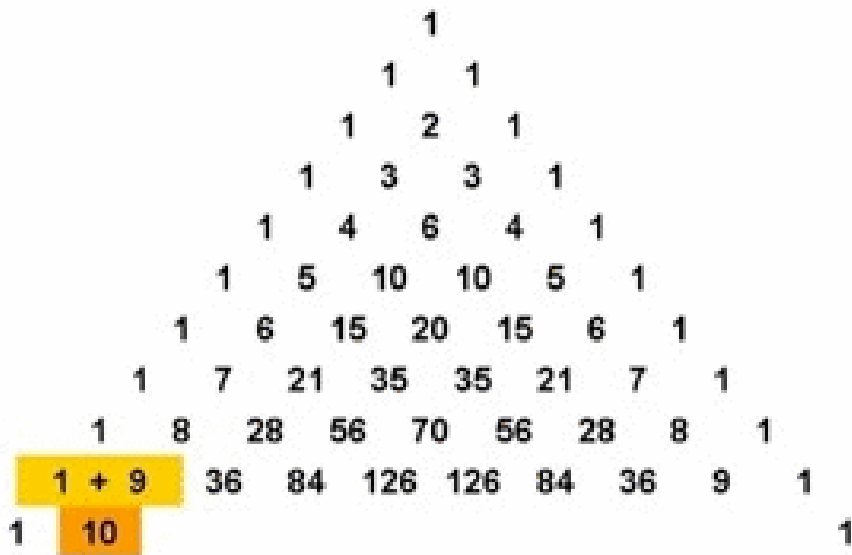
Οι συντελεστές του διωνύμου δίνονται από το τρίγωνο του Pascal:

$$\begin{array}{l} (a + b)^1 : \qquad \qquad \qquad 1 \qquad 1 \\ (a + b)^2 : \qquad \qquad \qquad 1 \qquad 2 \qquad 1 \\ (a + b)^3 : \qquad \qquad 1 \qquad 3 \qquad 3 \qquad 1 \\ (a + b)^4 : \qquad \qquad 1 \qquad 4 \qquad 6 \qquad 4 \qquad 1 \\ (a + b)^5 : \qquad 1 \qquad 5 \qquad 10 \qquad 10 \qquad 5 \qquad 1 \\ (a + b)^6 : \qquad 1 \qquad 6 \qquad 15 \qquad 20 \qquad 15 \qquad 6 \qquad 1 \\ (a + b)^7 : \qquad 1 \qquad 7 \qquad 21 \qquad 35 \qquad 35 \qquad 21 \qquad 7 \qquad 1 \end{array}$$

Κάθε γραμμή αρχίζει και τελειώνει με το 1. Οι όροι της γραμμής δημιουργούνται από την προηγούμενη προσθέτοντας δυο διαδοχικούς όρους. Έτσι έχουμε

$$(a + b)^6 = a^6 + 6a^5b + 15a^4b^2 + 20a^3b^3 + 15a^2b^4 + 6ab^5 + b^6.$$

Pascal's Triangle



MakeAGIF.com

Στο τρίγωνο του Pascal

$$\begin{array}{r} (a + b)^1 : \qquad \qquad \qquad 1 \qquad 1 \\ (a + b)^2 : \qquad \qquad \qquad 1 \qquad 2 \qquad 1 \\ (a + b)^3 : \qquad \qquad 1 \qquad 3 \qquad 3 \qquad 1 \\ (a + b)^4 : \qquad \qquad 1 \qquad 4 \qquad 6 \qquad 4 \qquad 1 \\ (a + b)^5 : \qquad 1 \qquad 5 \qquad 10 \qquad 10 \qquad 5 \qquad 1 \\ (a + b)^6 : \qquad 1 \qquad 6 \qquad 15 \qquad 20 \qquad 15 \qquad 6 \qquad 1 \\ (a + b)^7 : \qquad 1 \qquad 7 \qquad 21 \qquad 35 \qquad 35 \qquad 21 \qquad 7 \qquad 1 \end{array}$$

- Οι κόκκινοι αριθμοί είναι οι τριγωνικοί αριθμοί.
- Το άθροισμα δυο διαδοχικών τριγωνικών αριθμών είναι τετράγωνο.

Η επόμενη είναι μια χρήσιμη σχέση μεταξύ των διωνυμικών συντελεστών:

$$\binom{n+1}{s} = \binom{n}{s-1} + \binom{n}{s}.$$

Κάνουμε τις πράξεις:

$$\begin{aligned} \binom{n}{s-1} + \binom{n}{s} &= \frac{n!}{(n-s+1)!(s-1)!} + \frac{n!}{(n-s)!s!} = \frac{n!}{(n-s)!(s-1)!} \left(\frac{1}{n-s+1} + \frac{1}{s} \right) \\ &= \frac{n!}{(n-s)!(s-1)!} \frac{s+n-s+1}{s(n-s+1)} = \frac{n!}{(n-s)!(s-1)!} \frac{n+1}{s(n-s+1)} \\ &= \frac{(n+1)!}{(n+1-s)!s!} = \binom{n+1}{s} \end{aligned}$$

Στο τρίγωνο του Pascal, αυτό σημαίνει ότι ένα στοιχείο (εκτός του 1) είναι το άθροισμα των δυο επάνω διαγώνιων όρων:

$(a + b)^1 :$				1		1			
$(a + b)^2 :$				1		2		1	
$(a + b)^3 :$			1		3		3		1
$(a + b)^4 :$		1		4		6		4	1
$(a + b)^5 :$		1	5	10	10	5	1		
$(a + b)^6 :$	1	6	15	20	15	6	1		
$(a + b)^7 :$	1	7	21	35	35	21	7	1	

Διώνυμο του Νεύτωνα

Για κάθε a και b ισχύει

$$(a + b)^n = \sum_{s=0}^n \binom{n}{s} a^{n-s} b^s, \quad n \geq 1.$$

Θα δώσουμε μια απόδειξη με μαθηματική επαγωγή. Για $n = 1$ προφανώς ισχύει. Υποθέτουμε ότι ισχύει για $n = k$, δηλαδή

$$(a + b)^k = \sum_{s=0}^k \binom{k}{s} a^{k-s} b^s$$

Θα δείξουμε ότι ισχύει για $n = k + 1$,

$$(a + b)^{k+1} = \sum_{s=0}^{k+1} \binom{k+1}{s} a^{k+1-s} b^s.$$

Κάνουμε τις πράξεις:

$$\begin{aligned}(a+b)^{k+1} &= (a+b)(a+b)^k = (a+b) \sum_{s=0}^k \binom{k}{s} a^{k-s} b^s = \sum_{s=0}^k \binom{k}{s} a^{k-s+1} b^s + \sum_{s=0}^k \binom{k}{s} a^{k-s} b^{s+1} \\ &= \sum_{s=0}^k \binom{k}{s} a^{k-s+1} b^s + \sum_{s=1}^{k+1} \binom{k}{s-1} a^{k-(s-1)} b^{(s-1)+1}\end{aligned}$$

όπου αντικαθιστούμε, στο δεύτερο άθροισμα, το s με το $s-1$.

$$\begin{aligned}&= \sum_{s=0}^k \binom{k}{s} a^{k-s+1} b^s + \sum_{s=1}^{k+1} \binom{k}{s-1} a^{k-s+1} b^s \\ &= a^{k+1} + \sum_{s=1}^k \binom{k}{s} a^{k-s+1} b^s + \sum_{s=1}^k \binom{k}{s-1} a^{k-s+1} b^s + b^{k+1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= a^{k+1} + \sum_{s=1}^k \left[\binom{k}{s} + \binom{k}{s-1} \right] a^{k-s+1} b^s + b^{k+1} \\
&= a^{k+1} + \sum_{s=1}^k \binom{k+1}{s} + b^{k+1} = \sum_{s=0}^{k+1} \binom{k+1}{s} a^{k+1-s} b^s
\end{aligned}$$

Παραδείγματα

(1) Να αναπτύξετε το άθροισμα $(2a - 1)^4$.

Τους συντελεστές τους παίρνουμε από το τρίγωνο του Pascal:

$$(2a-1)^4 = (2a)^4 + 4(2a)^3(-1) + 6(2a)^2(-1)^2 + 4(2a)(-1)^3 + (-1)^4 = 16a^4 - 32a^3 + 24a^2 - 8a + 1.$$

(2) Να απλοποιήσετε το άθροισμα $(1 - \sqrt{2})^5$.

Τους συντελεστές τους παίρνουμε από το τρίγωνο του Pascal:

$$\begin{aligned}(1 - \sqrt{2})^5 &= 1 - 5\sqrt{2} + 10(\sqrt{2})^2 - 10(\sqrt{2})^3 + 5(\sqrt{2})^4 - (\sqrt{2})^5 \\ &= 1 - 5\sqrt{2} + 20 - 20\sqrt{2} + 20 - 4\sqrt{2} = 41 - 29\sqrt{2}\end{aligned}$$

Να θυμηθούμε:

$$\begin{aligned}(\sqrt{2})^3 &= (\sqrt{2})^2\sqrt{2} = 2\sqrt{2} \\ (\sqrt{2})^4 &= (\sqrt{2})^2(\sqrt{2})^2 = 2 \cdot 2 = 4 \\ (\sqrt{2})^5 &= (\sqrt{2})^2(\sqrt{2})^2\sqrt{2} = 2 \cdot 2 \cdot \sqrt{2} = 4 \cdot \sqrt{2}\end{aligned}$$

(3) Να αποδείξετε ότι:

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

Στο διώνυμο του Νεύτωνα θέτουμε $a = b = 1$ και έχουμε

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

Παρατηρούμε ότι το C_s^n είναι ο αριθμός των υποσυνόλων με s στοιχεία ενός συνόλου n στοιχείων, γιατί ένα υποσύνολο s στοιχείων είναι η επιλογή s στοιχείων από μια συλλογή n στοιχείων, χωρίς να ενδιαφερόμαστε για την σειρά. Άρα ο παραπάνω τύπος μας δίνει τον συνολικό αριθμό των υποσυνόλων ενός συνόλου n στοιχείων, όπως δείξαμε πριν με επαγωγή.

(4) Να αποδείξετε ότι:

$$\binom{n}{0} + \binom{n}{2} + \dots = \binom{n}{1} + \binom{n}{3} + \dots$$

(η κατάληξη των αθροισμάτων εξαρτάται από το αν ο n είναι περιττός ή άρτιος).

Στο διώνυμο του Νεύτωνα θέτουμε $a = 1$, $b = -1$ και έχουμε

$$0 = \binom{n}{0} - \binom{n}{1} + \binom{n}{2} - \binom{n}{3} + \dots \Rightarrow \binom{n}{0} + \binom{n}{2} + \dots = \binom{n}{1} + \binom{n}{3} + \dots$$

(5) Να δείξετε ότι

$$\binom{2n}{n} = \sum_{s=0}^n \binom{n}{s}^2.$$

Ξεκινάμε από μια βασική ισότητα $(1+x)^{2n} = (1+x)^n(1+x)^n$ και εφαρμόζουμε το διώνυμο του Νεύτωνα:

$$\sum_{s=0}^{2n} \binom{2n}{s} x^s = \left(\sum_{s=0}^n \binom{n}{s} x^s \right) \left(\sum_{s=0}^n \binom{n}{s} x^s \right).$$

Αυτή η εξίσωση ισχύει για κάθε x . Άρα οι συντελεστές των αντίστοιχων δυνάμεων στις δυο πλευρές είναι ίσοι. Εξετάζουμε τους συντελεστές του x^n .

Στην δεξιά πλευρά το x^n το έχουμε ως $x^0 x^n, x x^{n-1}, \dots, x^n x^0$. Άρα

$$\binom{2n}{n} = \binom{n}{0} \binom{n}{n} + \binom{n}{1} \binom{n}{n-1} + \dots + \binom{n}{n} \binom{n}{0}$$

Αλλά γνωρίζουμε ότι

$$\binom{n}{s} = \binom{n}{n-s}$$

Επομένως

$$\binom{2n}{n} = \sum_{s=0}^n \binom{n}{s}^2.$$

Και στο τρίγωνο του Pascal

$$\begin{array}{r} (a+b)^1: \qquad\qquad\qquad 1 \qquad 1 \\ (a+b)^2: \qquad\qquad 1 \qquad 2 \qquad 1 \\ (a+b)^3: \qquad\qquad 1 \qquad 3 \qquad 3 \qquad 1 \\ (a+b)^4: \qquad 1 \qquad 4 \qquad 6 \qquad 4 \qquad 1 \\ (a+b)^5: \qquad 1 \qquad 5 \qquad 10 \qquad 10 \qquad 5 \qquad 1 \\ (a+b)^6: \qquad 1 \qquad 6 \qquad 15 \qquad 20 \qquad 15 \qquad 6 \qquad 1 \\ (a+b)^7: \qquad 1 \qquad 7 \qquad 21 \qquad 35 \qquad 35 \qquad 21 \qquad 7 \qquad 1 \end{array}$$

Το μπλε είναι το άθροισμα των κόκκινων τετραγώνων.

(6) Να δείξετε ότι

$$\sum_{s=0}^n s \binom{n}{s} = n2^{n-1}.$$

Διαφορίζουμε το παρακάτω διώνυμο του Νεύτωνα:

$$\begin{aligned} (1+x)^n &= \sum_{s=0}^n \binom{n}{s} x^s \Rightarrow ((1+x)^n)' = \left(\sum_{s=0}^n \binom{n}{s} x^s \right)' \\ &\Rightarrow n(1+x)^{n-1} = \sum_{s=1}^n s \binom{n}{s} x^{s-1} \end{aligned}$$

Στην παραπάνω εξίσωση θέτουμε $x = 1$:

$$n2^{n-1} = \sum_{s=1}^n s \binom{n}{s} = \sum_{s=0}^n s \binom{n}{s}.$$

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να αποδειχθούν με μαθηματική επαγωγή αν και η απόδειξη είναι πιο πολύπλοκη. Γενικά μ' αυτόν τον τρόπο μπορούμε να αποδείξουμε πολλές σχέσεις μεταξύ των συντελεστών των διωνύμων του Νεύτωνα.

Μπορούμε να δημιουργήσουμε εξισώσεις από το διώνυμο του Νεύτωνα επιλέγοντας διάφορες τιμές για το a και το b .

- $a = 1, b = 2$:

$$3^n = (1 + 2)^n = \sum_{s=0}^n \binom{n}{s} 2^s.$$

- $a = 1, b = -2$ ή $a = 2, b = -3$:

$$\begin{aligned} (-1)^n &= (1 - 2)^n = \sum_{s=0}^n \binom{n}{s} (-2)^s = \sum_{s=0}^n \binom{n}{s} (-1)^s 2^s \\ &= (2 - 3)^n = \sum_{s=0}^n \binom{n}{s} 2^s (-3)^{n-s} = \sum_{s=0}^n \binom{n}{s} (-1)^{n-s} 2^s 3^{n-s} \end{aligned}$$

- $a = 1, b = \sqrt{2}$:

$$(1 + \sqrt{2})^n = \sum_{s=0}^n \binom{n}{s} (\sqrt{2})^s = \sum_{s=0}^n \binom{n}{s} 2^{\frac{s}{2}}.$$

$(a+b)^1 :$											$11^1 = 11$
$(a+b)^2 :$											$11^2 = 121$
$(a+b)^3 :$											$11^3 = 1331$
$(a+b)^4 :$											$11^4 = 14641$
$(a+b)^5 :$											$11^5 = 161051$
$(a+b)^6 :$											$11^6 = 1771561$
$(a+b)^7 :$											$11^7 = 19487171$
	1	1	7	21	35	35	21	7	1	1	

Τα πρώτα ψηφία φαίνονται άμεσα. Για τα υπόλοιπα, τα προσθέτουμε ανά δυο αν έχουμε δεκάδες:

$n = 5: 15 + 10 + 10 + 51 = 161051.$

$n = 6: 16 + 15 + 20 + 1561 = 1771561.$

Αυτό είναι συνέπεια του

$$11^n = (10 + 1)^n = \sum_{s=0}^n \binom{n}{s} 10^s.$$

Ακέραιοι Αριθμοί

Το σύνολο των ακεραίων ορίζεται ως

$$\mathbb{Z} = \{0, \pm 1, \pm 2, \dots\} = \{\dots - 2, -1, 0, 1, 2, \dots\}.$$

Δηλαδή είναι το σύνολο των φυσικών αριθμών μαζί με τους αρνητικούς τους. Στο \mathbb{Z} ορίζουμε πρόσθεση και πολλαπλασιασμό, επεκτείνοντας τον ορισμό από τους φυσικούς.

Επίσης και η αφαίρεση είναι κλειστή πράξη στους ακέραιους, κάτι που δεν ισχύει για τους φυσικούς αριθμούς. Όμως, δεν είναι κλειστό ως προς την διαίρεση, όπως κανείς εύκολα μπορεί να δει ($2/3$ δεν είναι ακέραιος). Για την διαίρεση ισχύει:

Αλγόριθμος Διαίρεσης

Έστω $a, b \in \mathbb{Z}$, $b \neq 0$. Τότε υπάρχουν μοναδικά q (πηλίκο) και r (υπόλοιπο) έτσι ώστε

$$a = bq + r, \quad 0 \leq r < |b|.$$

Δεν θα δώσουμε την απόδειξη που είναι συνέπεια της Καλής Διάταξης των φυσικών αριθμών. Είναι η κλασική διαίρεση των ακεραίων.

Παραδείγματα

(1) Να εφαρμόσετε τον Αλγόριθμο Διαίρεσης για $a = 354$, $b = 17$.

Απλά εφαρμόζουμε την γνωστή διαίρεση:

$$\begin{array}{r|l} 354 & 17 \\ 34 & 20 \\ \hline 14 & \end{array}$$

Άρα $354 = 17 \cdot 20 + 14$.

(2) Να εφαρμόσετε τον Αλγόριθμο Διαίρεσης για $a = 423$, $b = -19$.

Εφαρμόζουμε την γνωστή διαίρεση στους θετικούς αριθμούς:

$$\begin{array}{r|l} 423 & 19 \\ 38 & 22 \\ \hline & 43 \\ & 38 \\ \hline & 5 \end{array}$$

Άρα $423 = 19 \cdot 22 + 5 = (-19)(-22) + 5$.

(3) Να εφαρμόσετε τον Αλγόριθμο Διαίρεσης για $a = -5476$, $b = 25$.

Εφαρμόζουμε την γνωστή διαίρεση στους θετικούς αριθμούς:

$$\begin{array}{r|l} 5476 & 25 \\ 50 & 219 \\ \hline 47 & \\ 25 & \\ \hline 226 & \\ 225 & \\ \hline 1 & \end{array}$$

Άρα $5476 = 25 \cdot 219 + 1 \Rightarrow -5476 = -25 \cdot 219 - 1 = 25(-219) - 1$. Πρέπει όμως το υπόλοιπο να είναι θετικό. Επομένως

$$-5476 = 25(-219) + (24 - 25) = 25(-219) - 25 + 24 = 25(-220) + 24.$$

Άρα $q = -220$, $r = 24$.

(4) Να εφαρμόσετε τον Αλγόριθμο Διαίρεσης για $a = -23457$, $b = 37$.

Εφαρμόζουμε την γνωστή διαίρεση στους θετικούς αριθμούς:

$$\begin{array}{r|l} 23457 & 37 \\ \hline \cancel{f}22 & 633 \\ \hline 125 & \\ 111 & \\ \hline 147 & \\ 111 & \\ \hline 36 & \end{array}$$

Άρα $23457 = 37 \cdot 633 + 36 \Rightarrow -23457 = -37 \cdot 633 - 36 = 37(-633) - 36$. Όπως και πριν, πρέπει όμως το υπόλοιπο να είναι θετικό. Επομένως

$$-23457 = 37(-633) + (1 - 37) = 37(-633) - 37 + 1 = 37(-634) + 1.$$

Άρα $q = -634$, $r = 1$.

(5) Να εφαρμόσετε τον Αλγόριθμο Διαίρεσης για $a = -32478$, $b = -41$.

Εφαρμόζουμε την γνωστή διαίρεση στους θετικούς αριθμούς:

$$\begin{array}{r|l} 32478 & 41 \\ 287 & 792 \\ \hline 377 & \\ 369 & \\ \hline 88 & \\ 82 & \\ \hline 6 & \end{array}$$

Άρα $32478 = 41 \cdot 792 + 6 \Rightarrow -32478 = -41 \cdot 792 - 6 = (-41) \cdot 792 - 6$. Όπως και πριν, πρέπει όμως το υπόλοιπο να είναι θετικό. Επομένως

$$-32478 = (-41) \cdot 792 + (35 - 41) = (-41) \cdot 793 + 35.$$

Άρα $q = 793$, $r = 35$.

Η έννοια της διαιρετότητας είναι βασική στην θεωρία των ακεραίων:

- 1 Για $a, b \in \mathbb{Z}$, $b \neq 0$, το b διαιρεί το a , b/a αν υπάρχει $k \in \mathbb{Z}$ έτσι ώστε $a = kb$. Το b ονομάζεται και παράγοντας ή διαιρέτης του a .
- 2 Ένας θετικός ακέραιος p ονομάζεται **πρώτος** αν οι μόνοι θετικοί διαιρέτες του είναι το 1 και το p .

Τα πολλαπλάσια του 2 ονομάζονται **άρτιοι** και αν δεν είναι πολλαπλάσια του 2 ονομάζονται περιττοί.

Ιδιότητες Διαιρετότητας

- ① $\pm 1/a$, για κάθε $a \in \mathbb{Z}$.
- ② $a/\pm 1 \Rightarrow a = \pm 1$.
- ③ $\pm a/a$, για κάθε $a \neq 0$.
- ④ $a/b \Rightarrow \pm a/\pm b$.
- ⑤ Αν b/a , τότε b/na , για $n \in \mathbb{Z}$:

$$b/a \Rightarrow a = kb \Rightarrow na = (nk)b \Rightarrow b/na.$$

- ⑥ Αν b/a_1 και b/a_2 τότε $b/a_1 \pm a_2$: Θα το δείξουμε για το άθροισμα. Η απόδειξη για την διαφορά είναι όμοια:

$$\left. \begin{array}{l} b/a_1 \Rightarrow a_1 = k_1 b, k_1 \in \mathbb{Z} \\ b/a_2 \Rightarrow a_2 = k_2 b, k_2 \in \mathbb{Z} \end{array} \right\} \Rightarrow a_1 + a_2 = k_1 b + k_2 b = (k_1 + k_2)b \Rightarrow b/a_1 + a_2.$$

- ⑦ Ο b/a αν και μόνο αν το υπόλοιπο της διαίρεσης του a δια b είναι 0.

Η τελευταία παρατήρηση επάγει το ακόλουθο:

- Το γινόμενο δυο διαδοχικών ακεραίων είναι διαιρετό δια 2 (Φυσικά ο ένας είναι άρτιος και ο άλλος περιττός).
- Το γινόμενο τριών διαδοχικών ακεραίων είναι διαιρετό δια 3.
- Το γινόμενο τεσσάρων διαδοχικών ακεραίων είναι διαιρετό δια 4.
- Γενικά, το γινόμενο n διαδοχικών αριθμών είναι διαιρετό δια n .

Για να το δούμε, έστω $a + i$, $i = 0, 1, \dots, n - 1$, n διαδοχικοί αριθμοί. Έστω ότι το υπόλοιπο της διαίρεσης του a δια n είναι r ($0 \leq r < n$). Δηλαδή, $a = nq + r$. Παρατηρούμε ότι

$$a + i = nq + r + i$$

Τότε, για κάποιο i , $r + i = n$. Δηλαδή $i = n - r \geq 0$. Γι' αυτό το συγκεκριμένο i ,

$$a + i = nq + n = n(q + 1) \Rightarrow n/a + i.$$

Μοναδική Παραγοντοποίηση Ακεραίων

Έστω $a \in \mathbb{Z} - \{0\}$. Τότε

- 1 Υπάρχει ένας πρώτος παράγοντας του a .
- 2 Αν ένας πρώτος p/ab τότε διαιρεί ή τον a ή τον b ή και τους δύο.
- 3 $a = \pm p_1 p_2 \dots p_s$, όπου p_i είναι πρώτος και το γινόμενο είναι μοναδικό εκτός από την σειρά των παραγόντων

- Αν ένας αριθμός b/xy τότε δεν είναι απαραίτητο ο b/x ή b/y . Για παράδειγμα $6/4 \cdot 3$ αλλά $6 \nmid 3$ και $6 \nmid 4$.
- Στην παραγοντοποίηση του $a \in \mathbb{Z}$ συνήθως συλλέγουμε τους ίδιους πρώτους και γράφουμε

$$a = \pm p_1^{r_1} p_2^{r_2} \dots p_s^{r_s}.$$

Η μοναδικότητα της ανάλυσης σε πρώτους και η ιδιότητα (2) της παραπάνω πρότασης, μας δίνει ένα κριτήριο διαιρετότητας. Έστω

$$a = p_1^{r_1} \dots p_v^{r_v}, \quad b = q_1^{s_1} \dots q_w^{s_w}.$$

είναι η ανάλυση σε γινόμενο πρώτων. Τότε

$$b/a \Leftrightarrow \text{για κάθε } 1 \leq i \leq w \text{ υπάρχει } 1 \leq j \leq v \text{ έτσι ώστε } q_i = p_j, \quad s_i \leq r_j$$

Αυτό σημαίνει ότι οι πρώτοι παράγοντες του b είναι παράγοντες του a και η δύναμή τους στο b είναι μικρότερη ή ίση με την αντίστοιχη δύναμη στο a .

Για παράδειγμα

$$a = 3^3 \cdot 5^2 \cdot 7^6 \cdot 11 \cdot 13^2 \cdot 17 \cdot 29, \quad b = 5 \cdot 7^3 \cdot 13 \cdot 29$$

τότε b/a και

$$a = 3^3 \cdot 5^2 \cdot 7^6 \cdot 11 \cdot 13^2 \cdot 17 \cdot 29 = kb = (3^3 \cdot 5 \cdot 7^3 \cdot 11 \cdot 13 \cdot 17)(5 \cdot 7^3 \cdot 13 \cdot 29)$$

Υπάρχουν άπειροι πρώτοι.

Ευκλείδης: Έστω ότι υπάρχουν πεπερασμένοι πρώτοι $p_i, i = 1, \dots, s$. Έστω $N = p_1 \dots p_s + 1$. Τότε ο N πρέπει να έχει έναν πρώτο παράγοντα p_i . Αλλά

$$\left. \begin{array}{l} p_i/N \\ p_i/p_1 \dots p_s \end{array} \right\} \Rightarrow p_i/N - p_1 \dots p_s \Rightarrow p_i/1$$

και το τελευταίο είναι άτοπο. Άρα υπάρχουν άπειροι πρώτοι.

Υπάρχουν πολλές εικασίες πάνω στους πρώτους. Η βασικότερη είναι η εικασία του Riemann που δίνει πληροφορίες για την κατανομή των πρώτων αριθμών. Συνήθως, οι εικασίες μπλέκουν την πολλαπλασιαστική φύση των πρώτων με προσθετικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, η εικασία του Goldbach ρωτάει αν κάθε άρτιος μπορεί να γραφτεί σαν άθροισμα δυο περιττών πρώτων. Θα αναφέρουμε και την εικασία των δίδυμων πρώτων: Δύο πρώτοι ονομάζονται δίδυμοι αν η διαφορά τους είναι ίση με 2. Η εικασία ρωτά αν υπάρχουν άπειροι δίδυμοι πρώτοι. Η ακολουθία των πρώτων αριθμών ξεκινάει με:

2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43, 47, 53, 59, 61, 71, 73, 79, 83, 89, 97, ...

Ο μεγαλύτερος πρώτος είναι ο $2^{82,589,933} - 1$ με 24, 862, 048 ψηφία. Η τιμή του είναι

148894445742041325547806458472397916603026273992795324185

271289425213239361064475310309971132180337174752834401423587560 ...

παραλείπουμε 24, 861, 808 ψηφία

... 062107557947958297531595208807192693676521782184472526640076912114

355308311969487633766457823695074037951210325217902591

Μια μέθοδος για να βρούμε όλους τους πρώτους, μικρότερους ενός αριθμού n , χρησιμοποιούμε το **κόσκινο του Ερατοσθένη**:

- Ξεκινάμε διαγράφοντας τα πολλαπλάσια του 2 (όλους τους άρτιους).
- Στην συνέχεια διαγράφουμε τα πολλαπλάσια του 3.
- Συνεχίζουμε μ' αυτόν τον τρόπο, διαγράφουμε τα πολλαπλάσια του ακεραίου που δεν έχει ήδη διαγραφεί.

Κόσκινο του Ερατοσθένη

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Prime numbers
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	
101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	
111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	

Ισχύει μια πρόταση που βοηθάει στο κόσκινο του Ερατοσθένη:
Κάθε ακέραιος n , που δεν είναι πρώτος, έχει έναν πρώτο διαιρέτη $p \leq \sqrt{n}$:

Γνωρίζουμε ότι ο n έχει έναν πρώτο διαιρέτη p . Αν $p \leq \sqrt{n}$, τελειώσαμε.
Αν $p > \sqrt{n}$ και p/n . Άρα $n = kp$, $k \in \mathbb{Z}$:

$$n = kp > k\sqrt{n} \Rightarrow (\sqrt{n})^2 > k\sqrt{n} \Rightarrow \sqrt{n} > k.$$

Έστω τώρα q ένας πρώτος διαιρέτης του k . Τότε $q \leq k$ και τελικά

$$\sqrt{n} > k \geq q \Rightarrow q < \sqrt{n}.$$

Ας εξετάσουμε τον $n = 211$. Το 211 θα έχει έναν πρώτο διαιρέτη $p \leq \sqrt{211} < 15$ ($15^2 = 225$). Οι πρώτοι αριθμοί μικρότεροι του 15 είναι: 2, 3, 5, 7, 11, 13. Μπορούμε να ελέγξουμε ότι κανένας απ' αυτούς δεν διαιρεί το 211. Άρα ο 211 είναι πρώτος.

Το 2020 δεν είναι πρώτος γιατί είναι άρτιος και επομένως διαιρείται δια 2. Έχουμε την ανάλυση σε πρώτους παράγοντες $2020 = 2^2 \cdot 5 \cdot 101$.

Ας εξετάσουμε λοιπόν τον $n = 2021$. Παρατηρούμε ότι $\sqrt{2021} < 45$ κι αυτό γιατί $45^2 = 2025$. Εξετάζουμε λοιπόν τους πρώτους μικρότερους του 45: 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43.

2, 3, 5 εύκολα μπορούμε να δούμε ότι δεν διαιρούν το 2021.

$2021 = 7 \cdot 288 + 5$, $2021 = 11 \cdot 83 + 8$, $2021 = 13 \cdot 155 + 6$, $2021 = 17 \cdot 118 + 15$, $2021 = 19 \cdot 106 + 7$
 $2021 = 23 \cdot 87 + 20$, $2021 = 29 \cdot 69 + 20$, $2021 = 31 \cdot 65 + 6$, $2021 = 37 \cdot 54 + 23$, $2021 = 41 \cdot 49 + 12$, $2021 = 43 \cdot 47$ Άρα $43/2021$ και $2021 = 43 \cdot 47$ είναι η ανάλυση σε πρώτους παράγοντες του 2021.

Εικασίες Στους Πρώτους

Θα διατυπώσουμε κάποιες (ακόμη άλυτες) εικασίες στους πρώτους:

- (Εικασία του Goldback) Κάθε άρτιος ακέραιος $n > 2$ είναι το άθροισμα δυο πρώτων. Αποδείχθηκε για όλους τους αριθμούς μικρότερους του $4 \cdot 10^{17}$.
- (Περιττή Εικασία του Goldback) Κάθε περιττός ακέραιος $n > 5$ είναι το άθροισμα τριών πρώτων. Αρκεί να αποδειχθεί για όλους τους αριθμούς μεγαλύτερους του 10^{43000} .
- Κάθε άρτιος αριθμός είναι η διαφορά δυο πρώτων.
- Υπάρχουν άπειροι δίδυμοι πρώτοι (που διαφέρουν κατά 2). Για παράδειγμα

$(3, 5), (5, 7), (11, 13), (17, 19), (29, 31), (41, 43), (59, 61), (71, 73), (101, 103),$
 $(107, 109), (137, 139), \dots$

Το μεγαλύτερο ζεύγος δίδυμων πρώτων είναι $2996863034895 \times 2^{1290000} \pm 1$ με 388,342 ψηφία.

- Υπάρχουν άπειροι πρώτοι της μορφής $n^2 + 1$;
- Υπάρχει πάντα ένας πρώτος μεταξύ n^2 και $(n + 1)^2$;

Παραδείγματα

(1) Να δείξετε ότι $6/n^3 - n$, για κάθε $n \in \mathbb{N}$.

Χρησιμοποιούμε μαθηματική επαγωγή. Για $n = 0$ ισχύει γιατί $6/0$. Υποθέτουμε ότι ισχύει για $n = k$, δηλαδή ότι $6/k^3 - k$. Θα δείξουμε ότι $6/(k+1)^3 - (k+1)$. Από την υπόθεση $k^3 - k = 6\ell$, $\ell \in \mathbb{Z}$.

Κάνουμε τους υπολογισμούς, εφαρμόζοντας το διώνυμο του Νεύτωνα.

$$(k+1)^3 - (k+1) = k^3 + 3k^2 + 3k + 1 - k - 1 = (k^3 - k) + 3k(k+1)$$

Παρατηρούμε ότι αν ο k είναι άρτιος τότε το $k(k+1)$ είναι άρτιος. Αν ο k είναι περιττός, τότε το $k+1$ είναι άρτιος και ο $k(k+1)$ είναι άρτιος. Σε κάθε περίπτωση $k(k+1) = 2\mu$ είναι άρτιος. Άρα

$$(k+1)^3 - (k+1) = 6\ell + 3 \cdot 2\mu = 6(\ell + \mu) \Rightarrow 6/(k+1)^3 - (k+1).$$

Θα δώσουμε μια άλλη λύση στο παραπάνω πρόβλημα. Θα εξετάσουμε την γενική περίπτωση. Εφαρμόζουμε τον Αλγόριθμο Διαίρεσης στο a και n :

$$a = qn + r, \quad 0 \leq r < n.$$

Παρατηρούμε ότι, για $m \in \mathbb{N}$,

$$a^m = (qn + r)^m = \sum_{s=0}^m \binom{m}{s} (qn)^{m-s} r^s = \sum_{s=0}^m \binom{m}{s} q^{m-s} n^{m-s} r^s = \sum_{s=0}^{m-1} \binom{m}{s} (qn)^{m-s} r^s + r^m.$$

Για $0 \leq s \leq m-1$, $m-s > 0$, και επομένως όλοι οι όροι του πρώτου αθροίσματος έχουν το n σαν παράγοντα:

$$a^m = nQ + r^m$$

Άρα το υπόλοιπο της διαίρεσης του a^m δια n είναι το ίδιο με το υπόλοιπο της διαίρεσης του r^m δια n .

Τώρα θα δείξουμε ότι $6 \mid n^3 - n$ χρησιμοποιώντας την παραπάνω παρατήρηση.

Υπόλοιπο δια 6 του n	0	1	2	3	4	5
Υπόλοιπο δια 6 του n^3	0	1	$2^3 = 8 \sim 2$	$3^3 = 27 \sim 3$	$4^3 = 64 \sim 4$	$5^3 = 125 \sim 5$

Παρατηρούμε ότι το υπόλοιπο της διαίρεσης του n και του n^3 δια 6 είναι ίσα. Άρα το υπόλοιπο της διαίρεσης του $n^3 - n$ δια 6 είναι 0. Άρα το 6 διαιρεί το $n^3 - n$.