

Συνδυαστική Απαρίθμηση

Διδάσκοντες: **Δ. Φωτάκης, Δ. Σούλιου, Θ. Λιανέας**
Επιμέλεια διαφανειών: **Δ. Φωτάκης**

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο



Συνδυαστική Απαρίθμηση

- Υπολογισμός (με συνδυαστικά επιχειρήματα) του **πλήθους των διαφορετικών αποτελεσμάτων** ενός «πειράματος».
 - «Πείραμα»: διαδικασία με συγκεκριμένο (πεπερασμένο) σύνολο παρατηρήσιμων αποτελεσμάτων.
 - Π.χ. ρίψη ζαριών, μοίρασμα τράπουλας, ανάθεση γραφείων, επιλογή password, βάδες Lotto, ...
 - Πληθάριθμος δυναμοσυνόλου: αν $|A| = n$, τότε $|P(A)| = 2^n$
- Βασικές αρχές και έννοιες:
 - Κανόνες **γινομένου** και **αθροίσματος**, αρχή **εγκλεισμού – αποκλεισμού**.
 - **Διατάξεις** και **μεταθέσεις** (με ή χωρίς) επανάληψη.
 - **Συνδυασμοί** (με ή χωρίς) επανάληψη.

Κανόνας Γινομένου

- Πείραμα **A** με **n** αποτελέσματα. Πείραμα **B** με **m** αποτελέσματα.
- Αν αποτελέσματα A και B είναι **ανεξάρτητα**, τότε συνδυασμός των πειραμάτων **A και B** έχει **$n \times m$** αποτελέσματα.
 - **Ανεξάρτητα**: το αποτέλεσμα του A **δεν επηρεάζει** (ως προς τον αριθμό των αποτελεσμάτων) το αποτέλεσμα του B, και αντίστροφα.
 - Π.χ. $|A \times B| = |A| \times |B|$
 - Επιλογή ενός **ψηφίου 0-9** και **ενός κεφαλαίου** Ελληνικού γράμματος:
 - $10 \times 24 = 240$ διαφορετικά αποτελέσματα.
 - #συμβ/ρών (με κεφαλαία Ελληνικά) μήκους 10: 24^{10}
 - #παλινδρομικών συμβ/ρών μήκους 10: 24^5
 - #συναρτήσεων από A στο B ($|A| = n, |B| = m$): m^n
 - #συναρτήσεων **1-1** από A στο B ($m \geq n$): $m(m-1) \cdots (m-n+1)$

Κανόνας Αθροίσματος

- Πείραμα A με n αποτελέσματα. Πείραμα B με m αποτελέσματα.
- Αν αποτελέσματα A και B είναι **αμοιβαία αποκλειόμενα**, τότε συνδυασμός των πειραμάτων A ή B έχει $n+m$ αποτελέσματα.
 - **Αμοιβαία αποκλειόμενα**: η παρατήρηση αποτελέσματος του A αποκλείει την παρατήρηση αποτελέσματος του B , και αντίστροφα.
 - $|A \cup B| = |A| + |B|$, αν $|A \cap B| = \emptyset$
 - Αρχή εγκλεισμού – αποκλεισμού: $|A \cup B| = |A| + |B| - |A \cap B|$
- 5 Ελληνικά, 7 Αγγλικά, και 10 Γερμανικά βιβλία.
 - Τρόποι να **διαλέξουμε 2 βιβλία σε διαφορετική γλώσσα**:
 - Ελλ. – Αγγλ.: $5 \times 7 = 35$
 - Ελλ. – Γερμ.: $5 \times 10 = 50$
 - Αγγλ. – Γερμ.: $7 \times 10 = 70$
 - Αμοιβαία αποκλειόμενα. Σύνολο: **155** διαφορετικές επιλογές.
 - Τρόποι να **διαλέξουμε 2 βιβλία**: $\frac{22 \times 21}{2} = 231$

Παραδείγματα

- **#passwords** με 6 – 8 χαρακτήρες αποτελούμενα από κεφαλαία (Αγγλικά) γράμματα και (τουλάχιστον ένα) δεκαδικό ψηφίο.
 - **#passwords** μήκους $k = 36^k - 26^k$
 - **#passwords** = $(36^6 + 36^7 + 36^8) - (26^6 + 26^7 + 26^8)$
- **#passwords** μήκους 2 από A, B, C, D και 0, 1, 2 με τουλάχιστον ένα ψηφίο.
 - Σωστό το $7^2 - 4^2 = 33$. Λάθος το (γιατί;) $2 \times 3 \times 7 = 42$
- **#δυαδικών συμβ/ρών** μήκους 8 που **είτε** αρχίζουν από 1 **είτε** τελειώνουν σε 00:
 - Όχι αμοιβαία αποκλειόμενα: $2^7 + 2^6 - 2^5 = 160$.

Διατάξεις – Μεταθέσεις

- **Διατάξεις** $P(n, k)$: k από n διακεκριμένα αντικείμενα σε k διακεκριμένες θέσεις (1 αντικείμενο σε κάθε θέση).
 - $P(n, k) = \#$ τρόπων να πληρωθούν k διακεκριμένες θέσεις από n διακεκριμένα αντικείμενα (διαθέσιμα σε ένα «αντίγραφο»).
 - $$P(n, k) = n(n - 1) \cdots (n - k + 1) = \frac{n!}{(n-k)!}$$
 - $\#$ τρόπων να πληρώσουμε 4 (διαφορετικές) θέσεις εργασίας αν έχουμε 30 υποψήφιους: $P(30, 4) = 30!/26!$
 - $\#$ συμβ/ρών μήκους 10 με όλα τα σύμβολα διαφορετικά από κεφαλαίους Ελληνικούς χαρακτήρες: $P(24, 10) = 24!/14!$
- **Μεταθέσεις** n αντικειμένων: $P(n, n) = n!$
 - $\#$ αναθέσεων 10 (διαφορετικών) γραφείων σε 10 καθηγητές: $P(10, 10) = 10!$
 - $\#$ συμβ/ρών μήκους 24 με όλα τα σύμβολα διαφορετικά από κεφαλαίους Ελληνικούς χαρακτήρες: $P(24, 24) = 24!$

Παραδείγματα

- #συμβ/ρών από 4 διαφορετικούς χαρακτήρες ακολουθούμενους από 3 διαφορετικά ψηφία:
 - $P(24, 4) \times P(10, 3)$
- #τετραψήφιων δεκαδικών αριθμών που δεν αρχίζουν από 0 και δεν έχουν επαναλαμβανόμενα ψηφία:
 - $9 \times 9 \times 8 \times 7 = 4536$.
- #μεταθέσεων (κεφαλαίων Ελληνικών) όπου Α εμφανίζεται πριν από τα Β και Γ:
 - $P(24, 21) \times 2!$
- #μεταθέσεων όπου Α εμφανίζεται πριν το Β, και μετά από τα Γ και Δ:
 - $P(24, 20) \times 2!$

Διατάξεις με Επανάληψη

- #πενταψήφιων δεκαδικών αριθμών: 10^5
- Διατάξεις με επανάληψη: n διακεκριμένα αντικείμενα (διαθέσιμα σε απεριόριστα «αντίγραφα») σε k διακεκριμένες θέσεις: n^k
 - Διανομή k διακεκριμένων αντικειμένων σε n διακεκριμένες υποδοχές (χωρίς περιορισμό στη χωρητικότητα), όταν η σειρά στις υποδοχές δεν έχει σημασία.
- #πενταψήφιων δεκαδικών αριθμών με τουλ. ένα 8: $10^5 - 9^5$
- Πληθικός αριθμός δυναμοσυνόλου A : $2^{|A|}$
 - $|A|$ στοιχεία σε 2 υποδοχές (ανήκει – δεν ανήκει στο υποσύνολο).
- #δυναμικών συμβ/ρών μήκους n με άρτιο πλήθος από 1: 2^{n-1}
 - $\forall$ συμβ/ρά μήκους $n-1$, $\exists$ μοναδική συμβ/ρά με άρτιο πλήθος 1.
 - Ιδέα του parity bit.

Διατάξεις με Επανάληψη

- Διανομή k διακεκριμένων αντικειμένων σε n διακεκριμένες υποδοχές (χωρίς περιορισμό χωρητικότητας) με σειρά στις υποδοχές να έχει σημασία.
 - Ιστιοφόρο έχει n κατάρτια στα οποία μπορεί να αναρτηθούν k διαφορετικές σημαίες. Πόσα διαφορετικά σήματα;

$$n(n+1)\cdots(n+k-1) = \frac{(n+k-1)!}{(n-1)!}$$

- Κυκλικές μεταθέσεις n ατόμων: $(n-1)!$
 - #τρόπων που n άνθρωποι κάθονται σε κυκλικό τραπέζι (διακρίνουμε μεταξύ δεξιά και αριστερά).

Συνδυασμοί

- **Συνδυασμοί** $C(n, k)$: #επιλογών k από n διακεκριμένα αντικείμενα (διαθέσιμα σε ένα «αντίγραφο»).

$$C(n, k) = \frac{P(n, k)}{k!} = \frac{n!}{k!(n-k)!} = \binom{n}{k} = \binom{n}{n-k} = C(n, n-k)$$

- Διαφορετικές **6άδες Lotto** (από 1-49): $C(49, 6)$
- #υποσυνόλων με k στοιχεία από σύνολο n στοιχείων: $C(n, k)$
- #τρόπων στελέχωσης **5μελούς** κοινοβουλευτικής επιτροπής, όπου μέλη **ισότιμα**: $C(300, 5)$
- #δυναδικών **συμβ/ρών μήκους 32** με (ακριβώς) **επτά 1**: $C(32, 7)$
- #επιλογών 3 αριθμών 1-300 ώστε άθροισμα να διαιρείται από 3.
 - Αριθμοί 1-300 σε 3 ομάδες 100 αριθμών με βάση mod 3.
 - Είτε 3 από ίδια ομάδα είτε έναν από κάθε ομάδα.
 - Τελικά $3C(100, 3) + 100^3 = 1.485.100$

Μεταθέσεις με Ομάδες

□ #συμβ/ρών (μήκους 8) με γράμματα λέξης ΕΦΗΒΙΚΟΣ: $8!$

□ #συμβ/ρών (μήκους 8) με γράμματα λέξης ΠΑΡΑΠΟΝΑ:

■ Μεταθέσεις με ομάδες ίδιων αντικειμένων: $8!/(2!3!1!1!1!)$

□ Μεταθέσεις n αντικειμένων σε k ομάδες ίδιων αντικειμένων με πληθάρια $n_1, n_2, \dots, n_k$ αντίστοιχα:

$$\frac{n!}{n_1!n_2!\cdots n_k!} = \binom{n}{n_1} \binom{n-n_1}{n_2} \binom{n-(n_1+n_2)}{n_3} \cdots \binom{n-\sum_{i=1}^{k-1} n_i}{n_k}$$

□ #συμβ/ρών μήκους 24 από 7 Α, 8 Β, 5 Γ, και 4 Δ: $24!/(7!8!5!4!)$

■ Αν πρώτο και τελευταίο Α: $22!/(5!8!5!4!)$

■ Αν δεν πρέπει να εμφανίζεται ΔΔΔΔ: $24!/(7!8!5!4!) - 21!/(7!8!5!1!)$

Παραδείγματα

- Έστω το «τετράγωνο» που ορίζεται από τα σημεία $(0, 0)$, $(0, 8)$, $(10, 0)$, και $(10, 8)$.
- Πόσα διαφορετικά «μονοπάτια» από το $(0, 0)$ στο $(10, 8)$, αν σε κάθε βήμα μετακινούμαστε είτε κατά μια μονάδα προς τα πάνω είτε κατά μια μονάδα προς τα δεξιά.
 - Πρέπει να κάνουμε 8 βήματα Πάνω και 10 βήματα Δεξιά.
 - $\# \text{μονοπατιών} = \# \text{μεταθέσεων } 8 \text{ } \Pi \text{ και } 10 \text{ } \Delta = 18!/(10! 8!)$
- Ακολουθίες $a_1, \dots, a_n$ και $\beta_1, \dots, \beta_m$. $\#$ τρόπων καταγραφής στοιχείων των 2 ακολουθιών ώστε να διατηρείται η σειρά μεταξύ των στοιχείων της ίδιας ακολουθίας;
 - Μεταθέσεις n A και m B δείχνουν θέσεις στοιχείων κάθε ακολουθίας.
 - Δεδομένη η σειρά των στοιχείων κάθε ακολουθίας.
 - Τελικά: $(n+m)!/(n! m!)$.

Συνδυασμοί με Επανάληψη

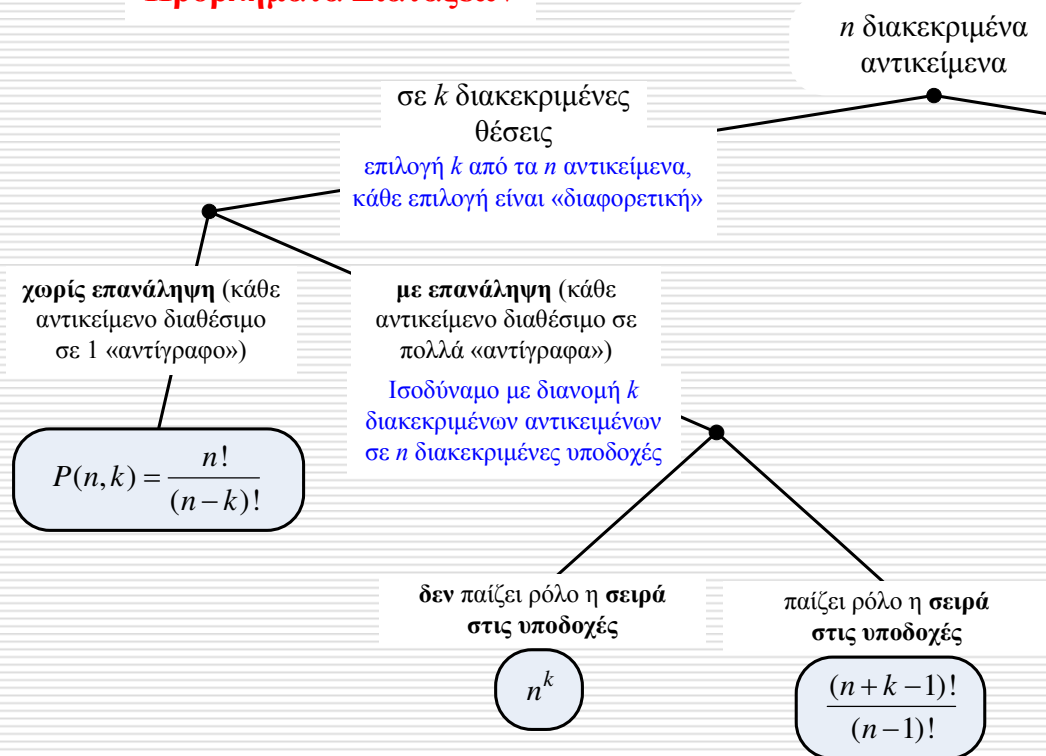
- Διαφορετικά **αποτελέσματα** από ρίψη 2 (ίδιων) ζαριών: **21**
- **Συνδυασμοί με επανάληψη**: k από n **διακεκριμένα** αντικείμενα (διαθέσιμα σε **απεριόριστα** «αντίγραφα»).
- Διανομή k **ίδιων** αντικειμένων σε n **διακεκριμένες** υποδοχές (χωρίς περιορισμό στη χωρητικότητα).

$$C(n + k - 1, k) = \frac{(n + k - 1)!}{k!(n - 1)!} = \binom{n + k - 1}{k}$$

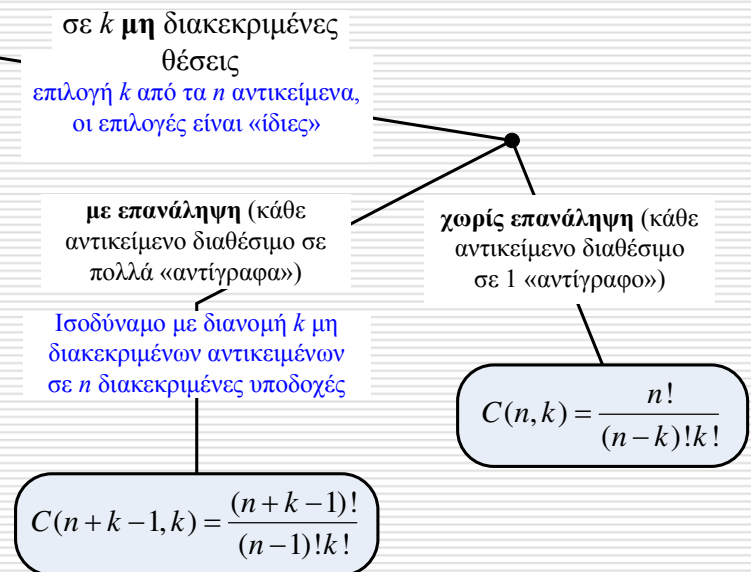
- Διανομές αντιστοιχούν σε μεταθέσεις $k - 1$ και $n - 1$ 0 .
#1 ανάμεσα σε 0 καθορίζει #αντικειμένων σε κάθε υποδοχή.
- #διανομών k **ίδιων** αντικειμένων σε n **διακεκριμένες** υποδοχές ώστε **καμία υποδοχή κενή** ($k \geq n$).
- $C(n + (k - n) - 1, k - n) = C(k - 1, k - n) = C(k - 1, n - 1)$

Ανακεφαλαίωση

Προβλήματα Διατάξεων



Προβλήματα Συνδυασμών



Μεταθέσεις ($n = k$): $P(n, n) = n!$

Μεταθέσεις n αντικειμένων όταν έχουμε k ομάδες ίδιων αντικ. με πληθύνισμο $n_1, \dots, n_k$:

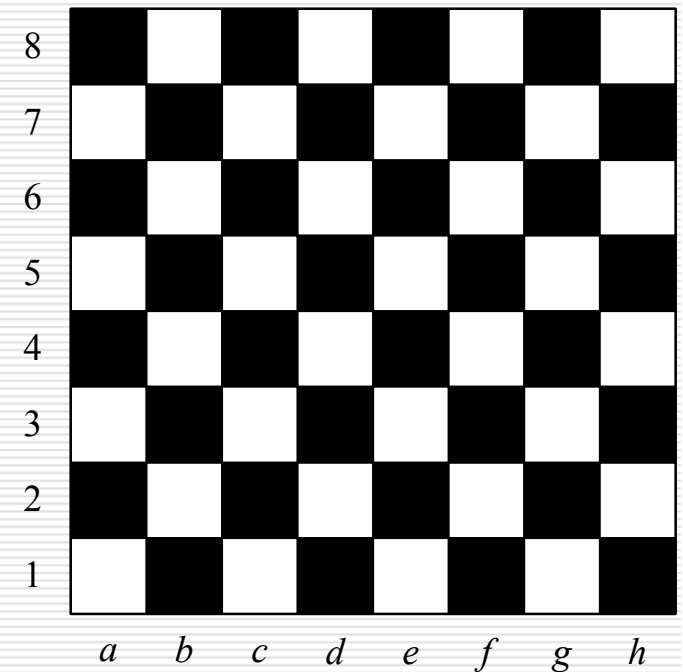
$$\frac{n!}{n_1! n_2! \dots n_k!} \quad (8)$$

Παραδείγματα

- 10 όμοιες καραμέλες σε 3 διακεκριμένα παιδιά: $\binom{3+10-1}{10} = \binom{12}{10}$
- Επιλογή 10 από 12 παιδιά (σειρά επιλογής έχει σημασία): $P(12, 10) = \frac{12!}{2!}$
- Επιλογή 10 από 12 παιδιά (σειρά επιλογής δεν έχει σημασία): $C(12, 10) = \binom{12}{10}$
- Επιλογή 10 από 3 χρώματα με επανάληψη (σειρά επιλογής δεν έχει σημασία): $\binom{3+10-1}{10} = \binom{12}{10}$
- Επιλογή 3 από 10 χρώματα με επανάληψη (σειρά επιλογής δεν έχει σημασία): $\binom{10+3-1}{3} = \binom{12}{3}$

Παραδείγματα

- #τοποθέτησης 8 (ίδιων / διακεκριμένων) πύργων σε μια σκακιέρα 8x8, ώστε να μην απειλεί ο ένας τον άλλο.
 - Ένας πύργος σε κάθε γραμμή.
Ο πύργος της 1^{ης} γραμμής με 8 τρόπους,
ο πύργος της 2^{ης} γραμμής με 7 τρόπους,
κ.ο.κ.
 - Αν πύργοι ίδιοι, συνολικά: 8! τρόποι.
 - Αν πύργοι διακεκριμένοι:
πολλαπλασιάζουμε με μεταθέσεις: 8!.
 - Συνολικά: $(8!)^2$ τρόποι.



Παραδείγματα

- 40 βουλευτές του κόμματος Α, 35 βουλευτές του κόμματος Β, και 25 βουλευτές του κόμματος Γ.
- #τρόπων να ορίσουμε 10 (μη διακεκριμένες) 3μελείς κοινοβουλευτικές ομάδες, με έναν βουλευτή από κάθε κόμμα, αν κάθε βουλευτής μπορεί να συμμετέχει σε 1 το πολύ ομάδα;
 - #τρόποι επιλογής 10 βουλευτών κόμματος Α: $C(40, 10)$.
 - #τρόποι επιλογής και «τοποθέτησης» 10 βουλ. Β: $P(35, 10)$.
 - #τρόποι επιλογής και «τοποθέτησης» 10 βουλ. Γ: $P(25, 10)$.
 - #τρόπων συνολικά: $40!35!25!/(10!30!25!15!)$.

Παραδείγματα

- #ακεραίων λύσεων της εξίσωσης $x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 20$
 - Αν $x_i \geq 0$: $C(20 + 4 - 1, 20) = C(23, 20) = C(23, 3)$
 - Αν $x_i \geq 1$: $C(16 + 4 - 1, 16) = C(19, 16) = C(19, 3)$
 - Αν $x_1 \geq 2, x_2 \geq 4, x_3 \geq 1, x_4 \geq 5$: $C(8 + 4 - 1, 8) = C(11, 3)$
- 5 διαφορετικά γράμματα (π.χ. A, B, Γ, Δ, E) και 20 κενά $_$.
#συμβ/ρών που αρχίζουν και τελειώνουν με γράμμα και έχουν ανάμεσα σε διαδοχικά γράμματα τουλάχιστον 3 κενά.
 - Μεταθέσεις 5 γραμμάτων: $5!$
 - 12 κενά στις 4 διακεκριμένες «υποδοχές» ανάμεσα σε γράμματα.
 - Υπόλοιπα 8 κενά στις 4 «υποδοχές» με $C(4 + 8 - 1, 8)$ τρόπους.
 - Τελικά: $C(11, 8) 5!$ συμβ/ρές.

Παραδείγματα

- #διμελών σχέσεων στο σύνολο A , $|A| = n$:
 - Όλες: 2^{n^2}
 - Ανακλαστικές: $2^{n(n-1)}$
 - Συμμετρικές: $2^{n(n+1)/2}$
 - Αντισυμμετρικές: $2^n \times 3^{n(n-1)/2}$

Παραδείγματα

- n θρανία στη σειρά για k φοιτητές που εξετάζονται ($n \geq 2k-1$).
#τοποθετήσεων ώστε τουλάχιστον **μία κενή θέση** ανάμεσα σε κάθε ζευγάρι φοιτητών.
 - Μεταθέσεις k φοιτητών: $k!$ (καταλαμβάνουν k θρανία).
 - Τοποθετούμε $k-1$ θρανία ανάμεσά τους.
 - Υπόλοιπα $n-2k+1$ (ίδια) θρανία στις $k+1$ διακεκριμένες «υποδοχές» στην αρχή, στο τέλος, και ανάμεσα σε φοιτητές.
 - $C((k+1) + (n-2k+1) - 1, n-2k+1) = C(n-k+1, n-2k+1)$
 $= C(n-k+1, k)$
 - Τελικά $C(n-k+1, k) k! = (n-k+1)!/(n-2k+1)!$
 - Διαφορετικά **μεταθέσεις** (με ομάδες) k διαφορετικών αντικειμένων (φοιτητών) και $n-2k+1$ **ίδιων** αντικειμένων (ελεύθερων θρανίων).

Παραδείγματα

- #συμβ/ρών μήκους 24 από 7 A, 8 B, 5 Γ, και 4 Δ όπου δεν εμφανίζεται το ΓΑ.
 - #συμβ/ρών μήκους 19 από 7 A, 8 B, και 4 Δ: $19!/(7!8!4!)$
 - Δημιουργούνται 20 διακεκριμένες «υποδοχές» για τα 5 Γ.
 - Εξαιρούνται οι 7 πριν από κάθε A.
 - Διανομή 5 Γ σε 13 διακεκριμένες «υποδοχές»: $C(13, 5)$.
 - Τελικά: $[19!/(7!8!4!)] \times [13!/(5!8!)]$.
- #συμβ/ρών μήκους 24 από 7 A, 8 B, 5 Γ, και 4 Δ όπου το πρώτο B εμφανίζεται πριν το πρώτο A.
 - #επιλογών θέσεων για 4 Δ (από 24): $C(24, 4)$.
 - #επιλογών θέσεων για 5 Γ (από 20): $C(20, 5)$.
 - Ένα B σε πρώτη διαθέσιμη θέση.
 - #επιλογών θέσεων για υπόλοιπα 7 B (από 14): $C(14, 7)$.
 - Συνολικά: $[24!/(4!5!15!)] \times [14!/(7!7!)]$.

Παραδείγματα

- #διανομών 22 διαφορ. βιβλίων πάχους 5 εκ. σε 3 διακεκριμένα ράφια μήκους 1 μ. το καθένα ώστε κανένα ράφι κενό.
 - k διακεκριμένα αντικείμενα σε n διακεκριμένες υποδοχές ώστε καμία υποδοχή κενή ($k \geq n$, πάχος βιβλίων δεν συνιστά περιορισμό).
 - Αν αντικείμενα ίδια, #διανομών: $C(k - 1, n - 1)$.
 - Αντικείμενα διαφορετικά: $C(k - 1, n - 1) \times k!$

Παραδείγματα

□ $2n+1$ κοινοβουλευτικές έδρες να μοιραστούν σε 3 κόμματα ώστε αν οποιαδήποτε 2 συμφωνούν να έχουν πλειοψηφία.

■ #διανομών $2n+1$ (ίδιες) μπάλες σε 3 διακεκριμένες υποδοχές ώστε κάθε υποδοχή $\leq n$ μπάλες.

■ #διανομών χωρίς περιορισμούς: $\binom{2n+1+3-1}{2n+1} = \binom{2n+3}{2n+1} = \binom{2n+3}{2}$

■ #διανομών όπου κάποια υποδοχή έχει $\geq n+1$ μπάλες:

□ Επιλέγουμε (με 3 τρόπους) υποδοχή με «πλειοψηφία».

□ Τοποθετούμε σε αυτή $n+1$ μπάλες.

□ #διανομών υπόλοιπων n μπαλών στις 3 υποδοχές:

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

■ Τελικά #διανομών: $\binom{2n+3}{2} - 3\binom{n+2}{2} = \frac{n(n+1)}{2}$

Διατάξεις με Επανάληψη

- #εβδομαδιαίων προγραμμάτων μελέτης για μαθήματα Μ, Φ, Χ, Ο ώστε κάθε μάθημα τουλάχιστον 1 ημέρα.
 - Αρχή εγκλεισμού – αποκλεισμού: $4^7 - |\overline{M} \cup \overline{\Phi} \cup \overline{X} \cup \overline{O}|$
 - #προγραμμάτων χωρίς (τουλ.) 1 μάθημα: 3^7 (4 περιπτώσεις).
 - #προγραμμάτων χωρίς (τουλ.) 2 μαθήματα: 2^7 (6 περιπτώσεις).
 - #προγραμμάτων χωρίς (τουλ.) 3 μαθήματα: $1^7 = 1$ (4 περιπτ.)
 - #προγραμμάτων χωρίς (τουλ.) 4 μαθήματα: 0
 - Τελικά: $4^7 - 4 \times 3^7 + 6 \times 2^7 - 4 = 8400$

Υποσύνολα Πολυσυνόλου

- #δαιρετών του 180;
 - Ανάλυση σε γινόμενο πρώτων παραγόντων: $180 = 2^2 3^2 5$.
 - #δαιρετών 180 = #υποσυνόλων $\{2:2, 3:2, 5:1\}$
 - #δαιρετών του 180 = $3 \times 3 \times 2 = 18$.
- #υποσύνολων πολυσυνόλου με k στοιχεία όπου κάθε στοιχείο p είναι διαθέσιμο σε n_p «αντίγραφα».
 - $(1+n_1)(1+n_2) \dots (1+n_k)$
 - Για #μη κενών υποσυνόλων: $(1+n_1)(1+n_2) \dots (1+n_k) - 1$
- #δαιρετών του 1400;
 - Ανάλυση σε γινόμενο πρώτων παραγόντων: $1400 = 2^3 5^2 7$.
 - #δαιρετών 1400 = #υποσυνόλων $\{2:3, 5:2, 7:1\}$
 - #δαιρετών του 1400 = $4 \times 3 \times 2 = 24$.

Εφαρμογή: Διακριτή Πιθανότητα

- Διακριτός δειγματοχώρος: αριθμήσιμο **σύνολο** Ω , όπου $\forall \omega \in \Omega$, αντιστοιχούμε $p(\omega) \in [0, 1]$ και $\sum_{\omega \in \Omega} p(\omega) = 1$
 - Γεγονός E : υποσύνολο Ω .
 - $p(E) = \sum_{\omega \in E} p(\omega)$
 - Πιθανότητα για βάρες στο τάβλι:
 - $1/36$.
 - Πιθανότητα για **6-5** στο τάβλι:
 - $2/36$.
 - Πιθανότητα για ίδιο αποτέλεσμα στα 2 ζάρια:
 - $6 \cdot 1/36 = 1/6$.
- Πιθανότητα **τουλάχιστον 2** από k (τυχαία επιλεγμένους) ανθρώπους να έχουν **γενέθλια την ίδια ημέρα**;

Εφαρμογή: Διακριτή Πιθανότητα

- Ρίχνουμε 4 (ίδια / διακ.) ζάρια. Πιθανότητα κανένα να μην φέρει 6;
 - Αφού η πιθανότητα δεν σχετίζεται με «ταυτότητα» ζαριών, δεν παίζει ρόλο αν τα ζάρια είναι διακεκριμένα ή όχι.
 - Τα θεωρούμε διακεκριμένα, ώστε όλα τα ενδεχόμενα **ισοπίθανα**.
 - Όλα τα ενδεχόμενα: $6^4 = 1296$.
Ενδεχόμενα χωρίς 6: $5^4 = 625$.
Ενδεχόμενα με τουλάχιστον ένα 6: $1296 - 625 = 671$.
- Έχουμε 10 ζευγάρια παπούτσια ανακατεμένα σε ένα ντουλάπι. Επιλέγουμε **τυχαία 8 παπούτσια** από το ντουλάπι.
 - Ποια η πιθανότητα να μην επιλέξουμε **κανένα** ζευγάρι παπουτσιών;
 - Ποια η πιθανότητα να επιλέξουμε ακριβώς **ένα** ζευγάρι παπουτσιών;

Δυωνυμικοί Συντελεστές

- Δυωνυμικό Θεώρημα: $(x + y)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^{n-k} y^k = \sum_{k=0}^n C(n, k) x^{n-k} y^k$
- Ως άμεση συνέπεια: $\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} = 2^n$
 - Προκύπτει συνδυαστικά ως #υποσυνόλων συνόλου με n στοιχεία.
 - Με $x = 1$ και $y = -1$:
$$\sum_{k=0}^n (-1)^k \binom{n}{k} = 0 \Rightarrow \binom{n}{0} + \binom{n}{2} + \binom{n}{4} + \dots = \binom{n}{1} + \binom{n}{3} + \binom{n}{5} + \dots$$
 - Απόδειξη για τύπο εγκλεισμού – αποκλεισμού: $\sum_{k=1}^n (-1)^{k+1} \binom{n}{k} = 1$
 - Για $x = 2$ και $y = 1$: $\sum_{k=0}^n 2^k \binom{n}{k} = 3^n$

Ταυτότητα του Pascal

- Ταυτότητα του Pascal: $\binom{n}{k} = \binom{n-1}{k-1} + \binom{n-1}{k}$
 - #τρόπων να επιλέξουμε k από n αντικείμενα:
 - είτε επιλέγουμε το τελευταίο και επιλέγουμε τα άλλα $k-1$ από τα υπόλοιπα $n-1$ αντικείμενα,
 - είτε δεν επιλέγουμε το τελευταίο και επιλέγουμε όλα τα k από τα υπόλοιπα $n-1$ αντικείμενα.

Τρίγωνο του Pascal

- **Αναδρομική σχέση** για υπολογισμό δυωνυμικών συντελεστών:

$$\binom{n}{k} = \begin{cases} \binom{n-1}{k-1} + \binom{n-1}{k} & \alpha\nu \ 0 < k < n \\ 1 & \text{διαφορ.} \end{cases}$$

- Η τεχνική σήμερα είναι γνωστή ως **δυναμικός προγραμματισμός.**

n n	0	1									
	1	1 1									
	2	1 2 1									
	3	1 3 3 1									
	4	1 4 6 4 1									
	5	1 5 10 10 5 1									
	6	1 6 15 20 15 6 1									
	7	1 7 21 35 35 21 7 1									
	8	1 8 28 56 70 56 28 8 1									
	9	1 9 36 84 126 126 84 36 9 1									

Ταυτότητα Vandermonde

- Ταυτότητα Vandermonde:
$$\binom{m+n}{r} = \sum_{k=0}^r \binom{m}{r-k} \binom{n}{k}$$
 - #τρόπων να επιλέξουμε r από n (αριθμημένες) πράσινες μπάλες και m (αριθμημένες) κόκκινες μπάλες:
 - Επιλέγουμε $r - k$ από m κόκκινες k από n πράσινες με $C(m, r - k) \times C(n, k)$ τρόπους.
 - Αμοιβαία αποκλειόμενα ενδεχόμενα για διαφορετικές τιμές του k .
- Άμεση συνέπεια:
$$\binom{2n}{n} = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k}^2$$

Δημιουργία Μεταθέσεων

- ... η αντικειμένων σε λεξικογραφική σειρά.
 - Συνάρτηση που επιστρέφει (λεξικογραφικά) επόμενη μετάθεση.
 - Ελάχιστη: αντικείμενα σε αύξουσα σειρά.
 - Μέγιστη: αντικείμενα σε φθίνουσα σειρά.
- Δεδομένης μετάθεσης $a_1 a_2 \dots a_n$:
 - Υπολόγισε ελάχιστη δυνατή κατάληξη που επιδέχεται (λεξικογραφικής) αύξησης.
 - Υπολογισμός επόμενης μετάθεσης (που δεν έχει εμφανιστεί ήδη ως κατάληξη) για αυτή την κατάληξη.

1 2 3 4
1 2 4 3
1 3 2 4
1 3 4 2
1 4 2 3
~~1 4 3 2~~
2 1 3 4
2 1 4 3
2 3 1 4
2 3 4 1
2 4 1 3
2 4 3 1
3 1 2 4

Δημιουργία Μεταθέσεων

- Δεδομένης μετάθεσης $a_1 a_2 \dots a_n$:
 - Μέγιστος δείκτης j τ.ω. $a_j < a_{j+1}$
(άρα $a_{j+1} > a_{j+2} > \dots a_{n-1} > a_n$)
- Επόμενη μετάθεση $a'_1 a'_2 \dots a'_n$:
 - Πρόθεμα $a_1 \dots a_{j-1}$ αμετάβλητο.
 - $a'_j =$ ελάχιστο από τα $a_{j+1}, \dots, a_n$
που «ξεπερνά» το a_j .
 - Υπόλοιπα από τα $a_j, a_{j+1}, \dots, a_n$
(εκτός αυτού που πήρε θέση j)
σε αύξουσα σειρά.
- $36\mathbf{2}541 \rightarrow 364125$
- $\mathbf{4}8765321 \rightarrow 51234678$

1 2 3 4
1 2 4 3
1 3 2 4
1 3 4 2
1 4 2 3
~~1 4 3 2~~
2 1 3 4
2 1 4 3
2 3 1 4
2 3 4 1
2 4 1 3
2 4 3 1
3 1 2 4
3 1 4 2
3 2 1 4
3 2 4 1
3 4 1 2
3 4 2 1
4 1 2 3
4 1 3 2
4 2 1 3
4 2 3 1
4 3 1 2
4 3 2 1

Δημιουργία Μεταθέσεων

- Υλοποίηση:
 - Μέγιστο j τ.ω. $a_j < a_{j+1}$.
 - Ισχύει ότι $a_{j+1} > a_{j+2} > \dots > a_n$.
 - Μετά την αντιμετάθεση των a_j και a_k , τα $a_{j+1}, \dots, a_n$ είναι ταξινομημένα σε φθίνουσα σειρά.
 - Αντιμετάθεση ζευγών $(a_{j+1}, a_n), (a_{j+2}, a_{n-1}), \dots$ κοκ. καταλήγει σε ταξινόμηση σε αύξουσα σειρά.
- Υλοποίηση χωρίς ταξινόμηση σε χρόνο $O(n)$.

```
NextPermutation( $a_1 a_2 \dots a_n$ )  
/*  $a_1 a_2 \dots a_n$  όχι τελευταία */  
   $j := n - 1$ ;  
  while  $a_j > a_{j+1}$  do  
     $j := j - 1$ ;  
   $k := n$ ;  
  while  $a_j > a_k$  do  
     $k := k - 1$ ;  
  swap( $a_j, a_k$ );  
   $r := n$ ;   $s := j + 1$ ;  
  while  $r > s$  do  
    swap( $a_r, a_s$ );  
     $r := r - 1$ ;   $s := s + 1$ ;
```

Δημιουργία Συνδυασμών

- Όλοι οι (2^n) συνδυασμοί n αντικειμένων: δημιουργία δυαδικών αριθμών μήκους n .
- Δημιουργία όλων των συνδυασμών k αντικειμένων από n σε λεξικογραφική σειρά.
 - Συνάρτηση για επόμενο συνδυασμό.
 - Αντικείμενα σε αύξουσα σειρά.
 - Ελάχιστος: $1\ 2\ \dots\ k$. Μέγιστος: $(n - k + 1)\ \dots\ n$
- Δεδομένης μετάθεσης $a_1 a_2 \dots a_n$:
 - Υπολόγισε ελάχιστη δυνατή κατάληξη που επιδέχεται αύξησης.
 - Αύξηση λαμβάνει υπόψη ότι έχουμε συνδυασμούς.

1 2 3 4
1 2 3 5
1 2 3 6
1 2 4 5
1 2 4 6
1 2 5 6
1 3 4 5
1 3 4 6
1 3 5 6

3 4 5 6

Δημιουργία Συνδυασμών

- Δεδομένου συνδυασμού $a_1 a_2 \dots a_k$:
 - Μέγιστος δείκτης j τ.ω. $a_j \neq n-k+j$
(άρα $a_{j+1} \dots a_k$ μέγιστος
συνδυασμός $k-j$ στοιχείων)
- Επόμενος συνδυασμός $a'_1 a'_2 \dots a'_k$:
 - Πρόθεμα $a_1 \dots a_{j-1}$ αμετάβλητο.
 - $a'_j = a_j + 1$.
 - Τα επόμενα στοιχεία ($a_j + 2, a_j + 3, \dots$)
στις υπόλοιπες θέσεις.

1 2 3 4
1 2 3 5
1 2 3 6
1 2 4 5
1 2 4 6
1 2 5 6
1 3 4 5
1 3 4 6
1 3 5 6
1 4 5 6
2 3 4 5
2 3 4 6
2 3 5 6
2 4 5 6
3 4 5 6

Δημιουργία Συνδυασμών

- Υλοποίηση σε χρόνο $O(k)$.

```
Next_k-Combination( $a_1 a_2 \dots a_k$ )  
/*  $a_1 a_2 \dots a_k$  όχι τελευταίος */  
   $j := k$ ;  
  while  $a_j = n - k + j$  do  
     $j := j - 1$ ;  
   $a_j := a_j + 1$ ;   $s := a_j + 1$   
  for  $i := j + 1$  to  $k$  do  
     $a_i := s$ ;   $s := s + 1$ ;
```

Παραδείγματα

- Πόσα υποσύνολα 4 στοιχείων του $A = \{1, \dots, 15\}$ **δεν** περιέχουν διαδοχικούς αριθμούς;
 - Υποσύνολο ως 4άδα (a_1, a_2, a_3, a_4) όπου $1 \leq a_1 < a_2 < a_3 < a_4 \leq 15$
 - 1-1 αντιστοιχία μεταξύ τέτοιων 4άδων (a_1, a_2, a_3, a_4) και λύσεων της εξίσωσης $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5 = 14$ στους φυσικούς με $\beta_2, \beta_3, \beta_4 \geq 1$:
$$\begin{aligned}1 + \beta_1 &= a_1 & a_1 + \beta_2 &= a_2 \\a_2 + \beta_3 &= a_3 & a_3 + \beta_4 &= a_4 \\a_4 + \beta_5 &= 15\end{aligned}$$
 - Για να μην είναι a_1, a_2, a_3, a_4 διαδοχικοί, πρέπει $\beta_2, \beta_3, \beta_4 \geq 2$.
 - Διανομή 14 ίδιων μπαλών σε 5 διαφορετικές υποδοχές, ώστε υποδοχές 2, 3, και 4 να έχουν τουλάχιστον 2 μπάλες.
 - Αποτέλεσμα: $C(12, 8) = C(12, 4) = 495$.
- Να γενικεύσετε για #υποσυνόλων k στοιχείων του $\{1, \dots, n\}$ που **δεν** περιέχουν διαδοχικούς αριθμούς.