

**ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ
ΣΥΝΟΛΩΝ**

(συγγραφή υπό εξέλιξη)

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΓΡΗΓΟΡΙΑΔΗΣ

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών
Επιστημών Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80, Αθήνα
Ηλεκτρονική Διεύθυνση: vgregoriades@math.ntua.gr

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	1
1.1. Ορολογία και συμβολισμοί	1
1.2. Αριθμήσιμα και υπεραριθμήσιμα σύνολα	2
1.3. Στοιχεία μετρικών χώρων και τοπολογίας	3
Κεφάλαιο 2. Πολωνικοί Χώροι	9
2.1. Ορισμός και αρχικά αποτελέσματα	9
2.2. Πεπερασμένες ακολουθίες	14
2.3. Οι χώροι του Baire και Cantor	16
2.4. Το Θεώρημα Cantor-Bendixson	22
2.5. Δένδρα	24
Κεφάλαιο 3. Βασικές κλάσεις συνόλων και ιεράρχηση	33
3.1. Θεμελιώδεις τελεστές και η έννοια της κλάσης	33
3.2. Οι κλάσεις Borel συνόλων πεπερασμένης τάξης	42
3.3. Οι προβολικές κλάσεις συνόλων	48
3.4. Γ-μετρησιμότητα	53
3.5. Παραμετρικοποίηση και Καθολικά Σύνολα	53
3.6. Γ-πληρότητα	53
3.7. Η ιδιότητα της ομαλοποίησης (uniformization property)	53
Κεφάλαιο 4. Borel σύνολα	55
4.1. Θεμελιώδεις ιδιότητες	55
4.2. Borel-μετρησιμότητα	58
4.3. Ο χώρος Effros-Borel	62
4.4. Οι κλάσεις Borel συνόλων υπεπεπερασμένης τάξης	62
Κεφάλαιο 5. Αναλυτικά σύνολα	63
5.1. Ιδιότητες και χαρακτηρισμοί	63
5.2. Τα Θεωρήματα Διαχωρισμού των Lusin και Suslin	65
5.3. Το Θεώρημα Τέλειου Συνόλου	67
5.4. Το Θεώρημα Kunen-Martin	67
5.5. Μετρησιμότητα των Αναλυτικών Συνόλων	67
5.6. Αναλυτικά Σύνολα και Ομαλοποίηση	67
Λύσεις Ασκήσεων και Υποδείξεις	69
Βιβλιογραφία	83

Εισαγωγή

1.1. Ορολογία και συμβολισμοί

Με \mathbb{N} , \mathbb{Z} , \mathbb{Q} και \mathbb{R} εννοούμε τα σύνολα των φυσικών, ακεραίων, ρητών και πραγματικών αριθμών αντίστοιχα, όπου στο \mathbb{N} συμπεριλαμβάνουμε και το 0, έτσι που

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

Το **δυναμοσύνολο** $\mathcal{P}(X)$ ενός συνόλου X είναι το σύνολο όλων των υποσυνόλων του X .

Δοσμένων δύο μη κενών συνόλων X και Y συμβολίζουμε με Y^X το **σύνολο όλων των συναρτήσεων** από το X στο Y . Αν $(X_i)_{i \in I}$ είναι μια οικογένεια μη κενών συνόλων συμβολίζουμε με $\prod_{i \in I} X_i$ την οικογένεια όλων των συναρτήσεων $f : I \rightarrow \bigcup_{i \in I} X_i$ με $f(i) \in X_i$ για κάθε $i \in I$. Στην περίπτωση όπου $X_i = X$ για κάθε $i \in I$ τότε το σύνολο $\prod_{i \in I} X_i$ είναι προφανώς το X^I . Θα μας απασχολήσουν ιδιαίτερα σύνολα της μορφής $X^{\mathbb{N}}$.

Μια ένα-προς-ένα συνάρτηση θα καλείται και **μονομορφισμός** ενώ μια επί συνάρτηση θα καλείται και **επιμορφισμός**. Με τον όρο **ισομορφισμός** ή **αντιστοιχία** εννοούμε μια συνάρτηση που είναι ένα-προς-ένα και επί. Επίσης συμβολίζουμε

$$\begin{aligned} f : X &\rightarrow Y \iff \eta \ f \ \text{είναι} \ \text{μονομορφισμός}, \\ f : X &\twoheadrightarrow Y \iff \eta \ f \ \text{είναι} \ \text{επιμορφισμός}, \\ f : X &\xrightarrow{\text{bij}} Y \iff \eta \ f \ \text{είναι} \ \text{ισομορφισμός}. \end{aligned}$$

Αν $f \in Y^X$, $A \subseteq X$ και $B \subseteq Y$ συμβολίζουμε με $f[A]$ την **εικόνα** του A κάτω από την f και με $f^{-1}[B]$ την **αντίστροφη εικόνα** του B κάτω από την f , δηλαδή

$$\begin{aligned} f[A] &= \{y \in Y \mid \text{υπάρχει } x \in X \text{ με } f(x) = y\} \\ f^{-1}[B] &= \{x \in X \mid f(x) \in B\}. \end{aligned}$$

Ο **περιορισμός** μιας συνάρτησης $f : X \rightarrow Y$ στο σύνολο $A \subseteq X$ συμβολίζεται με $f|_A$. Στις συναρτήσεις $f : X \rightarrow Y$ συμπεριλαμβάνουμε και τις περιπτώσεις όπου τα X, Y είναι κενά με την προϋπόθεση ότι δεν έχουμε $X \neq \emptyset$ και $Y = \emptyset$. Αν έχουμε μια συνάρτηση $f : X \rightarrow Y$ και τουλάχιστον ένα από τα X, Y είναι το κενό σύνολο τότε θα λέμε ότι η f είναι η **κενή συνάρτηση**. Θεωρούμε ότι η κενή συνάρτηση είναι πάντα μονομορφισμός και πως η $f : \emptyset \rightarrow \emptyset$ είναι ισομορφισμός.

Πολλές φορές όταν γράφουμε μαθηματικές προτάσεις θα χρησιμοποιούμε τους λογικούς τελεστές της **διάζευξης** \vee , **σύζευξης** $\&$, **άρνησης** \neg , και λογικής **συνεπαγωγής** \rightarrow , που ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} P(x) \vee Q(y) &\iff \text{το } x \ \text{έχει} \ \text{την} \ \text{ιδιότητα} \ P \ \text{ή} \ \text{το } y \ \text{την} \ Q \\ P(x) \& Q(y) &\iff \text{το } x \ \text{έχει} \ \text{την} \ \text{ιδιότητα} \ P \ \text{και} \ \text{το } y \ \text{την} \ Q \\ \neg P(x) &\iff \text{το } x \ \text{δεν} \ \text{έχει} \ \text{την} \ \text{ιδιότητα} \ P \\ P(x) \rightarrow Q(y) &\iff \text{αν} \ \text{το } x \ \text{έχει} \ \text{την} \ \text{ιδιότητα} \ P \ \text{τότε} \ \text{το } y \ \text{έχει} \ \text{την} \ Q. \end{aligned}$$

Με τον όρο “ποσοδείκτης” εννοούμε είτε το \exists (υπαρξιακός ποσοδείκτης) είτε το \forall (καθολικός ποσοδείκτης). Όταν γράφουμε λογικές προτάσεις με σύμβολα θα παραλείψουμε τις παρενθέσεις όσο είναι δυνατόν. Για παράδειγμα με

$$\exists i \in I \forall j \in J (i, j) \in A$$

εννοούμε ότι υπάρχει ένα στοιχείο i του I έτσι ώστε για κάθε στοιχείο j του J ισχύει $(i, j) \in A$.

Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι ποσοδείκτες με “κενό πεδίο” δηλαδή οι εκφράσεις $\exists i \in I$ και $\forall i \in I$ όπου I είναι το κενό σύνολο. Κάθε έκφραση της μορφής

$$\exists i \in I P(i)$$

για $I = \emptyset$ είναι πάντα ψευδής γιατί είναι λογικά ισοδύναμη με την $\exists i (i \in \emptyset \ \& \ P(i))$. Από την άλλη κάθε έκφραση της μορφής

$$\forall i \in I P(i)$$

για $I = \emptyset$ είναι πάντα αληθής γιατί είναι λογικά ισοδύναμη με την $\forall i (i \notin \emptyset \ \vee \ P(i))$.

1.2. Αριθμήσιμα και υπεραριθμήσιμα σύνολα

Δύο σύνολα A, B ονομάζονται **ισοπληθικά** αν υπάρχει μια ένα-προς-ένα και επί συνάρτηση $f : A \rightarrow B$. Σε αυτή την περίπτωση γράφουμε $A =_c B$. Αντιλαμβανόμαστε τη σχέση $=_c$ ως μαθηματική έκφραση της διαισθητικής έννοιας “το A έχει το ίδιο πλήθος στοιχείων με το B ”. Η θεώρησή μας ότι η κενή συνάρτηση $f : \emptyset \rightarrow \emptyset$ είναι ένα-προς-ένα και επί εκφράζει τη βασική αρχή ότι το κενό σύνολο έχει τον ίδιο αριθμό στοιχείων με τον εαυτό του, συγκεκριμένα καθόλου στοιχεία.

Θα λέμε ότι το σύνολο A έχει **πληθάρθιο μικρότερο ή ίσο** από το B και θα γράφουμε $A \leq_c B$ αν υπάρχει μια ένα-προς-ένα συνάρτηση $f : A \rightarrow B$. Αντιλαμβανόμαστε την έκφραση \leq_c ως μαθηματική έκφραση της διαισθητικής έννοιας “το A έχει μικρότερο ή ίσο πλήθος στοιχείων από το B ”. Η θεώρησή μας ότι η κενή συνάρτηση $f : \emptyset \rightarrow B$ είναι πάντα ένα-προς-ένα εκφράζει τη βασική αρχή ότι το κενό σύνολο έχει πάντα λιγότερα στοιχεία από οποιοδήποτε μη κενό σύνολο.

Οι πιο πάνω ορισμοί θα είχαν μικρό νόημα αν δεν επαλήθευαν την εξής θεμελιώδη απαίτηση:

αν

το A έχει μικρότερο ή ίσο πλήθος στοιχείων από το B και
το B έχει μικρότερο ή ίσο πλήθος στοιχείων από το A

τότε

το A και το B έχουν το ίδιο πλήθος στοιχείων.

Αυτό ικανοποιείται για τους πιο πάνω ορισμούς από το επόμενο αποτέλεσμα.

Θεώρημα 1.2.1 (Schröder-Bernstein). *Για όλα τα σύνολα A, B αν $A \leq_c B$ και $B \leq_c A$ τότε $A =_c B$.*

Ένα σύνολο A είναι **πεπερασμένο** αν είναι ίσοπληθικό με το σύνολο $\{i \in \mathbb{N} \mid i < n\}$ για κάποιο $n \in \mathbb{N}$. Όταν $n = 0$ το τελευταίο σύνολο είναι το κενό έτσι που το κενό σύνολο είναι πεπερασμένο. Το A είναι **αριθμήσιμο** αν είναι πεπερασμένο ή ισοπληθικό με το \mathbb{N} . Όπως είναι γνωστό τα ακόλουθα είναι ισοδύναμα:

- το A είναι αριθμήσιμο,
- $A \leq_c \mathbb{N}$,
- $A = \emptyset$ ή υπάρχει επιμορφισμός $\pi : \mathbb{N} \rightarrow A$ (όχι απαραίτητα ένα-προς-ένα).

Ο τελευταίος χαρακτηρισμός λέει ότι τα αριθμήσιμα σύνολα είναι ακριβώς αυτά που επιδέχονται μια απαρίθμηση $A = \{\pi(0), \pi(1), \dots, \pi(n), \dots\} = \{x_0, x_1, \dots, x_n, \dots\}$, χωρίς να μας απασχολεί αν κάποιες τιμές επαναλαμβάνονται, δηλαδή επιτρέπουμε $\pi(n) = \pi(m)$ για $n \neq m$.

Μερικά βασικά αποτελέσματα στα αριθμήσιμα σύνολα είναι τα εξής:

- Αν $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ είναι μια ακολουθία από αριθμήσιμα σύνολα τότε η ένωση $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n$ είναι αριθμήσιμο σύνολο.
- Αν τα A_0, \dots, A_n είναι αριθμήσιμα σύνολα τότε το καρτεσιανό γινόμενο $A_0 \times \dots \times A_n$ είναι αριθμήσιμο σύνολο.
- Αν το B είναι αριθμήσιμο σύνολο και $A \leq_c B$ τότε το A είναι αριθμήσιμο σύνολο.

Από τα προηγούμενα προκύπτει εύκολα ότι οι ακέραιοι αριθμοί $\mathbb{Z} = \mathbb{N} \cup (-1) \cdot \mathbb{N}$ και οι ρητοί αριθμοί $\mathbb{Q} \leq_c \mathbb{Z} \times \mathbb{N}$ είναι αριθμήσιμα σύνολα. Συνεπώς $\mathbb{N} =_c \mathbb{Z} =_c \mathbb{Q}$. Άλλες γνωστές ισοπληθικότητες είναι:

$\mathbb{N} =_c$ το σύνολο όλων των αλγεβρικών αριθμών,

$\mathbb{R} =_c \mathcal{P}(\mathbb{N}) =_c \{0, 1\}^{\mathbb{N}} =_c \mathbb{N}^{\mathbb{N}}$,

$\mathbb{R} =_c (a, b) =_c [a, b) =_c (a, b] =_c [a, b]$ όπου $a < b$,

$\mathbb{R} =_c C([0, 1]) =$ το σύνολο όλων των συνεχών συναρτήσεων $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$,

$\mathbb{R} =_c \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q} =$ το σύνολο όλων των άρρητων αριθμών.

Θα λέμε ότι ένα σύνολο A έχει τον **πληθάριθμο του συνεχούς** αν $A =_c \mathbb{R}$ και ότι το A έχει **πληθάριθμο μικρότερο ή ίσο του συνεχούς** αν $A \leq_c \mathbb{R}$.

Σε όλα τα προηγούμενα παραδείγματα βλέπουμε ότι όπου έχουμε ένα άπειρο υποσύνολο A του \mathbb{R} ισχύει είτε $A =_c \mathbb{N}$ είτε $A =_c \mathbb{R}$. Ο Cantor, θεμελιωτής της θεωρίας συνόλων, έθεσε το ερώτημα κατά πόσον αυτό το συμπέρασμα ισχύει για όλα τα υποσύνολα του \mathbb{R} . Αυτή η πρόταση έγινε γνωστή ως

Υπόθεση του Συνεχούς (Continuum Hypothesis).

Για κάθε άπειρο $A \subseteq \mathbb{R}$ ισχύει είτε $A =_c \mathbb{N}$ είτε $A =_c \mathbb{R}$.

Όπως αποδείχθηκε από τους Gödel (1940) και Cohen (1963) η Υπόθεση του Συνεχούς είναι *ανεξάρτητη* από τα συνήθη αξιώματα των μαθηματικών. Δηλαδή δεν μπορεί ούτε να αποδειχθεί (Cohen) αλλά ούτε και να διαψευστεί (Gödel) με εργαλεία τα συνηθισμένα αξιώματα που δεχόμαστε στα μαθηματικά.

Από την άλλη έγινε γρήγορα γνωστό πως κάθε κλειστό υποσύνολο του \mathbb{R} ικανοποιεί την Υπόθεση του Συνεχούς. Βλέπουμε λοιπόν ότι η προσθήκη μιας τοπολογικής συνθήκης απαντά θετικά στο πρόβλημα. Θα δούμε ότι η Υπόθεση του Συνεχούς επαληθεύεται από πολύ περισσότερα “ορίσιμα” σύνολα.

Τέλος αναφέρουμε το γνωστό αποτέλεσμα του Cantor ότι για κάθε σύνολο A έχουμε $A <_c \mathcal{P}(A)$, δηλαδή $A \leq_c \mathcal{P}(A)$ και $A \neq_c \mathcal{P}(A)$. Συνεπώς υπάρχουν σύνολα με μεγαλύτερη πληθικότητα από το \mathbb{R} , το $\mathcal{P}(\mathbb{R})$ για παράδειγμα. Από την άλλη τα σύνολα με τα οποία θα ασχοληθούμε είναι συνήθως $\leq_c \mathbb{R}$.

1.3. Στοιχεία μετρικών χώρων και τοπολογίας

Δίνουμε μια σύντομη ανασκόπηση των εννοιών που θα χρειαστούμε. **Μετρική** σε ένα μη κενό σύνολο X είναι μια συνάρτηση $d : X \times X \rightarrow \mathbb{R}$ με τις ιδιότητες

$$d(x, y) \geq 0 \text{ και } d(x, y) = 0 \iff x = y$$

$$d(x, y) = d(y, x)$$

$$d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, x)$$

όπου $x, y \in X$. Το ζεύγος (X, d) ονομάζεται **μετρικός χώρος**.

Η διακριτή μετρική σε ένα σύνολο X είναι η

$$d(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{αν } x \neq y, \\ 0, & \text{αν } x = y, \end{cases} \quad \text{όπου } x, y \in X.$$

Εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά θα θεωρούμε τα σύνολα \mathbb{N} , \mathbb{Z} , \mathbb{Q} και \mathbb{R} με τη **συνήθη μετρική** της απόστασης $\sigma(x, y) = |x - y|$.

Στους επόμενους ορισμούς θεωρούμε ότι μας δίνεται ένας μετρικός χώρος (X, d) . Για κάθε μη κενό $Y \subseteq X$ μπορούμε να πάρουμε τον *περιορισμό* d_Y της μετρικής d στο σύνολο Y , δηλαδή $d_Y(x, y) = d(x, y)$ για κάθε $x, y \in Y$. Ο (Y, d_Y) θα λέγεται **υπόχωρος** του (X, d) .

Αν $x \in X$ και $r > 0$ η **ανοικτή μπάλα** κέντρου x και ακτίνας r στον (X, d) είναι το σύνολο

$$B_d^X(x, r) \equiv B_d(x, r) \equiv B(x, r) = \{y \in X \mid d(x, y) < r\}.$$

Το σημείο x είναι **εσωτερικό σημείο** του $A \subseteq X$ αν υπάρχει $r > 0$ με $B_d(x, r) \subseteq A$. Το A είναι **ανοικτό** αν κάθε $x \in A$ είναι εσωτερικό σημείο του A .

Το **εσωτερικό** A° του A είναι το σύνολο όλων των εσωτερικών σημείων του A , ισοδύναμα

$$A^\circ = \bigcup \{V \subseteq X \mid V: \text{ανοικτό και } V \subseteq A\}.$$

Μια ακολουθία $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ στον X **συγκλίνει** στο $x \in X$ ως προς την μετρική d αν $\lim_{n \rightarrow \infty} d(x_n, x) \rightarrow 0$. Γράφουμε $x_n \xrightarrow{d} x$ ή πιο απλά $x_n \rightarrow x$ όταν η d είναι σαφής από το κείμενο, για να δηλώσουμε ότι η $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ συγκλίνει στο x . Λέμε ότι η $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ **στοιχείων** του $A \subseteq X$ είναι **συγκλίνουσα** στο A αν υπάρχει $x \in A$ με $x_n \rightarrow x$.

Ένα $x \in X$ είναι **οριακό σημείο** του $A \subseteq X$ αν υπάρχει μια ακολουθία $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ στο A με $x_n \rightarrow x$ ως προς d . Επιτρέπουμε $x_n = x$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$, έτσι που κάθε στοιχείο του A είναι και οριακό σημείο του A . Το x είναι **σημείο συσσώρευσης** του A αν υπάρχει ακολουθία $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ στο A με $x_n \rightarrow x$ και $x_n \neq x$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$.

Το σημείο $x \in A$ είναι **μεμονωμένο σημείο** του $A \subseteq X$ αν υπάρχει $r > 0$ με $B(x, r) \cap A = \{x\}$. Είναι σαφές ότι τα οριακά σημεία του A είναι ακριβώς τα μεμονωμένα σημεία μαζί με τα σημεία συσσώρευσης του A .

Το A είναι **κλειστό** αν περιέχει όλα τα οριακά του σημεία (ισοδύναμα περιέχει όλα τα σημεία συσσώρευσής τους) ενώ το A είναι **τέλειο** αν είναι κλειστό και δεν έχει μεμονωμένα σημεία.

Η κλειστότητα \bar{A} του A είναι το σύνολο όλων των οριακών σημείων του A , ισοδύναμα

$$\bar{A} = \bigcap \{F \subseteq X \mid F: \text{κλειστό και } F \supseteq A\}.$$

Προφανώς $A^\circ \subseteq A \subseteq \bar{A}$, το A είναι ανοικτό αν και μόνο αν $A = A^\circ$ και το A είναι κλειστό αν και μόνο αν $A = \bar{A}$. Όπως είναι γνωστό το A είναι ανοικτό αν και μόνο αν το συμπλήρωμα $X \setminus A$ είναι κλειστό.

Ένα $D \subseteq X$ είναι **πυκνό** στον (X, d) αν για κάθε $x \in X$ και κάθε $r > 0$ ισχύει $B_d(x, r) \cap D \neq \emptyset$. Προφανώς αν το D είναι πυκνό υποσύνολο του (X, d) τότε κάθε στοιχείο του X είναι όριο ακολουθίας του D . Ο μετρικός χώρος (X, d) είναι **διαχωριστικός** αν έχει αριθμήσιμο πυκνό υποσύνολο.

Ένα $K \subseteq X$ είναι **συμπαγές** αν για κάθε οικογένεια $(V_i)_{i \in I}$ ανοικτών υποσυνόλων του X με $K \subseteq \bigcup_{i \in I} V_i$ υπάρχουν $i_1, \dots, i_n \in I$ με $K \subseteq \bigcup_{t=1}^n V_{i_t}$, δηλαδή για κάθε ανοικτό κάλυμμα του K υπάρχει πεπερασμένο υποκάλυμμα. Η συμπαγεία στους μετρικούς χώρους είναι ισοδύναμη με την **ακολουθιακή συμπαγεία**, δηλαδή το K είναι συμπαγές αν και μόνο αν για κάθε ακολουθία $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ στοιχείων του υπάρχει υποακολουθία $(x_{m_n})_{n \in \mathbb{N}}$ που συγκλίνει σε κάποιο $x \in K$. Κάθε συμπαγές σύνολο είναι κλειστό.

Μια συνάρτηση $f : (X, d) \rightarrow (Y, \rho)$ ανάμεσα σε μετρικούς χώρους είναι **συνεχής στο σημείο** $x \in X$ αν για κάθε $r > 0$ υπάρχει $\delta > 0$ έτσι ώστε $f[B_d(x, \delta)] \subseteq$

$B_\rho(f(x), r)$, ισοδύναμα για κάθε $V \subseteq Y$ που είναι ρ -ανοικτό υπάρχει $W \subseteq X$ που είναι d -ανοικτό έτσι ώστε $f[W] \subseteq V$. Σύμφωνα με την *Αρχή Μεταφοράς* η f είναι συνεχής στο x αν και μόνο αν για κάθε ακολουθία $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ στον X με $x_n \xrightarrow{d} x$ ισχύει $f(x_n) \xrightarrow{\rho} f(x)$.

Η συνάρτηση f είναι **συνεχής** αν είναι συνεχής σε κάθε $x \in X$ ή ισοδύναμα για κάθε ανοικτό $V \subseteq Y$ η αντίστροφη εικόνα $f^{-1}[V]$ είναι ανοικτό υποσύνολο του X . Τέλος θα λέμε ότι η f είναι **τοπολογικός ισομορφισμός**.

Δύο μετρικές d_1 και d_2 στο σύνολο X είναι **ισοδύναμες**, συμβολικά $d_1 \sim d_2$ αν παράγουν την ίδια τοπολογία, δηλαδή για κάθε $V \subseteq X$ το V είναι d_1 -ανοικτό αν και μόνο αν το V είναι d_2 -ανοικτό. Ισοδύναμα $d_1 \sim d_2$ αν και μόνο αν η **ταυτοτική συνάρτηση**

$$\text{id} : (X, d_1) \rightarrow (X, d_2)$$

είναι τοπολογικός ισομορφισμός, ισοδύναμα για κάθε ακολουθία $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ στο σύνολο X και κάθε $x \in X$ ισχύει

$$x_n \xrightarrow{d_1} x \iff x_n \xrightarrow{d_2} x.$$

Για κάθε μετρικό χώρο (X, d_1) οι συναρτήσεις

$$d_2 = \min\{d_1, 1\} \quad \text{και} \quad d_3 = \frac{d_1}{1 + d_1}$$

είναι μετρικές ισοδύναμες με την d_1 . Παρατηρούμε ότι $d_2, d_3 \leq 1$, γι' αυτό είναι σύνηθες να θεωρείται ότι η μετρική παίρνει τιμές μικρότερες ή ίσες από τη μονάδα.

Η οικογένεια των ανοικτών υποσυνόλων του X ικανοποιεί τις εξής βασικές ιδιότητες: (α) το κενό σύνολο \emptyset και το X είναι ανοικτά συνόλα, (β) οποιαδήποτε ένωση ανοικτών συνόλων είναι ανοικτό, και (γ) η πεπερασμένη τομή ανοικτών συνόλων είναι ανοικτό.

Μια οικογένεια \mathcal{T} υποσυνόλων του X ονομάζεται **τοπολογία** στο X αν περιέχει το κενό σύνολο \emptyset και το X , για κάθε οικογένεια $(A_i)_{i \in I}$ συνόλων της \mathcal{T} έχουμε $\bigcup_{i \in I} A_i \in \mathcal{T}$, και για κάθε $A_1, \dots, A_n \in \mathcal{T}$ έχουμε $\bigcap_{k=1}^n A_k \in \mathcal{T}$. Με άλλα λόγια μια τοπολογία ικανοποιεί τις προηγούμενες ιδιότητες (α), (β), (γ) των ανοικτών συνόλων ή αλλιώς η οικογένεια των ανοικτών συνόλων ενός μετρικού χώρου αποτελεί τοπολογία. Αυτή την οικογένεια, δηλαδή την οικογένεια των ανοικτών υποσυνόλων ενός μετρικού χώρου (X, d) θα τη λέμε **η τοπολογία του (X, d)** .

Ενα ζεύγος (X, \mathcal{T}) λέγεται **τοπολογικός χώρος** αν το \mathcal{T} είναι τοπολογία στο X . Τα στοιχεία της \mathcal{T} λέγονται **ανοικτά** σύνολα του τοπολογικού χώρου. Τα **κλειστά** υποσύνολα ενός τοπολογικού χώρου είναι τα συμπληρώματα ανοικτών. Ένας τοπολογικός χώρος (X, \mathcal{T}) είναι **μετρικοποιήσιμος** ή πιο απλά η \mathcal{T} είναι **μετρικοποιήσιμη** αν υπάρχει μετρική d στο X ώστε η \mathcal{T} να είναι η τοπολογία του (X, d) , δηλαδή η οικογένεια των d -ανοικτών υποσυνόλων του X .

Δεν θα μας απασχολήσουν ιδιαίτερα τοπολογικοί χώροι που δεν είναι μετρικοποιήσιμοι αλλά είναι χρήσιμο να δούμε μερικές έννοιες μέσα στο πλαίσιο των τοπολογιών χώρων. Για παράδειγμα οι έννοιες της σύγκλισης και συνέχειας επεκτείνονται στο πλαίσιο των τοπολογικών χώρων αντικαθιστώντας τα d -ανοικτά σύνολα με τα στοιχεία της τοπολογίας.

Μια οικογένεια \mathcal{V} από υποσύνολα ενός τοπολογικού χώρου (X, \mathcal{T}) είναι **βάση της τοπολογίας** του X ή πιο απλά **βάση** του X αν $\mathcal{V} \subseteq \mathcal{T}$ και κάθε $U \in \mathcal{T}$ είναι ίσο με ένωση (πεπερασμένη ή άπειρη) στοιχείων της \mathcal{V} , δηλαδή υπάρχει οικογένεια $(B_i)_{i \in I}$ στοιχείων της \mathcal{V} με $U = \bigcup_{i \in I} B_i$. Στους μετρικούς χώρους αυτό σημαίνει ότι κάθε στοιχείο της \mathcal{V} είναι ανοικτό σύνολο και κάθε ανοικτό σύνολο γράφεται ως ένωση στοιχείων της \mathcal{V} .

Αν το D είναι πυκνό υποσύνολο ενός μετρικού χώρου (X, d) τότε το σύνολο

$$\mathcal{V} = \{B_d(x, q) \mid q \in \mathbb{Q}, q > 0\}$$

αποτελεί βάση για την τοπολογία του (X, d) . Ειδικότερα αν ο X είναι διαχωρίσιμος τότε η τοπολογία του έχει αριθμήσιμη βάση (χρησιμοποιούμε ότι το σύνολο $\mathbb{N} \times \mathbb{Q}$ είναι

αριθμήσιμο). Ισχύει και το αντίστροφο: κάθε μετρικός χώρος που έχει αριθμήσιμη βάση είναι διαχωρίσιμος.

Μια ακολουθία $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ στον (X, d) είναι **Cauchy** ή **βασική** αν για κάθε $r > 0$ υπάρχει $n_0 \in \mathbb{N}$ έτσι ώστε για κάθε $n, m \geq n_0$ ισχύει $d(x_n, x_m) < r$. Ο μετρικός χώρος (X, d) είναι **πλήρης** αν κάθε ακολουθία Cauchy είναι συγκλίνουσα στον (X, d) .

Όπως είναι γνωστό η ιδιότητα της πληρότητας *δεν διατηρείται* κάτω από τοπολογικούς ισομορφισμούς ακόμα και αν ο ισομορφισμός είναι η ταυτοτική συνάρτηση. Ως παράδειγμα θεωρούμε το σύνολο $X = \{2^{-n} \mid n \in \mathbb{N}\}$ με τις μετρικές

$$\rho(x, y) = |x - y|$$

$$d(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{αν } x \neq y, \\ 0, & \text{αν } x = y, \end{cases} \quad (\text{διακριτή μετρική}).$$

Τότε κάθε $A \subseteq X$ είναι ρ -ανοικτό όπως επίσης και d -ανοικτό. Ειδικότερα οι δύο μετρικές είναι ισοδύναμες και η ταυτοτική συνάρτηση $\text{id} : (X, \rho) \rightarrow (X, d)$ είναι τοπολογικός ισομορφισμός. Επιπλέον ο (X, d) είναι πλήρης μετρικός χώρος. Από την άλλη η ακολουθία $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ με $x_n = 2^{-n}$, $n \in \mathbb{N}$, είναι ρ -Cauchy η οποία όμως δεν συγκλίνει ως προς την ρ σε κάποιο $x \in X$.

Προκύπτει από τα πιο πάνω ότι η πληρότητα *δεν επεκτείνεται* στους τοπολογικούς χώρους. Συγκεκριμένα *δεν υπάρχει* ιδιότητα τοπολογικών χώρων P έτσι ώστε για κάθε μετρική d αν η \mathcal{T} είναι μετριοποιήσιμη από την d τότε

$$\text{ο } (X, \mathcal{T}) \text{ έχει την } P \iff \text{ο } (X, d) \text{ είναι πλήρης μετρικός χώρος.}$$

Για να το δούμε αυτό παίρνουμε τους μετρικούς χώρους (X, ρ) και (X, d) του προηγούμενου παραδείγματος και βλέπουμε ότι εφόσον οι μετρικές είναι ισοδύναμες τότε παράγουν την ίδια τοπολογία \mathcal{T} . Από την άλλη ο ένας μετρικός χώρος είναι πλήρης ενώ ο άλλος όχι.

Από την άλλη όπως είναι γνωστό οι ιδιότητες της διαχωρισιμότητας και της συμπίεσης διατηρούνται κάτω από τοπολογικούς ισομορφισμούς, ή αλλιώς λέμε ότι είναι **τοπολογικές ιδιότητες**.

Τέλος αναφερόμαστε σε κάποιες συγκεκριμένες κατασκευές μετρικών χώρων από ήδη δοσμένους. Το **ευθύ άθροισμα** δύο μετρικών χώρων (X, d_X) και (Y, d_Y) είναι ο μετρικός χώρος (Z, d) με

$$Z = (\{0\} \times X) \cup (\{1\} \times Y)$$

$$d((i, x), (j, y)) = \begin{cases} d_X(x, y), & \text{αν } i = j = 0 \\ d_Y(x, y), & \text{αν } i = j = 1 \\ 1, & \text{αν } i \neq j. \end{cases}$$

Με άλλα λόγια θεωρούμε δύο ξένα αντίτυπα των X, Y και τα τοποθετούμε σε μια θετική απόσταση (π.χ. 1) το ένα από το άλλο. Θα συμβολίζουμε το ευθύ άθροισμα των (X, d_X) και (Y, d_Y) με $X \oplus Y$ και θα το εννοούμε πάντα με την πιο πάνω μετρική d .

Το **καρτεσιανό γινόμενο** των χώρων (X, d_X) και (Y, d_Y) είναι το σύνολο $X \times Y$ με τη μετρική

$$d((x_1, y_1), (x_2, y_2)) = d_X(x_1, y_1) + d_Y(x_2, y_2).$$

Εκτός και αν αναφέρεται διαφορετικά θα θεωρούμε τον $X \times Y$ με την πιο πάνω μετρική d . Με όμοιο τρόπο ορίζουμε το πεπερασμένο καρτεσιανό γινόμενο $X_1 \times \dots \times X_n$ μετρικών χώρων. Ειδικότερα στον \mathbb{R}^n θα θεωρούμε τη μετρική

$$d(\vec{x}, \vec{y}) = \sum_{k=1}^n |x_k - y_k| \quad \text{όπου } \vec{x} = (x_1, \dots, x_n), \vec{y} = (y_1, \dots, y_n) \in \mathbb{R}^n.$$

Όπου θεωρούμε την ισοδύναμη Ευκλείδεια μετρική θα το αναφέρουμε.

Αν έχουμε μια ακολουθία μετρικών χώρων $((X_n, d_n))_{n \in \mathbb{N}}$ τότε θεωρούμε τον χώρο γινόμενο $\prod_{n \in \mathbb{N}} X_n$ με τη μετρική

$$d(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} 2^{-n} \cdot \min\{d_n(x(n), y(n)), 1\},$$

όπου $x = (x(n))_{n \in \mathbb{N}}, y = (y(n))_{n \in \mathbb{N}} \in \prod_{n \in \mathbb{N}} X_n$.

Αν \mathcal{V}_n είναι βάση για την τοπολογία (ειδεχομένως και η ίδια η τοπολογία) του X_n , $n \in \mathbb{N}$, τότε μια βάση για την τοπολογία του $\prod_{n \in \mathbb{N}} X_n$ είναι η οικογένεια \mathcal{V} όλων των συνόλων της μορφής

$$V_0 \times \cdots \times V_n \times X_{n+1} \times X_{n+2} \times \cdots,$$

όπου $V_i \in \mathcal{V}_i$ για κάθε $i = 0, \dots, n$ και $n \in \mathbb{N}$.

Αν $(x_i)_{i \in \mathbb{N}}$ είναι ακολουθία στοιχείων του $\prod_{n \in \mathbb{N}} X_n$ με $x_i = (x_i(n))_{n \in \mathbb{N}}, i \in \mathbb{N}$, και $x = (x(n))_n \in \prod_{n \in \mathbb{N}} X_n$ τότε

$$x_i \rightarrow x \text{ στον } \prod_{n \in \mathbb{N}} X_n \iff \text{για κάθε } n \text{ ισχύει } x_i(n) \xrightarrow{i \rightarrow \infty} x(n) \text{ στον } X_n.$$

Οι προηγούμενες κατασκευές μετρικών χώρων σέβονται την πληρότητα και τη διαχωρισιμότητα. Δηλαδή το *ευθύ άθροισμα, πεπερασμένο και άπειρο-αριθμήσιμο γινόμενο πλήρων και διαχωρίσιμων μετρικών χώρων είναι πλήρης και διαχωρίσιμος μετρικός χώρος*.

Επίσης οι προηγούμενες κατασκευές *επεκτείνονται και στους τοπολογικούς χώρους* με τρόπο που *σέβεται τη μετρικοποιησιμότητα*.

Εξηγούμε το προηγούμενο αναλυτικά. Για το ευθύ άθροισμα δύο τοπολογικών χώρων (X, \mathcal{T}_X) και (Y, \mathcal{T}_Y) παίρνουμε όπως πιο πάνω $X \oplus Y = (\{0\} \times X) \cup (\{1\} \times Y)$ και ορίζουμε

$$V \in \mathcal{T}_{X \oplus Y} \iff V \cap X \in \mathcal{T}_X \text{ και } V \cap Y \in \mathcal{T}_Y, \text{ όπου } V \subseteq X \oplus Y.$$

Τότε η $\mathcal{T}_{X \oplus Y}$ είναι τοπολογία στο $X \oplus Y$. Μάλιστα αν οι X, Y είναι μετρικοποιήσιμοι τότε ο $(X \oplus Y, \mathcal{T}_{X \oplus Y})$ είναι μετρικοποιήσιμος με τη μετρική που αναφέραμε πιο πάνω.

Για το καρτεσιανό γινόμενο $X \times Y$ ορίζουμε

$$V \in \mathcal{V}_{X \times Y} \iff V = V_X \times V_Y$$

όπου $V_X \in \mathcal{T}_X$ και $V_Y \in \mathcal{T}_Y$. Θεωρούμε την οικογένεια $\mathcal{T}_{X \times Y}$ που προκύπτει από όλες τις ενώσεις στοιχείων της $\mathcal{V}_{X \times Y}$. Τότε η $\mathcal{T}_{X \times Y}$ είναι τοπολογία στο $X \times Y$ με βάση τη $\mathcal{V}_{X \times Y}$. Αν οι X, Y είναι μετρικοποιήσιμοι τότε ο $(X \times Y, \mathcal{T}_{X \times Y})$ είναι μετρικοποιήσιμος με τη μετρική που αναφέραμε πιο πάνω.

Το άπειρο γινόμενο ορίζεται όμοια με πριν. Αν έχουμε τοπολογικούς χώρους (X_n, \mathcal{T}_n) , $n \in \mathbb{N}$, τότε ορίζουμε τη \mathcal{V}_∞ ως την οικογένεια όλων των συνόλων της μορφής

$$(1.1) \quad V_0 \times \cdots \times V_n \times X_{n+1} \times X_{n+2} \times \cdots,$$

όπου $V_i \in \mathcal{T}_i$ για κάθε $i = 0, \dots, n$ και $n \in \mathbb{N}$. Θεωρούμε την οικογένεια \mathcal{T}_∞ όλων των ενώσεων από στοιχεία της \mathcal{V}_∞ . Τότε η \mathcal{T}_∞ είναι τοπολογία στο σύνολο $\prod_{n \in \mathbb{N}} X_n$, γνωστή και ως **τοπολογία γινόμενο**, η οποία έχει βάση την οικογένεια \mathcal{V}_∞ . Αν οι X_n , $n \in \mathbb{N}$, είναι μετρικοποιήσιμοι τότε ο $(\prod_{n \in \mathbb{N}} X_n, \mathcal{T}_\infty)$ είναι μετρικοποιήσιμος με τη μετρική που αναφέραμε πιο πάνω.

Πολωνικοί Χώροι

2.1. Ορισμός και αρχικά αποτελέσματα

Ορισμός 2.1.1. Ένας τοπολογικός χώρος (X, \mathcal{T}) είναι **Πολωνικός χώρος** αν υπάρχει μετρική d που παράγει την \mathcal{T} και ο (X, d) είναι πλήρης και διαχωρίσιμος μετρικός χώρος.

Μια μετρική d όπως πιο πάνω θα λέγεται **συμβατή ή κατάλληλη** μετρική για τον \mathcal{X} . Συνήθως θα συμβολίζουμε τους Πολωνικούς χώρους με \mathcal{X} , \mathcal{Y} , και \mathcal{Z} .

Μερικά απλά παραδείγματα Πολωνικών χώρων είναι το \mathbb{R} το \mathbb{C} και τα κλειστά υποσύνολά τους, όλα με τη συνήθη τοπολογία. Ένα τετριμμένο αλλά χρήσιμο παράδειγμα Πολωνικού χώρου είναι το σύνολο των φυσικών αριθμών \mathbb{N} με τη συνήθη μετρική, η οποία είναι ισοδύναμη με τη διακριτή και κάθε υποσύνολο του \mathbb{N} είναι ανοικτό.

Το ανοικτό διάστημα $(0, 1)$ με τη συνήθη μετρική είναι διαχωρίσιμος αλλά όχι πλήρης μετρικός χώρος. Όπως θα δούμε πιο κάτω υπάρχει μια ισοδύναμη μετρική ως προς την οποία είναι πλήρης και συνεπώς το $(0, 1)$ είναι Πολωνικός χώρος.

Πρόταση 2.1.2. Δίνεται ένας Πολωνικός χώρος \mathcal{X} και ένας τοπολογικός χώρος Y . Αν οι \mathcal{X} , Y είναι τοπολογικά ισομορφικοί τότε και ο Y είναι Πολωνικός χώρος.

Απόδειξη. Θεωρούμε μια συμβατή μετρική d για τον \mathcal{X} και έναν τοπολογικό ισομορφισμό $f : Y \rightarrow (\mathcal{X}, d)$. Ορίζουμε τη συνάρτηση $\rho : Y \times Y \rightarrow \mathbb{R}$ με

$$\rho(y_1, y_2) = d(f(x_1), f(x_2)).$$

Εύκολα μπορεί να δει κανείς ότι η ρ είναι μετρική στο Y . Εξ ορισμού η

$$f : (Y, \rho) \rightarrow (\mathcal{X}, d)$$

είναι ισομετρία και επί. Προκύπτει ότι ο (Y, ρ) είναι πλήρης και διαχωρίσιμος μετρικός χώρος (Άσκηση 2.1.10).

Τέλος δείχνουμε ότι η ρ παράγει την τοπολογία του Y . Για κάθε $A \subseteq Y$ που είναι ανοικτό στην τοπολογία του Y το σύνολο $(f^{-1})^{-1}[A] = f[A]$ είναι d -ανοικτό γιατί η $f^{-1} : (\mathcal{X}, d) \rightarrow Y$ είναι συνεχής. Επομένως το σύνολο $A = f^{-1}[f[A]]$ είναι ρ -ανοικτό γιατί η $f : (Y, \rho) \rightarrow (\mathcal{X}, d)$ είναι συνεχής. Αντίστροφα θεωρούμε ότι το $B \subseteq Y$ είναι ρ -ανοικτό. Επειδή η $f^{-1} : (\mathcal{X}, d) \rightarrow (Y, \rho)$ είναι συνεχής το σύνολο $(f^{-1})^{-1}[B] = f[B]$ είναι d -ανοικτό και εφόσον η $f : Y \rightarrow (\mathcal{X}, d)$ είναι συνεχής το $B = f^{-1}[f[B]]$ είναι ανοικτό στην τοπολογία του Y . \square

Πόρισμα 2.1.3. Κάθε ανοικτό διάστημα (a, b) με $a < b$ του \mathbb{R} με την τοπολογία που παράγει η συνήθης μετρική της απόστασης είναι Πολωνικός χώρος.

Απόδειξη. Η συνάρτηση της εφαπτομένης $\tan : (-\pi/2, \pi/2) \rightarrow \mathbb{R}$ είναι τοπολογικός ισομορφισμός και από την Πρόταση 2.1.2 το διάστημα $(-\pi/2, \pi/2)$ είναι Πολωνικός χώρος. (Μάλιστα από την απόδειξη της πρότασης μπορούμε να δούμε ότι μια κατάλληλη μετρική είναι η $\rho(x, y) = |\tan x - \tan y|$.)

Το ζητούμενο προκύπτει από το γεγονός ότι όλα τα μη τετριμμένα ανοικτά διαστήματα του \mathbb{R} είναι τοπολογικά ισομορφικά μεταξύ τους. \square

Δοσμένου ενός μετρικού χώρου (X, d) και μη κενού $A \subseteq X$ ορίζεται η συνάρτηση της απόστασης από το σύνολο A ,

$$(2.1) \quad f : X \rightarrow \mathbb{R} : f(x) = d(x, A) = \inf\{d(x, z) \mid z \in A\}.$$

Όπως είναι γνωστό η f είναι συνεχής συνάρτηση, για την ακρίβεια ισχύει

$$|d(x, A) - d(y, A)| \leq d(x, y), \quad x, y \in A.$$

Ορισμός 2.1.4. Έστω X τοπολογικός χώρος και $A \subseteq X$. Το A είναι F_σ υποσύνολο του X αν υπάρχει ακολουθία $(F_n)_{n \in \mathbb{N}}$ από κλειστά υποσύνολα του X με $A = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} F_n$.

Επίσης το A είναι G_δ υποσύνολο του X αν υπάρχει ακολουθία $(U_n)_{n \in \mathbb{N}}$ από ανοικτά υποσύνολα του X με $A = \bigcap_{n \in \mathbb{N}} U_n$.

Είναι σαφές ότι ένα σύνολο $A \subseteq X$ είναι F_σ ακριβώς όταν το συμπλήρωμά του $X \setminus A$ είναι G_δ . Επιπλέον είναι ξεκάθαρο ότι κάθε κλειστό σύνολο F είναι F_σ καθώς μπορούμε να πάρουμε $F_n = F$, $n \in \mathbb{N}$. Ισοδύναμα κάθε ανοικτό σύνολο είναι G_δ .

Τέλος παρατηρούμε ότι η αριθμήσιμη ένωση F_σ συνόλων είναι επίσης F_σ σύνολο, γιατί αν $A_n = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} F_n^i$, όπου $n \in \mathbb{N}$ κάθε F_n^i είναι κλειστό, τότε η $A = \{F_n^i \mid i, n \in \mathbb{N}\}$ είναι αριθμήσιμη οικογένεια κλειστών συνόλων και $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n = \bigcup A$.

Προκύπτει ότι και η αριθμήσιμη τομή G_δ συνόλων είναι G_δ .

Ορισμός 2.1.5. Αν έχουμε έναν τοπολογικό χώρο (X, \mathcal{T}) και G ένα μη κενό υποσύνολο του X τότε μπορούμε να δούμε το G ως τοπολογικό χώρο με τη **σχετική τοπολογία** του X , δηλαδή την τοπολογία \mathcal{T}_G που ορίζεται ως εξής

$$\mathcal{T}_G = \{V \cap G \mid V \in \mathcal{T}\}.$$

Το ζεύγος (G, \mathcal{T}_G) ονομάζεται **υπόχωρος** του (X, \mathcal{T}) . Στην περίπτωση όπου ο (X, \mathcal{T}) μετρικοποιείται από την d τότε ο (G, \mathcal{T}_G) μετρικοποιείται από τον περιορισμό $d|(G \times G)$ της d στο G .

Πρόταση 2.1.6. Αν ο X είναι μετρικοποιήσιμος τοπολογικός χώρος τότε κάθε κλειστό σύνολο του, εκτός από F_σ , είναι και G_δ .

Ισοδύναμα κάθε ανοικτό υποσύνολο του X είναι G_δ και F_σ .

Απόδειξη. Θεωρούμε ένα κλειστό $F \subseteq X$, μια μετρική d που παράγει την τοπολογία του X , και τη συνάρτηση της απόστασης από το F , $f = (x \mapsto d(x, F))$ από το (2.1) πιο πάνω. (Υποθέτουμε ότι $F \neq \emptyset$ αλλιώς το συμπέρασμα είναι προφανές.) Για κάθε $n \in \mathbb{N}$ ορίζουμε

$$U_n = \{x \in X \mid d(x, F) < 2^{-n}\}.$$

Τότε $U_n = f^{-1}[(-1, 2^{-n})]$ και αφού η f είναι συνεχής το σύνολο U_n είναι ανοικτό υποσύνολο του X για κάθε $n \in \mathbb{N}$.

Επειδή $d(x, F) = 0$ για κάθε $x \in F$ είναι σαφές ότι $F \subseteq \bigcap_{n \in \mathbb{N}} U_n$. Υποθέτουμε ότι $x \in U_n$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$. Τότε υπάρχει ακολουθία $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ μέσα από το F με $d(x, x_n) < 2^{-n}$ για κάθε n . Επομένως $x_n \rightarrow x$ και αφού το F είναι κλειστό έχουμε $x \in F$.

Καταλήγουμε ότι $F = \bigcap_{n \in \mathbb{N}} U_n$ και άρα το F είναι G_δ σύνολο. \square

Θεώρημα 2.1.7. Έστω \mathcal{X} Πολωνικός χώρος και $\emptyset \neq G \subseteq \mathcal{X}$. Τότε το G με τη σχετική τοπολογία του \mathcal{X} είναι Πολωνικός χώρος αν και μόνο αν το G είναι G_δ υποσύνολο του \mathcal{X} .

Απόδειξη. Υποθέτουμε αρχικά ότι το G είναι Πολωνικός χώρος με τη σχετική τοπολογία του \mathcal{X} . Σταθεροποιούμε μια κατάλληλη μετρική d για τον \mathcal{X} και d_G για τον G . (Δεν έχουμε απαραίτητα ότι η d_G είναι ο περιορισμός της d στο G .) Για κάθε $n \in \mathbb{N}$ ορίζουμε το σύνολο

$$V_n = \{x \in \mathcal{X} \mid \exists \text{ ανοικτό } U \text{ με } x \in U \text{ και } \forall y, z \in U \cap G \text{ ισχύει } d_G(y, z) < 2^{-n}\}.$$

Ισχυριζόμαστε αρχικά ότι κάθε V_n είναι ανοικτό υποσύνολο του \mathcal{X} . Έστω $x \in V_n$, τότε υπάρχει ένα ανοικτό U με $x \in U$ και για κάθε $y, z \in U$ ισχύει $d_G(y, z) < 2^{-n}$. Υπάρχει $r > 0$ με $B_d(x, r) \subseteq U$. Για κάθε $x' \in B_d(x, r)$ το σύνολο $U' = B_d(x, r)$ είναι ανοικτό που περιέχει το x' . Επειδή $U' \subseteq U$ έχουμε επίσης ότι για κάθε $y, z \in U'$ ισχύει $d_G(y, z) < 2^{-n}$. Άρα $x' \in V_n$ για κάθε $x' \in B_d(x, r)$ και το $x \in V_n$ είναι εσωτερικό σημείο του V_n .

Στη συνέχεια δείχνουμε ότι

$$(2.2) \quad G = \bigcap_{n \in \mathbb{N}} V_n \cap \bar{G}.$$

Από την πιο πάνω ισότητα και την Πρόταση 2.1.6 (τα κλειστά σύνολα είναι G_δ) προκύπτει ότι το G είναι η τομή δύο G_δ συνόλων και συνεπώς είναι G_δ .

Ξεκινάμε με τον εγκλεισμό $G \subseteq \bigcap_{n \in \mathbb{N}} V_n \cap \bar{G}$. Έστω $x \in G$ και $n \in \mathbb{N}$. Προφανώς $x \in \bar{G}$, δείχνουμε ότι $x \in V_n$. Η μπάλα $B_{d_G}(x, 2^{-(n+1)})$ του G είναι ανοικτό υποσύνολο του G επομένως υπάρχει U ανοικτό υποσύνολο του \mathcal{X} με

$$B_{d_G}(x, 2^{-(n+1)}) = U \cap G.$$

Τότε για κάθε $y, z \in U \cap G$ έχουμε $y, z \in B_{d_G}(x, 2^{-(n+1)})$ και συνεπώς

$$d_G(y, z) \leq d_G(y, x) + d_G(x, z) < 2^{-(n+1)} + 2^{-(n+1)} = 2^{-n}.$$

Άρα $x \in V_n$.

Αντίστροφα, έστω $x \in \bar{G}$ με $x \in V_n$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$. Τότε υπάρχει ακολουθία ανοικτών συνόλων $(U_n)_{n \in \mathbb{N}}$ με $x \in U_n$ και έτσι ώστε $y, z \in U \cap G$ ισχύει $d_G(y, z) < 2^{-n}$.

Μπορούμε να υποθέσουμε ότι η ακολουθία $(U_n)_{n \in \mathbb{N}}$ είναι φθίνουσα, αλλιώς αντικαθιστούμε κάθε U_n με την τομή $\bigcap_{k=0}^n U_k$.

Αφού $x \in \bar{G} \cap U_n$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$, υπάρχει ακολουθία $(y_n)_{n \in \mathbb{N}}$ από το G με $y_n \in U_n$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$ και $d(y_n, x) \rightarrow 0$. Για κάθε $n \geq m$ έχουμε $y_n \in U_n \subseteq U_m$ και αφού $y_m \in U_m$ ισχύει $d_G(y_n, y_m) < 2^{-m}$. Αυτό δείχνει ότι η $(y_n)_{n \in \mathbb{N}}$ είναι d_G -Cauchy και αφού ο (G, d_G) είναι πλήρης υπάρχει $y \in G$ με $d_G(y_n, y) \rightarrow 0$.

Από την άλλη η τοπολογία του (G, d_G) είναι η ίδια με τη σχετική τοπολογία του G που παίρνει από τον \mathcal{X} . Προκύπτει ότι $d(y_n, y) \rightarrow 0$ και αφού $d(y_n, x) \rightarrow 0$ έχουμε $x = y \in G$. Έτσι έχουμε και τον άλλο εγκλεισμό της (2.2) και αποδείξαμε τη μία κατεύθυνση του θεωρήματος.

Για την αντίστροφη κατεύθυνση υποθέτουμε ότι το G είναι η τομή μιας ακολουθίας ανοικτών συνόλων $(U_n)_{n \in \mathbb{N}}$ και θέτουμε $F_n = \mathcal{X} \setminus U_n$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$. Τότε κάθε F_n είναι κλειστό σύνολο.

Θεωρούμε d μια κατάλληλη μετρική στον \mathcal{X} και για κάθε $n \in \mathbb{N}$ τη συνάρτηση $(x \mapsto d(x, F_n))$ της απόστασης του x από το F_n όπως στο (2.1). Ορίζουμε

$$d_G(x, y) = d(x, y) + \sum_{n=0}^{\infty} \min \{2^{-n}, |d(x, F_n)^{-1} - d(y, F_n)^{-1}|\}$$

όπου $x, y \in G$. Παρατηρούμε ότι αν $x \in G$ τότε $x \in U_n$ και άρα $x \notin F_n$ για κάθε n . Επομένως $d(x, F_n) > 0$ και άρα ορίζεται ο αντίστροφος αριθμός $d(x, F_n)^{-1} > 0$.

Είναι εύκολο να δει κανείς ότι η d_G είναι μετρική στο G . Δείχνουμε ότι η d_G παράγει τη σχετική τοπολογία στο G . Ισοδύναμα δείχνουμε ότι η μετρική d_G και ο περιορισμός $d|(G \times G)$ της d στο $G \times G$ είναι ισοδύναμες μετρικές. Θεωρούμε μια ακολουθία $(y_i)_{i \in \mathbb{N}}$ στο G και $y \in G$. Δείχνουμε ότι

$$(2.3) \quad y_i \xrightarrow{d_G} y \iff y_i \xrightarrow{d} y.$$

Η ευθεία κατεύθυνση είναι σαφής επειδή $d \leq d_G$ στο $G \times G$. Αντίστροφα υποθέτουμε ότι $d(y_i, y) \rightarrow 0$ και έστω $r > 0$. Τότε υπάρχει i_0 έτσι ώστε για κάθε $i \geq i_0$ ισχύει

$$(2.4) \quad d(y_i, y) < r/3.$$

Η ιδέα είναι να χωρίσουμε το άπειρο άθροισμα στον ορισμό της d_G σε δύο μέρη, όπου το κάθε ένα είναι μικρότερο του $r/3$. Για κάθε $n_0 \in \mathbb{N}$ ισχύει

$$\sum_{n=n_0+1}^{\infty} \min \{2^{-n}, |d(z, F_n)^{-1} - d(w, F_n)^{-1}|\} \leq \sum_{n=n_0+1}^{\infty} 2^{-n} = 2^{-n_0}$$

όπου $z, w \in G$. Οπότε λαμβάνοντας αρκετά μεγάλο $n_0 \in \mathbb{N}$ έχουμε για κάθε $z, w \in G$,

$$(2.5) \quad \sum_{n=n_0+1}^{\infty} \min \{2^{-n}, |d(z, F_n)^{-1} - d(w, F_n)^{-1}|\} < r/3.$$

Για κάθε $k \leq n_0$ ισχύει $d(y_i, F_k) \rightarrow d(y, F_k)$ επειδή η συνάρτηση της απόστασης σημείου από σύνολο είναι συνεχής. Αφού τα y_i, y ανήκουν στο G όπως αναφέραμε πιο πάνω έχουμε $d(y_i, F_k), d(y, F_k) > 0$. Άρα $d(y_i, F_k)^{-1} \rightarrow d(y, F_k)^{-1}$.

Επομένως υπάρχει i_1 έτσι ώστε για κάθε $i \geq i_1$ και κάθε $k = 0, \dots, n_0$ ισχύει

$$|d(y_i, F_k)^{-1} - d(y, F_k)^{-1}| < \min\{2^{-n}, r/3 \cdot (n_0 + 1)^{-1}\}.$$

Άρα

$$(2.6) \quad \begin{aligned} & \sum_{n=0}^{n_0} \min \{2^{-n}, |d(y_i, F_k)^{-1} - d(y, F_k)^{-1}|\} \\ &= \sum_{n=0}^{n_0} |d(y_i, F_k)^{-1} - d(y, F_k)^{-1}| \\ &< \sum_{n=0}^{n_0} r/3 \cdot (n_0 + 1)^{-1} = r/3. \end{aligned}$$

Από τις (2.4), (2.5), (2.6) και τον ορισμό της d_G έχουμε για κάθε $i \geq \max\{i_0, i_1\}$ ότι $d_G(y_i, y) < r$. Συνεπώς $y_i \xrightarrow{d_G} y$ και οι μετρικές είναι ισοδύναμες.

Αφού η τοπολογία του (G, d_G) είναι η σχετική τοπολογία στο G και ο \mathcal{X} είναι διαχωρίσιμος είναι σαφές ότι ο μετρικός χώρος (G, d_G) είναι διαχωρίσιμος (υπόχωρος διαχωρίσιμου μετρικού χώρου είναι διαχωρίσιμος).

Τέλος δείχνουμε ότι ο (G, d_G) είναι πλήρης. Έστω $(y_i)_{i \in \mathbb{N}}$ d_G -Cauchy ακολουθία στον G . Εφόσον $d \leq d_G$ στο $G \times G$ η $(y_i)_{i \in \mathbb{N}}$ είναι και d -Cauchy. Αφού ο (\mathcal{X}, d) είναι πλήρης υπάρχει $y \in \bar{G}$ με $y_i \xrightarrow{d} y$. Δείχνουμε ότι $y \in G = \bigcap_{n \in \mathbb{N}} U_n$ και ότι $y_i \xrightarrow{d_G} y$.

Έστω $n \in \mathbb{N}$, τότε $d(y_i, F_n) \xrightarrow{i} d(y, F_n)$. Αν είχαμε $y \in F_n$ θα ίσχυε $d(y, F_n) = 0$ και άρα

$$d(y_i, F_n) \xrightarrow{i} 0.$$

Επομένως $d(y_i, F_n)^{-1} \xrightarrow{i} +\infty$. Ειδικότερα για κάθε $i \in \mathbb{N}$ θα υπήρχαν $j, s \geq i$ με

$$|d(y_j, F_n)^{-1} - d(y_s, F_n)^{-1}| > 2^{-n}$$

και

$$d_G(y_j, y_s) \geq \min \{2^{-n}, |d(y_j, F_n)^{-1} - d(y_s, F_n)^{-1}|\} = 2^{-n}.$$

Αυτό όμως είναι άτοπο γιατί η $(y_i)_{i \in \mathbb{N}}$ είναι d_G -Cauchy. Επομένως $y \notin F_n = \mathcal{X} \setminus U_n$ δηλαδή $y \in U_n$. Επειδή το n είναι τυχαίο καταλήγουμε $y \in \bigcap_{n \in \mathbb{N}} U_n = G$.

Αφού $y_i \xrightarrow{d} y$ και $y_i, y \in G$, $i \in \mathbb{N}$, προκύπτει από την (2.3) ότι $y_i \xrightarrow{d_G} y$ και ο (G, d_G) είναι πλήρης. \square

Το προηγούμενο θεώρημα δίνει μια δεύτερη απόδειξη του ότι κάθε ανοικτό διάστημα του \mathbb{R} είναι Πολωνικός χώρος καθώς ως ανοικτό σύνολο είναι G_δ .

Πόρισμα 2.1.8. Οι άρρητοι αριθμοί $\mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ είναι Πολωνικός χώρος ενώ οι ρητοί αριθμοί \mathbb{Q} δεν είναι Πολωνικός χώρος με την σχετική τοπολογία του \mathbb{R} .

Απόδειξη. Το σύνολο $\mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ είναι G_δ υποσύνολο του \mathbb{R} , ενώ το \mathbb{Q} δεν είναι G_δ (γνωστή εφαρμογή του Θεωρήματος του Baire). Το ζητούμενο προκύπτει από το Θεώρημα 2.1.7. \square

Ασκήσεις

Άσκηση 2.1.9. Για κάθε μετρικό χώρο (X, d) οι συναρτήσεις

$$\rho = \min\{d, 1\} \quad \text{και} \quad \sigma = \frac{d}{1+d}$$

είναι μετρικές ισοδύναμες με την d και αν ο (X, d) είναι πλήρης και διαχωρίσιμος τότε οι χώροι (X, ρ) και (X, σ) είναι επίσης πλήρεις και διαχωρίσιμοι.

Συμπεράνετε ότι κάθε Πολωνικός χώρος επιδέχεται συμβατή μετρική $d \leq 1$.

Άσκηση 2.1.10. Δίνονται δύο μετρικοί χώροι (X, d) και (Y, ρ) και

$$f : (Y, \rho) \rightarrow (X, d)$$

επιμορφισμός. Αν η f είναι ισομετρία, δηλαδή αν ικανοποιεί

$$\rho(y_1, y_2) = d(f(x_1), f(x_2)), \quad y_1, y_2 \in Y,$$

τότε η f είναι τοπολογικός ισομορφισμός. Μάλιστα αν ο (X, d) είναι πλήρης τότε και ο (Y, ρ) είναι πλήρης.

Άσκηση 2.1.11. Το σύνολο $C([a, b])$ όλων των συνεχών συναρτήσεων από το $[a, b]$ στο \mathbb{R} , όπου $a < b$ είναι Πολωνικός χώρος.

Άσκηση 2.1.12. Οι ακολουθιακοί χώροι ℓ^p με $1 \leq p < \infty$ με την τοπολογία της p -νόρμας είναι Πολωνικοί χώροι.

Άσκηση 2.1.13. Αν οι (X, d) και (Y, ρ) είναι πλήρεις και διαχωρίσιμοι μετρικοί χώροι τότε οι $X \oplus Y$ και $X \times Y$ με τις μετρικές που αναφέραμε στην Εισαγωγή είναι επίσης πλήρεις και διαχωρίσιμοι μετρικοί χώροι.

Συμπεράνετε ότι το ευθύ άθροισμα και το πεπερασμένο γινόμενο Πολωνικών χώρων είναι Πολωνικός χώρος.

Άσκηση 2.1.14. Αν $(X_n, d_n)_{n \in \mathbb{N}}$ είναι ακολουθία πλήρων και διαχωρίσιμων μετρικών χώρων τότε ο $\prod_{n \in \mathbb{N}} X_n$ με τη μετρική που αναφέραμε στην Εισαγωγή είναι επίσης πλήρης και διαχωρίσιμος.

Συμπεράνετε ότι το άπειρο αριθμησιμο γινόμενο Πολωνικών χώρων είναι επίσης Πολωνικός χώρος.

Άσκηση 2.1.15. Οι χώροι \mathbb{R}^n , $n \geq 2$ με την τοπολογία της συνηθούς Ευκλείδειας μετρικής και ο $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ με την τοπολογία γινόμενο είναι Πολωνικοί χώροι.

Άσκηση 2.1.16. Το σύνολο των σημείων συνέχειας μιας τυχαίας συνάρτησης

$$f : (X, d) \rightarrow (Y, \rho)$$

είναι G_δ σύνολο.

Άσκηση 2.1.17. Τα σύνολα $(0, 1]$ και $[0, 1)$ με τη σχετική τοπολογία του \mathbb{R} είναι Πολωνικοί χώροι.

Το $\mathbb{Q} \times (\mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}) \subseteq \mathbb{R}^2$ δεν είναι Πολωνικός υπόχωρος του \mathbb{R}^2 .

2.2. Πεπερασμένες ακολουθίες

Θεωρούμε ένα μη κενό σύνολο X . Με τον όρο **πεπερασμένη ακολουθία** στο X εί-
ναι μια συνάρτηση $u : \{i \in \mathbb{N} \mid i < n\} \rightarrow X$ για κάποιο $n \in \mathbb{N}$. Συμβολίζουμε μια τέτοια
 u με $(u(0), \dots, u(n-1))$. Συμπεριλαμβανόμε στις πεπερασμένες ακολουθίες και την
κενή ακολουθία, την οποία συμβολίζουμε με Λ . Αυτή προκύπτει από τον προηγούμενο
ορισμό για $n = 0$ όπου το πεδίο ορισμού $\{i \in \mathbb{N} \mid i < 0\}$ της u είναι το κενό σύνολο.

Συμβολίζουμε με $X^{<\mathbb{N}}$ το σύνολο όλων των πεπερασμένων ακολουθιών στο X . Είναι
σαφές ότι το προηγούμενο n στον ορισμό της πεπερασμένης ακολουθίας είναι μοναδικό.
Το **μήκος** μιας πεπερασμένης ακολουθίας $u : \{i \in \mathbb{N} \mid i < n\} \rightarrow X$ είναι ακριβώς αυτό
το μοναδικό n και συμβολίζεται με $|u|$. Έτσι έχουμε

$$|u| = 0 \iff u = \Lambda \quad \text{και} \\ u = (u(0), \dots, u(|u| - 1)), \quad \text{για κάθε } u \in X^{<\mathbb{N}}.$$

Η **παράθεση** (concatenation) της $u \in X^{<\mathbb{N}}$ με την $v \in X^{<\mathbb{N}}$ είναι η ακολουθία

$$u * v = (u(0), \dots, u(|u| - 1), v(0), \dots, v(|v| - 1)).$$

Για παράδειγμα αν $u = (a, b, c)$ και $v = (d, e)$ τότε

$$u * v = (a, b, c, d, e) \quad \text{και} \quad v * u = (d, e, a, b, c).$$

Είναι σαφές ότι $u * \Lambda = \Lambda * u = u$ για κάθε $u \in X^{<\mathbb{N}}$.

Στο σύνολο $X^{<\mathbb{N}}$ ορίζουμε τη διμελή σχέση \sqsubseteq ως εξής,

$$u \sqsubseteq v \iff |u| \leq |v| \quad \text{και} \quad \forall i < |u| \quad (u(i) = v(i)).$$

Για παράδειγμα $(a, b) \sqsubseteq (a, b, c)$. Επίσης $\Lambda \sqsubseteq u$ για κάθε $u \in X^{<\mathbb{N}}$ (καθολικός ποσοδεί-
κτης με κενό πεδίο).

Είναι σαφές ότι η σχέση \sqsubseteq ικανοποιεί τις τρεις **ιδιότητες της διάταξης**,

$$u \sqsubseteq u \\ (u \sqsubseteq v \ \& \ v \sqsubseteq u) \longrightarrow u = v \\ (u \sqsubseteq v \ \& \ v \sqsubseteq w) \longrightarrow u \sqsubseteq w$$

για κάθε $u, v, w \in X^{<\mathbb{N}}$. Το **αυστηρό μέρος** της \sqsubseteq είναι η σχέση \sqsubset με

$$u \sqsubset v \iff u \sqsubseteq v \ \& \ u \neq v.$$

Για παράδειγμα $(a, b) \sqsubset (a, b, c)$. Είναι σαφές ότι $u \sqsubset v$ αν και μόνο αν $u \sqsubseteq v$ και
 $|u| < |v|$. Θα λέμε ότι η $u \in X^{<\mathbb{N}}$ είναι **αρχικό τμήμα** της $v \in X^{<\mathbb{N}}$ ή ότι η v είναι
επέκταση της u αν $u \sqsubseteq v$. Θα λέμε επίσης ότι η u είναι **γνήσιο αρχικό τμήμα** της v ή
ότι η v είναι **γνήσια επέκταση** της u αν $u \sqsubset v$. Το v είναι **άμεση επέκταση** της u αν
 $v = u * (x)$ για κάποιο $x \in X$.

Δύο πεπερασμένες ακολουθίες u, v λέγονται **συμβατές**, συμβολικά $u \parallel v$ αν $u \sqsubseteq v$
ή $v \sqsubseteq u$.

Θα επικεντρωθούμε στην περίπτωση όπου $X = \mathbb{N}$. Το σύνολο $\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ είναι αριθμήσιμο
σύνολο. Για να το δούμε αυτό θεωρούμε για κάθε $n \in \mathbb{N}$ το σύνολο A_n όλων των πεπε-
ρασμένων ακολουθιών από φυσικούς αριθμούς με μήκος n . Για παράδειγμα $A_0 = \{\Lambda\}$,
 $A_1 = \{(i) \mid i \in \mathbb{N}\}$ κ.ο.κ. Τότε

$$\mathbb{N}^{<\mathbb{N}} = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n.$$

Είναι σαφές ότι υπάρχει αντιστοιχία ανάμεσα στο A_n και στο πεπερασμένο γινόμενο
 \mathbb{N}^n για κάθε $n \geq 1$. Τότε κάθε A_n είναι αριθμήσιμο και επομένως και το $\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ είναι
αριθμήσιμο σύνολο.

Είναι χρήσιμο να απομονώσουμε μια συγκεκριμένη απαρίθμηση του $\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$. Αρχικά
θεωρούμε την αύξουσα απαρίθμηση των *πρώτων αριθμών*

$$p_0 < p_1 < p_2 < \dots < p_n < \dots,$$

δηλαδή $p_0 = 2, p_1 = 3, p_2 = 5, p_3 = 7, p_4 = 11$, κ.ο.κ. Ορίζουμε τη **συνάρτηση κωδικοποίησης**

$$(2.7) \quad \langle \cdot \rangle : \mathbb{N}^{<\mathbb{N}} \rightarrow \mathbb{N} : u = (u(0), \dots, u(n-1)) \mapsto \langle u(0), \dots, u(n-1) \rangle$$

με τον εξής τρόπο:

$$\langle u(0), \dots, u(n-1) \rangle = \begin{cases} p_0^{u(0)+1} \cdots p_{n-1}^{u(n-1)+1}, & \text{αν } n \geq 1 \\ 1, & \text{αν } n = 0. \end{cases}$$

Για παράδειγμα

$$\langle 4, 0, 1 \rangle = 2^{4+1} \cdot 3^{0+1} \cdot 5^{1+1} = 2^5 \cdot 3 \cdot 5^2 = 32 \cdot 3 \cdot 25 = 2400.$$

Αντίστροφα αν πάρουμε τον αριθμό 120 τότε μπορούμε να τον φέρουμε στη μορφή $2^3 \cdot 3^1 \cdot 5^1$ και επομένως βλέπουμε ότι $120 = \langle 2, 0, 0 \rangle$.

Είναι σημαντικό να προσθέτουμε τη μονάδα στους εκθέτες των δυνάμεων γιατί έτσι μπορούμε να ανακτήσουμε την αρχική ακολουθία. Αλλιώς δεν θα είχαμε τρόπο να γνωρίζουμε αν ο αριθμός $2^3 \cdot 3^1 \cdot 5^1 = 2^3 \cdot 3^1 \cdot 5^1 \cdot 7^0 = 2^3 \cdot 3^1 \cdot 5^1 \cdot 7^0 \cdot 11^0$ αντιστοιχεί στο $\langle 3, 1, 1 \rangle$ ή στο $\langle 3, 1, 1, 0 \rangle$ ή στο $\langle 3, 1, 1, 0, 0 \rangle$ κ.τ.λ.

Για την ακρίβεια από το Θεμελιώδες Θεώρημα της Αριθμητικής (μοναδικότητα γραφής ως γινόμενο πρώτων) η συνάρτηση $\langle \cdot \rangle$ είναι ένα-προς-ένα (Άσκηση 2.2.1). Από την άλλη η $\langle \cdot \rangle$ δεν είναι επιμορφισμός. Για παράδειγμα δεν παίρνει την τιμή 0. Μάλιστα επειδή $p_0^{k+1} = 2^{k+1} = 2 \cdot 2^k$ βλέπουμε ότι πέραν της μονάδας η $\langle \cdot \rangle$ παίρνει μόνο άρτιες τιμές, δηλαδή ο αριθμός $\langle u(0), \dots, u(n-1) \rangle$ είναι άρτιος ακριβώς όταν η ακολουθία $u = (u(0), \dots, u(n-1))$ δεν είναι η κενή ακολουθία.

Συμβολίζουμε με Seq το σύνολο όλων των τιμών της $\langle \cdot \rangle$,

$$\text{Seq} = \{s \in \mathbb{N} \mid \exists u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}} s = \langle u(0), \dots, u(n-1) \rangle\}.$$

Ορίζουμε τη **φυσική απαρίθμηση** $(u_s)_{s \in \mathbb{N}}$ του $\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ ως προς των κωδικοποίηση $\langle \cdot \rangle$ ως εξής:

$$u_s = \begin{cases} (k_0, \dots, k_{n-1}), & \text{αν } s = \langle k_0, \dots, k_{n-1} \rangle \in \text{Seq}, \\ \Lambda, & \text{αλλιώς.} \end{cases}$$

Για κάθε $s = \langle k_0, \dots, k_{n-1} \rangle$ και κάθε $i < n$ ορίζουμε

$$(s)_i = k_i.$$

Με άλλα λόγια το $(s)_i$ είναι ο μοναδικός φυσικός αριθμός k για τον οποίο υπάρχουν k_0, \dots, k_{i-1} και k_{i+1}, \dots, k_{n-1} για κάποιο $n \geq 1$ έτσι ώστε

$$s = \langle k_0, \dots, k_{i-1}, k, k_{i+1}, \dots, k_{n-1} \rangle,$$

εφόσον φυσικά υπάρχει τέτοιος k . Επεκτείνουμε τον ορισμό $(s)_i$ και στις περιπτώσεις όπου $s = \langle k_0, \dots, k_{n-1} \rangle \in \text{Seq}$ και $i \geq n$ ή $s \notin \text{Seq}$ θέτοντας τότε $(s)_i = 0$.

Έχουμε λοιπόν

$$(s)_i = \begin{cases} k, & \text{αν υπάρχουν } k_0, \dots, k_{i-1}, k, k_{i+1}, \dots, k_{n-1} \text{ για κάποιο } n > i \\ \text{με } s = \langle k_0, \dots, k_{i-1}, k, k_{i+1}, \dots, k_{n-1} \rangle, \\ 0, & \text{αλλιώς.} \end{cases}$$

Για παράδειγμα $(2^3 \cdot 3^1 \cdot 5^4 \cdot 7^2)_2 = (\langle 2, 0, 3, 1 \rangle)_2 = 3$.

Με τη βοήθεια των πιο πάνω συναρτήσεων μπορούμε να εκφράσουμε προτάσεις που αναφέρονται σε πεπερασμένες ακολουθίες φυσικών αριθμών *οσοδήποτε μεγάλου μήκους* σε προτάσεις με ποσοδείκτες που αναφέρονται σε φυσικούς αριθμούς. Για παράδειγμα αν $(P_n)_{n \in \mathbb{N}}$ είναι μια ακολουθία υποσυνόλων του \mathbb{N} τότε η πρόταση

“για κάθε $n \in \mathbb{N}$ το σύνολο P_n περιέχει τουλάχιστον n διαφορετικά στοιχεία”

είναι ισοδύναμη με την

$$\forall n \in \mathbb{N} \exists s \in \mathbb{N} \forall i, j < n ((s)_i \in P_n \ \& \ (i \neq j \longrightarrow (s)_i \neq (s)_j)).$$

Τέλος αναφέρουμε ότι θα θεωρούμε το σύνολο $\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ με την τοπολογία που παράγεται από τη διακριτή μετρική όπου κάθε υποσύνολο του $\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ είναι ανοικτό. Εφόσον το $\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ είναι αριθμήσιμο σύνολο προκύπτει ότι είναι Πολωνικός χώρος.

Ασκήσεις

Άσκηση 2.2.1. Η συνάρτηση

$$\langle \cdot \rangle : \mathbb{N}^{<\mathbb{N}} \rightarrow \mathbb{N} : u = (u(0), \dots, u(n-1)) \mapsto \langle u(0), \dots, u(n-1) \rangle$$

είναι μονομορφισμός.

Άσκηση 2.2.2. Βρείτε έναν άρτιο αριθμό που δεν λαμβάνεται ως τιμή της συνάρτησης $\langle \cdot \rangle$.

Άσκηση 2.2.3. Θεωρούμε ένα $Q \subseteq \mathbb{N} \times \mathbb{N}$. Εκφράστε με τη βοήθεια ποσοδεικτών στο \mathbb{N} την πρόταση

“για κάθε n υπάρχουν $k_1, \dots, k_{2n} \in \mathbb{N}$ διαφορετικά ανά δύο
με $(n, \langle n, k_i \rangle) \in Q$, για κάθε $i = 0, \dots, 2n$.”

2.3. Οι χώροι του Baire και Cantor

Ορισμός 2.3.1 (Ο χώρος του Baire). Θεωρούμε το σύνολο $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$ όλων των συναρτήσεων από το \mathbb{N} στο \mathbb{N} (άπειρες ακολουθίες). Συμβολίζουμε τα στοιχεία του $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$ με τα μικρά ελληνικά γράμματα $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ και το σύνολο $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$ με \mathcal{N} .

Για $\alpha, \beta \in \mathcal{N}$ με $\alpha \neq \beta$ θέτουμε

$$n(\alpha, \beta) = \text{ο ελάχιστος } n \in \mathbb{N} \text{ με } \alpha(n) \neq \beta(n).$$

Ορίζουμε τη συνάρτηση $d_{\mathcal{N}} : \mathcal{N} \times \mathcal{N} \rightarrow \mathbb{R}$,

$$d_{\mathcal{N}}(\alpha, \beta) = \begin{cases} 2^{-n(\alpha, \beta)}, & \text{αν } \alpha \neq \beta \\ 0, & \text{αν } \alpha = \beta. \end{cases}$$

Τότε η συνάρτηση $d_{\mathcal{N}}$ είναι μετρική στο \mathcal{N} (Άσκηση 2.3.12). Ο μετρικός χώρος $(\mathcal{N}, d_{\mathcal{N}})$ ονομάζεται **ο χώρος του Baire**.

Θα καλούμε επίσης χώρο του Baire τον *τοπολογικό χώρο* που προκύπτει από τη μετρική $d_{\mathcal{N}}$.

Ορισμός 2.3.2 (Περαιτέρω Συμβολισμοί).

Ένα $\alpha \in \mathcal{N}$ θα συμβολίζεται επίσης με $(\alpha(0), \dots, \alpha(n), \dots)$. Επεκτείνουμε τους ορισμούς των $*$ και \sqsubseteq ανάμεσα σε πεπερασμένες και άπειρες ακολουθίες με τον προφανή τρόπο,

$$\begin{aligned} u * \alpha &= (u(0), \dots, u(|u| - 1), \alpha(0), \dots, \alpha(n), \dots) \\ u \sqsubseteq \alpha &\iff \forall i < |u| \ u(i) = \alpha(i), \end{aligned}$$

όπου $u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ και $\alpha \in \mathcal{N}$.

Για κάθε $u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ ορίζουμε τη **βασική περιοχή** του χώρου του Baire,

$$\begin{aligned} (2.8) \quad \mathcal{N}_u &= \{ \alpha \in \mathcal{N} \mid u \sqsubseteq \alpha \} \\ &= \{u(0)\} \times \dots \times \{u(|u| - 1)\} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \dots \end{aligned}$$

Δοσμένων $\alpha \in \mathcal{N}$ και $n \in \mathbb{N}$ ορίζουμε

$$(2.9) \quad \alpha^* = (\alpha(1), \dots, \alpha(n), \dots) \in \mathcal{N}$$

$$(2.10) \quad \alpha|n = (\alpha(0), \dots, \alpha(n-1)) \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$$

$$(2.11) \quad \overline{\alpha(n)} = \langle \alpha(0), \dots, \alpha(n-1) \rangle \in \mathbb{N}$$

$$(2.12) \quad (\alpha)_n = (\alpha(\langle n, 0 \rangle), \alpha(\langle n, 1 \rangle), \dots, \alpha(\langle n, t \rangle), \dots) \in \mathcal{N}.$$

Μάλιστα οι πιο πάνω πράξεις ορίζουν συνεχείς συναρτήσεις (Άσκηση 2.3.13).

Παρατηρούμε ότι για κάθε $r > 0$ αν n είναι ο ελάχιστος φυσικός με $2^{-n} < r$ τότε για κάθε $\alpha, \beta \in \mathcal{N}$,

$$d_{\mathcal{N}}(\alpha, \beta) < r \iff \forall i < n \alpha(i) = \beta(i).$$

Συνεπώς η $d_{\mathcal{N}}$ -ανοικτή μπάλα κέντρου $\alpha \in \mathcal{N}$ και ακτίνας $r > 0$ είναι το σύνολο όλων των $\beta \in \mathcal{N}$ που συμφωνούν με το α μέχρι και το $n-1$, δηλαδή

$$(2.13) \quad \begin{aligned} B_{d_{\mathcal{N}}}(\alpha, r) &= \mathcal{N}_{\alpha|n} \\ &= \{\alpha(0)\} \times \{\alpha(1)\} \times \dots \times \{\alpha(n-1)\} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \dots \end{aligned}$$

Στην περίπτωση όπου $n = 0$ τότε $\mathcal{N}_{\alpha|0} = \mathcal{N}_{\Lambda} = \mathcal{N}$.

Βλέπουμε λοιπόν ότι κάθε ανοικτή μπάλα στον $(\mathcal{N}, d_{\mathcal{N}})$ είναι ένα σύνολο της μορφής \mathcal{N}_u και αντίστροφα: κάθε σύνολο της μορφής \mathcal{N}_u είναι μια ανοικτή μπάλα, συγκεκριμένα η $B_{d_{\mathcal{N}}}(u * (0, 0, \dots), 2^{-(|u|-1)})$.

Αφού οι ανοικτές μπάλες σε έναν μετρικό χώρο αποτελούν βάση για την τοπολογία ενός μετρικού χώρου προκύπτει από το πιο πάνω ότι τα σύνολα \mathcal{N}_u , $u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$, αποτελούν βάση για την τοπολογία του $(\mathcal{N}, d_{\mathcal{N}})$.

Επιπλέον, αφού τα μονοσύνολα στο \mathbb{N} αποτελούν βάση για την τοπολογία του \mathbb{N} , έχουμε από την (1.1) στην Εισαγωγή ότι τα \mathcal{N}_u αποτελούν βάση για την τοπολογία γινόμενου στο $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$. Καταλήγουμε στο εξής.

Πρόταση 2.3.3. *Η τοπολογία του $(\mathcal{N}, d_{\mathcal{N}})$ είναι η τοπολογία γινόμενου στο $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$.*

Τέλος είναι άμεση συνέπεια της (2.13) ότι για κάθε ακολουθία $(\alpha_i)_{i \in \mathbb{N}}$ στον \mathcal{N} και κάθε $\alpha \in \mathcal{N}$ έχουμε

$$(2.14) \quad \alpha_i \xrightarrow{d_{\mathcal{N}}} \alpha \iff \forall n \lim_{i \rightarrow \infty} \alpha_i(n) = \alpha(n).$$

Το πιο πάνω μπορούμε επίσης να το δούμε από το ότι η σύγκλιση στην τοπολογία γινόμενου είναι η κατά σημείο σύγκλιση.

Πρόταση 2.3.4. *Ο $(\mathcal{N}, d_{\mathcal{N}})$ είναι πλήρης και διαχωρίσιμος μετρικός χώρος. Συνεπώς ο χώρος του Baire είναι Πολωνικός.*

Απόδειξη. Οι τελικά μηδενικές ακολουθίες

$$\alpha_u = u * (0, 0, \dots) = (u(0), \dots, u(|u|-1), 0, 0, \dots) \quad (u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}})$$

αποτελούν ένα αριθμήσιμο και πυκνό σύνολο του $(\mathcal{N}, d_{\mathcal{N}})$, επομένως ο χώρος είναι διαχωρίσιμος.

Για την πληρότητα θεωρούμε μια $d_{\mathcal{N}}$ -Cauchy ακολουθία $(\alpha_i)_{i \in \mathbb{N}}$. Σταθεροποιούμε ένα $n \in \mathbb{N}$. Τότε υπάρχει ένα $i_n \in \mathbb{N}$ έτσι ώστε για κάθε $i, j \geq i_n$ έχουμε $d_{\mathcal{N}}(\alpha_i, \alpha_j) < 2^{-n}$. Συνεπάγεται ότι

$$(2.15) \quad \alpha_i(k) = \alpha_j(k) \text{ για κάθε } k = 0, \dots, n \text{ και κάθε } i, j \geq i_n.$$

Ειδικότερα η ακολουθία φυσικών αριθμών $(\alpha_i(n))_{i \in \mathbb{N}}$ είναι τελικά σταθερή και ίση με τον αριθμό $\alpha_{i_n}(n)$.

Επομένως ορίζουμε

$$\alpha : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} : \alpha(n) = \lim_{i \rightarrow \infty} \alpha_i(n) = \alpha_{i_n}(n)$$

όπου i_n είναι όπως πιο πάνω.

Είναι σαφές από την (2.15) ότι $\alpha_i(k) = \alpha_{i_n}(k) = \alpha(k)$ για κάθε $i \geq i_n$ και κάθε $k = 0, \dots, n$. Από την (2.14) προκύπτει $\alpha_i \xrightarrow{d\mathcal{N}} \alpha$. \square

Θα δούμε αργότερα (??) ότι ο χώρος του Baire είναι τοπολογικά ισομορφικός με τον Πολωνικό χώρο των άρρητων αριθμών.

Θεώρημα 2.3.5. Για κάθε Πολωνικό χώρο \mathcal{X} υπάρχει ένας συνεχής επιμορφισμός $\pi : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{X}$.

Απόδειξη. Θεωρούμε μια κατάλληλη μετρική d στο \mathcal{X} και ένα σύνολο

$$D = \{r_n \mid n \in \mathbb{N}\}$$

που είναι αριθμήσιμο και πυκνό υποσύνολο του \mathcal{X} . Κάθε $x \in \mathcal{X}$ είναι το όριο μιας ακολουθίας $(r_{k_n})_{n \in \mathbb{N}}$ της $(r_n)_{n \in \mathbb{N}}$. Η ιδέα είναι να πάρουμε $\alpha = (k_n)_{n \in \mathbb{N}} \in \mathbb{N}^{\mathbb{N}}$ και τότε θα έχουμε $x = \lim_{n \rightarrow \infty} r_{\alpha(n)}$. Το τελευταίο όριο θα είναι η τιμή της π στο α .

Ενα πρόβλημα που ανακύπτει είναι πως για τυχαίο $\alpha \in \mathcal{N}$ η ακολουθία $(r_{\alpha(n)})_{n \in \mathbb{N}}$ μπορεί να μην συγκλίνει. Για να το διορθώσουμε αυτό θα αντικαταστήσουμε την ακολουθία $(r_{\alpha(n)})_{n \in \mathbb{N}}$ με μια άλλη, ως τη συμβολίσουμε με $(x_n^\alpha)_{n \in \mathbb{N}}$, η οποία συγκλίνει για κάθε α και η συνάρτηση $\alpha \mapsto \lim_{n \rightarrow \infty} x_n^\alpha$ είναι συνεχής. Επιπλέον για μια επαρκώς μεγάλη συλλογή $\alpha \in \mathcal{N}$ η $(x_n^\alpha)_{n \in \mathbb{N}}$ δεν διαφέρει ουσιαστικά από την $(r_{\alpha(n)})_{n \in \mathbb{N}}$.

Έχοντας αυτά υπόψη προχωράμε στην κατασκευή της π . Αρχικά ορίζουμε μια οικογένεια $(x_u)_{u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}} \setminus \{\Lambda\}}$ στοιχείων του \mathcal{X} με επαγωγή στο μήκος $|u|$ του $u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}} \setminus \{\Lambda\}$.

Για $|u| = 1$ με $u = (k_0)$, ορίζουμε $x_u = x_{(k_0)} = r_{k_0}$. Υποθέτουμε ότι για κάποιο $n > 1$ έχουν οριστεί x_v για κάθε $w \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ με $1 \leq |w| < n$.

Θεωρούμε $u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ με $|u| = n$. Θέτουμε προσωρινά $w = (u(0), \dots, u(n-2))$ και $k = u(|u| - 1)$ έτσι που

$$u = w * (k).$$

Προφανώς $|w| = n - 1$ και από την Επαγωγική Υπόθεση έχει οριστεί το x_w . Ορίζουμε

$$x_u = \begin{cases} r_k, & \text{αν } d(x_w, r_k) < 2^{-n}, \\ x_w, & \text{αλλιώς.} \end{cases}$$

Έτσι έχει οριστεί η οικογένεια $(x_u)_{u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}} \setminus \{\Lambda\}}$.

Είναι σαφές από τον πιο πάνω ορισμό ότι $d(x_w, x_u) < 2^{-|u|}$ όπου $u = w * u(|u| - 1)$. Προκύπτει ότι για κάθε $w \sqsubset u$ με $u = w * (k_0, \dots, k_m)$,

$$\begin{aligned} d(x_w, x_u) &\leq d(x_w, x_{w*(k_0)}) + \dots + d(x_{w*(k_0, \dots, k_{m-1})}, x_u) \\ &< 2^{-(|w|+1)} + \dots + 2^{-|u|} \\ &< \sum_{k=1}^{\infty} 2^{-(|w|+k)} = 2^{-|w|}. \end{aligned}$$

Επομένως για κάθε $\alpha \in \mathcal{N}$ και κάθε $1 \leq n \leq m$ ισχύει

$$(2.16) \quad d(x_{\alpha|n}, x_{\alpha|m}) < 2^{-n}.$$

Άρα για κάθε $\alpha \in \mathcal{N}$ η ακολουθία $(x_{\alpha|n})_{n \in \mathbb{N}}$ είναι d -Cauchy. Αφού ο (\mathcal{X}, d) είναι πλήρης ορίζεται η συνάρτηση

$$\pi : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{X} : \pi(\alpha) = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{\alpha|n}.$$

Παίρνοντας όριο $m \rightarrow \infty$ στην (2.16) έχουμε $d(x_{\alpha|n}, \pi(\alpha)) \leq 2^{-n}$ για κάθε $\alpha \in \mathcal{N}$. Επομένως αν $\beta \in \mathcal{N}_{\alpha|n}$, δηλαδή αν $\beta|n = \alpha|n$ ισχύει

$$d(\pi(\alpha), \pi(\beta)) \leq d(\pi(\alpha), x_{\alpha|n}) + d(x_{\alpha|n}, \pi(\beta)) \leq 2^{-n+1}$$

για κάθε $\alpha, \beta \in \mathcal{N}$. Είναι τότε άμεσο ότι η π είναι συνεχής (και μάλιστα ομοιόμορφα συνεχής).

Τέλος δείχνουμε ότι η π είναι επιμορφισμός. Αν $x \in \mathcal{X}$ ορίζουμε το $\alpha : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ ως εξής:

$$\alpha(n) = \text{ο ελάχιστος } k \in \mathbb{N} \text{ με } d(r_k, x) < 2^{-(n+2)}.$$

Τότε $d(r_{\alpha(n)}, x) < 2^{-(n+2)}$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$ και

$$d(r_{\alpha(n-1)}, r_{\alpha(n)}) \leq d(r_{\alpha(n-1)}, x) + d(x, r_{\alpha(n)}) < 2^{-(n+1)} + 2^{-(n+2)} < 2^{-n}$$

για κάθε $n \geq 1$. Προκύπτει με επαγωγή ότι

$$x_{\alpha|(n+1)} = r_{\alpha(n)} \quad \text{για κάθε } n \in \mathbb{N}.$$

(Για το συγκεκριμένο α συμβαίνει πάντα η δεύτερη περίπτωση του ορισμού της $x_{\alpha|n}$.)
Επομένως

$$\pi(\alpha) = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{\alpha|n} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{\alpha|(n+1)} = \lim_{n \rightarrow \infty} r_{\alpha(n)} = x$$

και η π είναι επιμορφισμός. \square

Παρατήρηση 2.3.6. Η συνάρτηση $\pi : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{X}$ της προηγούμενης απόδειξης επιδέχεται αντίστροφη συνάρτηση. Δηλαδή υπάρχει μονομορφισμός $\tau : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{N}$ με

$$\pi(\tau(x)) = x \quad \text{για κάθε } x \in \mathcal{X} \quad \text{και} \quad \tau(\pi(\alpha)) = \alpha \quad \text{για κάθε } \alpha \in \tau[\mathcal{X}].$$

Η συνάρτηση τ δίνεται στην προηγούμενη απόδειξη,

$$\tau(x)(n) = \text{ο ελάχιστος } k \in \mathbb{N} \text{ με } d(r_k, x) < 2^{-(n+2)}, \quad x \in \mathcal{X}, n \in \mathbb{N}.$$

Αν θέσουμε $\alpha = \tau(x)$ τότε όπως δείξαμε $\pi(\alpha) = x$, δηλαδή $\pi(\tau(x)) = x$ για κάθε $x \in \mathcal{X}$. Από αυτό προκύπτει ότι η τ είναι μονομορφισμός,

$$\tau(x_1) = \tau(x_2) \implies \pi(\tau(x_1)) = \pi(\tau(x_2)) \implies x_1 = x_2.$$

Επιπλέον για κάθε $\alpha = \tau(x)$ έχουμε

$$\tau(\pi(\alpha)) = \tau(\pi(\tau(x))) = \tau(x) = \alpha.$$

Πόρισμα 2.3.7. Κάθε Πολωνικός χώρος έχει πληθάρημο μικρότερο ή ίσο του συνεχούς.

Απόδειξη. Από την Παρατήρηση 2.3.6 για κάθε Πολωνικό χώρο \mathcal{X} υπάρχει μονομορφισμός $f : \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{N}^{\mathbb{N}}$. Άρα $\mathcal{X} \leq_c \mathbb{N}^{\mathbb{N}} =_c \mathbb{R}$. \square

Υπάρχουν φυσικά Πολωνικοί χώροι που δεν είναι ισοπληθικοί με τον \mathbb{R} όπως για παράδειγμα ο \mathbb{N} . Θα δούμε ότι τα δύο τελευταία σύνολα αποτελούν τις μοναδικές “πληθικότητες” Πολωνικών χώρων έτσι που η τελευταία κλάση συνόλων ικανοποιεί την Υπόθεση του Συνεχούς.

Ορισμός 2.3.8. Το σύνολο όλων των **δυναδικών (άπειρων) ακολουθιών** είναι το $\{0, 1\}^{\mathbb{N}}$ το οποίο συμβολίζεται και ως $2^{\mathbb{N}}$. Προφανώς αυτό είναι υποσύνολο του \mathcal{N} και θεωρούμε σε αυτό τη μετρική

$$d_{2^{\mathbb{N}}} = d_{\mathcal{N}}|(2^{\mathbb{N}} \times 2^{\mathbb{N}}).$$

Ο **χώρος του Cantor** είναι ο μετρικός χώρος $(2^{\mathbb{N}}, d_{2^{\mathbb{N}}})$. Χρησιμοποιούμε τον ίδιο όρο και για τον τοπολογικό χώρο που προκύπτει.

Πρόταση 2.3.9. Ο $(2^{\mathbb{N}}, d_{2^{\mathbb{N}}})$ είναι συμπαγής μετρικός χώρος και συνεπώς ο αντίστοιχος τοπολογικός χώρος είναι Πολωνικός.

Απόδειξη. Αν δείξουμε ότι ο $(2^{\mathbb{N}}, d_{2^{\mathbb{N}}})$ είναι συμπαγής μετρικός χώρος, ισοδύναμα ότι το $2^{\mathbb{N}}$ είναι συμπαγές υποσύνολο του \mathcal{N} , θα έχουμε επίσης ότι το $2^{\mathbb{N}}$ είναι κλειστό στον \mathcal{N} . Συνεπώς θα έχουμε ότι ο $2^{\mathbb{N}}$ είναι Πολωνικός χώρος.

Ένας τρόπος για να δείξουμε τη συμπαγεία είναι να παρατηρήσουμε ότι $2^{\mathbb{N}} = \prod_{n \in \mathbb{N}} \{0, 1\}$. Γνωρίζουμε ότι το καρτεσιανό γινόμενο συμπαγών συνόλων είναι συμπαγές σύνολο (για τυχαίο γινόμενο τοπολογικών χώρων χρειάζεται το *Θεώρημα Tychonoff* εδώ έχουμε όμως μόνο αριθμήσιμο γινόμενο). Αφού το $\{0, 1\}$ είναι συμπαγές υποσύνολο του \mathbb{N} έχουμε ότι το $\prod_{n \in \mathbb{N}} \{0, 1\}$ είναι συμπαγές υποσύνολο του $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$ με την τοπολογία γινόμενο. Αυτή όμως είναι η τοπολογία του χώρου του Baire άρα το $2^{\mathbb{N}}$ είναι συμπαγές υποσύνολο του \mathcal{N} .

Δίνουμε μία ακόμα απόδειξη, η οποία στην ουσία εξηγεί γιατί το αριθμήσιμο γινόμενο συμπαγών μετρικών χώρων είναι συμπαγές σύνολο. Δείχνουμε ότι κάθε ακολουθία $(\alpha_i)_{i \in \mathbb{N}}$ στον $2^{\mathbb{N}}$ έχει συγκλίνουσα υπακολουθία. Θεωρούμε αρχικά την ακολουθία $(\alpha_i(0))_{i \in \mathbb{N}}$. Αφού το $\{0, 1\}$ είναι πεπερασμένο υπάρχει υπακολουθία $(\alpha_{k_i^0}(0))_{i \in \mathbb{N}}$ που είναι σταθερή στο $\{0, 1\}$.

Επειτα θεωρούμε την ακολουθία $(\alpha_{k_i^0}(1))_{i \in \mathbb{N}}$. Τότε υπάρχει μια περαιτέρω υπακολουθία $(\alpha_{k_i^1}(1))_{i \in \mathbb{N}}$ η οποία είναι τελικά σταθερή. Συνεχίζοντας αναδρομικά βρίσκουμε μια φθίνουσα ακολουθία

$$L_0 \supseteq L_1 \supseteq \dots \supseteq L_n \supseteq \dots$$

$$L_n = \{k_i^n \mid i \in \mathbb{N}\} = \{k_0^n < \dots < k_i^n < \dots\}, \quad n \in \mathbb{N},$$

από άπειρα υποσύνολα του \mathbb{N} , έτσι ώστε για κάθε n η ακολουθία $(\alpha_{k_i^n}(n))_{i \in \mathbb{N}}$ είναι σταθερή.

Για κάθε $n < m$ οι φυσικοί αριθμοί $k_0^m < \dots < k_m^m$ ανήκουν στο σύνολο $L_n = \{k_0^n < \dots < k_i^n < \dots\}$. Προκύπτει ότι $k_m^m = k_i^n$ για κάποιο $i \geq n$. Επομένως

$$k_m^m = k_i^n \geq k_m^n > k_n^n.$$

Άρα η $(s_i)_{i \in \mathbb{N}} = (k_i^i)_{i \in \mathbb{N}}$ είναι γνησίως αύξουσα ακολουθία φυσικών αριθμών
Ορίζουμε

$$\alpha(n) = \alpha_{k_n^n}(n)$$

για κάθε $n \in \mathbb{N}$. Τότε $\alpha \in 2^{\mathbb{N}}$.

Δείχνουμε ότι $\alpha_{s_i} \rightarrow \alpha$. Έστω $n \in \mathbb{N}$, τότε για κάθε $i \geq n$ έχουμε

$$\alpha_{s_i}(n) = \alpha_{k_i^i}(n) = \alpha_{k_j^n}(n) \quad \text{για κάποιο } j,$$

όπου στην τελευταία ισότητα χρησιμοποιήσαμε ότι $L_i \subseteq L_n$. Επειδή για κάθε n η ακολουθία $(\alpha_{k_j^n}(n))_{j \in \mathbb{N}}$ είναι σταθερή έχουμε

$$\alpha_{k_j^n}(n) = \alpha_{k_n^n}(n) = \alpha(n).$$

Άρα για κάθε $n \in \mathbb{N}$ έχουμε $\lim_{i \rightarrow \infty} \alpha_{s_i}(n) = \alpha(n)$ και από την (2.14) έχουμε $\alpha_{s_i} \xrightarrow{d_{\mathcal{N}}} \alpha$. Αφού τα α_i , $i \in \mathbb{N}$ και το α είναι στοιχεία του $2^{\mathbb{N}}$ και η μετρική $d_{2^{\mathbb{N}}}$ είναι ο περιορισμός της $d_{\mathcal{N}}$ στο $2^{\mathbb{N}} \times 2^{\mathbb{N}}$ προκύπτει ότι $\alpha_{s_i} \xrightarrow{d_{2^{\mathbb{N}}}} \alpha$. \square

Θεώρημα 2.3.10. Για κάθε τέλει Πολωνικό χώρο \mathcal{X} υπάρχει ένας συνεχής μοιρομορφισμός $\tau : 2^{\mathbb{N}} \rightarrow \mathcal{X}$.

Απόδειξη. Θέτουμε $I = \{0, 1\}^{<\mathbb{N}}$ και σταθεροποιούμε μια συμβατή μετρική d στον \mathcal{X} .

Κατασκευάζουμε αναδρομικά μια οικογένεια $(V_u)_{u \in I}$ από d -ανοικτές μπάλες του \mathcal{X} με τις εξής ιδιότητες:

$$\begin{aligned} \text{ακτίνα}(V_u) &\leq 2^{-|u|} \\ \overline{V_{u*(i)}} &\subseteq \overline{V_u}, \quad i = 0, 1 \\ \overline{V_{u*(0)}} \cap \overline{V_{u*(1)}} &= \emptyset \end{aligned}$$

για κάθε $u \in I$.

Στο αρχικό βήμα επιλέγουμε ένα $x_0 \in \mathcal{X}$ και παίρνουμε $V_\Lambda = B_d(x_0, 1)$. Υποθέτουμε ότι για κάποιο $n \geq 1$ έχουμε ορίσει V_u όπως πιο πάνω για όλα τα $w \in I$ με $1 \leq |w| < n$.

Ορίζουμε τα $V_{w*(i)}$, $i = 0, 1$, για όλα τα $w \in I$ με $|w| = n - 1$. Θεωρούμε ένα τέτοιο w . Η μπάλα V_w δεν μπορεί να περιέχει μόνο το κέντρο της, αλλιώς αυτό θα ήταν μεμονωμένο σημείο του \mathcal{X} . Επομένως υπάρχουν στοιχεία x_0^w, x_1^w της V_w με $x_0^w \neq x_1^w$. Αφού το V_w είναι ανοικτό σύνολο, υπάρχουν ανοικτές μπάλες B_0^w και B_1^w με κέντρα τα x_0^w, x_1^w αντίστοιχα, με ακτίνες μικρότερες ή ίσες του 2^{-n} , που ικανοποιούν επίσης

$$\overline{B_0^w} \cap \overline{B_1^w} = \emptyset \quad \text{και} \quad \overline{B_i^w} \subseteq V_w \subseteq \overline{V_w} \quad i = 0, 1.$$

Οπότε ορίζουμε $V_{w*(i)} = B_i^w$, $i = 0, 1$. Είναι σαφές ότι ικανοποιούνται πιο πάνω ιδιότητες. Αυτό ολοκληρώνει την κατασκευή.

Για κάθε $\alpha \in 2^{\mathbb{N}}$ η $(\overline{V_{\alpha|n}})_{n \in \mathbb{N}}$ είναι μια φθίνουσα ακολουθία κλειστών συνόλων των οποίων η διάμετρος συγκλίνει στο 0. Αφού ο (\mathcal{X}, d) είναι πλήρης, από ένα γνωστό θεώρημα του Cantor, η τομή

$$\bigcap_{n \in \mathbb{N}} \overline{V_{\alpha|n}}$$

είναι μονοσύνολο. Ορίζουμε

$$\tau : 2^{\mathbb{N}} \rightarrow \mathcal{X} : \{\tau(\alpha)\} = \bigcap_{n \in \mathbb{N}} \overline{V_{\alpha|n}}.$$

Αν τα $\alpha \neq \beta$ είναι στοιχεία του $2^{\mathbb{N}}$ και n είναι ο ελάχιστος k με $\alpha(k) \neq \beta(k)$ τότε

$$\alpha|n = \beta|n \quad \text{και} \quad \alpha(n) \neq \beta(n).$$

Χωρίς βλάβη της γενικότητας θεωρούμε $\alpha(n) = 0$ και $\beta(n) = 1$. Επίσης θέτουμε $w = \alpha|n = \beta|n$. Τότε $\tau(\alpha) \in \overline{V_{\alpha|(n+1)}}$, $\tau(\beta) \in \overline{V_{\beta|(n+1)}}$, και

$$\overline{V_{\alpha|(n+1)}} \cap \overline{V_{\beta|(n+1)}} = \overline{V_{w*(0)}} \cap \overline{V_{w*(1)}} = \emptyset.$$

Επομένως $\tau(\alpha) \neq \tau(\beta)$. Τέλος δείχνουμε ότι η τ είναι συνεχής. Θέτουμε

$$x_u = \text{το κέντρο της ανοικτής μπάλας } V_u.$$

Εστω $\alpha \in 2^{\mathbb{N}}$. Τότε για κάθε n έχουμε $\tau(\alpha) \in \overline{V_{\alpha|n}}$ και επομένως

$$d(\tau(\alpha), x_{\alpha|n}) \leq 2 \cdot \text{ακτίνα}(V_{\alpha|n}) \leq 2 \cdot 2^{-n} = 2^{-n+1}.$$

Συνεπώς αν $\beta \in \mathcal{N}_{\alpha|n}$, δηλαδή αν $\beta|n = \alpha|n$ τότε

$$d(\tau(\alpha), \tau(\beta)) \leq d(\tau(\alpha), x_{\alpha|n}) + d(x_{\alpha|n}, \tau(\beta)) \leq 2 \cdot 2^{-n+1} = 2^{-n+2}.$$

Προκύπτει από το πιο πάνω ότι η τ είναι συνεχής. □

Η αντίστοιχη πληθαρική συνέπεια είναι η εξής.

Πόρισμα 2.3.11. Κάθε μη κενό τέλει υποσύνολο ενός Πολωνικού χώρου έχει του πληθάρημο του συνεχούς.

Απόδειξη. Αν \mathcal{X} είναι Πολωνικός χώρος και P είναι μη κενό τέλει υποσύνολό του τότε ο P με τη σχετική τοπολογία είναι τέλει Πολωνικός χώρος.

Από το Θεώρημα 2.3.10 υπάρχει συνεχής μονομορφισμός $\tau : 2^{\mathbb{N}} \rightarrow P$ και ειδικότερα $2^{\mathbb{N}} \leq_c P$. Άρα

$$\mathbb{R} =_c \{0, 1\}^{\mathbb{N}} = 2^{\mathbb{N}} \leq_c P \leq_c \mathbb{R}$$

όπου στην τελευταία σχέση \leq_c χρησιμοποιήσαμε το Πόρισμα 2.3.7. Από το Θεώρημα Schröder-Bernstein $P =_c \mathbb{R}$. \square

Ασκήσεις

Άσκηση 2.3.12. Η συνάρτηση $d_{\mathcal{N}}$ είναι μετρική στο $\mathcal{N} = \mathbb{N}^{\mathbb{N}}$.

Άσκηση 2.3.13. Οι συναρτήσεις

$$s : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{N} : s(\alpha) = \alpha^*$$

$$f : \mathcal{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}^{<\mathbb{N}} : f(\alpha, n) = \alpha|n$$

$$g : \mathcal{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} : g(\alpha, n) = \overline{\alpha(n)}$$

$$h : \mathcal{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} : h(\alpha, n) = (\alpha)_n$$

όπως δίνονται στις (2.9) - (2.12) είναι συνεχείς.

2.4. Το Θεώρημα Cantor-Bendixson

Το επόμενο αποτέλεσμα δίνει τη σχέση ανάμεσα στα κλειστά και τέλεια υποσύνολα ενός Πολωνικού χώρου.

Θεώρημα 2.4.1 (Cantor-Bendixson). *Για κάθε κλειστό υποσύνολο C ενός Πολωνικού χώρου \mathcal{X} υπάρχουν δύο σύνολα $P, S \subseteq C$, με το P τέλει (ενδεχομένως κενό), το S αριθμήσιμο, $P \cap S = \emptyset$ και $C = P \cup S$.*

Μάλιστα η πιο πάνω διάσπαση είναι μοναδική, δηλαδή αν P', S' είναι δύο ξένα υποσύνολα του C με το P' τέλει, το S' αριθμήσιμο και $P' \cup S' = C$ τότε $P' = P$ και $S' = S$.

Απόδειξη. Θεωρούμε το κλειστό $C \subseteq \mathcal{X}$ και μια αριθμήσιμη βάση $(V_n)_{n \in \mathbb{N}}$ για την τοπολογία του \mathcal{X} . Ορίζουμε

$$P = \{x \in C \mid \forall n \text{ με } x \in V_n \text{ το σύνολο } V_n \cap C \text{ είναι υπεραριθμήσιμο}\}$$

$$S = C \setminus P.$$

Είναι σαφές ότι $P \cap C = \emptyset$ και ότι $C = P \cup S$. Δείχνουμε ότι το S είναι αριθμήσιμο σύνολο. Για κάθε $x \in S$ έχουμε $x \notin P$ και άρα υπάρχει $n \in \mathbb{N}$ έτσι ώστε $x \in V_n$ και το σύνολο $V_n \cap C$ είναι αριθμήσιμο. Ορίζουμε $n(x)$ να είναι ο ελάχιστος τέτοιος n και $I = \{n(x) \in \mathbb{N} \mid x \in S\}$. Τότε το I είναι αριθμήσιμο ως υποσύνολο του \mathbb{N} . Επίσης

$$S \subseteq \bigcup_{n \in I} (V_n \cap C)$$

ακριβώς γιατί $x \in V_{n(x)}$ για κάθε $x \in S \subseteq C$. Αφού το $V_n \cap C$ είναι αριθμήσιμο για κάθε $n \in I$ έχουμε ότι το σύνολο S περιέχεται σε μια αριθμήσιμη ένωση αριθμησίμων συνόλων. Συνεπώς το S είναι αριθμήσιμο.

Έπειτα δείχνουμε ότι το P είναι κλειστό σύνολο. Έστω $(x_i)_{i \in \mathbb{N}}$ μια ακολουθία μέσα από το P που συγκλίνει στο $x \in \mathcal{X}$. Τότε για κάθε $n \in \mathbb{N}$ με $x \in V_n$ υπάρχει $i \in \mathbb{N}$ με $x_i \in V_n$. Αφού $x_i \in P$ έχουμε ότι το σύνολο $V_n \cap C$ είναι υπεραριθμήσιμο. Άρα $x \in P$ και το P είναι κλειστό.

Επίσης το P δεν έχει μεμονωμένα σημεία. Θεωρούμε $x \in P$ και $n \in \mathbb{N}$ με $x \in V_n$. Το σύνολο

$$V_n \cap C = (V_n \cap P) \cup (V_n \cap S)$$

είναι υπεραριθμήσιμο ενώ το $V_n \cap S$ είναι αριθμήσιμο ως υποσύνολο του S . Συνεπώς το $V_n \cap P$ είναι υπεραριθμήσιμο και ειδικότερα υπάρχει $y \in V_n \cap P$ που είναι διάφορο του x . Άρα το x δεν είναι μεμονωμένο σημείο του P .

Τέλος δείχνουμε τη μοναδικότητα. Θεωρούμε ένα τέλειο P' και ένα αριθμήσιμο S' με $P' \cap S' = \emptyset$ και

$$P' \cup S' = P \cup S.$$

Αν $x \in P'$ και $x \in V_n$ τότε, χρησιμοποιώντας μια κατάλληλα μικρή ανοικτή μπάλα του \mathcal{X} , μπορούμε να βρούμε m έτσι ώστε $x \in V_m \subseteq \overline{V_m} \subseteq V_n$. Τότε το $\overline{V_m} \cap P'$ είναι μη κενό κλειστό υποσύνολο του $\overline{V_m} \cap P' \subseteq V_n \cap C$. Από την άλλη το $\overline{V_m} \cap P'$ δεν έχει μεμονωμένα σημεία (Άσκηση 2.4.7), άρα είναι μη κενό τέλειο σύνολο. Ειδικότερα είναι υπεραριθμήσιμο (Πόρισμα 2.3.11) και συνεπώς το υπερσύνολο $V_n \cap C$ είναι υπεραριθμήσιμο. Αυτό σημαίνει ότι $x \in P$. Αυτό αποδεικνύει ότι $P' \subseteq P$.

Αν $x \in S'$ τότε $x \notin P'$ και αφού το τελευταίο σύνολο είναι κλειστό υπάρχει n με $x \in V_n$ και $V_n \cap P' = \emptyset$. Άρα $V_n \cap C = V_n \cap S' \subseteq S'$ και το σύνολο $V_n \cap C$ είναι αριθμήσιμο. Προκύπτει ότι $x \in S$ και συνεπώς $S' \subseteq S$. Ισοδύναμα $P \subseteq P'$.

Καταλήγουμε ότι $P = P'$ και $S = S'$. \square

Ορισμός 2.4.2. Έστω \mathcal{X} Πολωνικός χώρος και $C \subseteq \mathcal{X}$ κλειστό. Θεωρούμε τα σύνολα P, S όπως στο Θεώρημα Cantor-Bendixson. Δηλαδή το P είναι τέλειο, το S είναι αριθμήσιμο, $P \cap S = \emptyset$ και $P \cup S = C$.

Το μοναδικό P όπως πιο πάνω είναι ο **τέλειος πυρήνας** (perfect kernel) του C και το μοναδικό S όπως πιο πάνω είναι το **διάσπαρτο μέρος** (scattered part) του C .

Μια άμεση εφαρμογή του Θεωρήματος Cantor-Bendixson είναι η επέκταση του Θεωρήματος 2.3.10 στους υπεραριθμήσιμους Πολωνικούς χώρους.

Πόρισμα 2.4.3. Για κάθε υπεραριθμήσιμο Πολωνικό χώρο \mathcal{X} υπάρχει ένας συνεχής μονομορφισμός $\tau : 2^{\mathbb{N}} \rightarrow \mathcal{X}$.

Απόδειξη. Από το Θεώρημα Cantor-Bendixson το κλειστό σύνολο \mathcal{X} διασπάται στον τέλειό του πυρήνα P και στο διάσπαρτο του μέρος S . Αν είχαμε $P = \emptyset$ τότε το $\mathcal{X} = S$ θα ήταν αριθμήσιμο σύνολο, άτοπο.

Άρα $P \neq \emptyset$. Αφού το P είναι κλειστό προκύπτει ότι είναι Πολωνικός χώρος και μάλιστα τέλειος. Από το Θεώρημα 2.3.10 υπάρχει ένας συνεχής επιμορφισμός

$$\tau : 2^{\mathbb{N}} \rightarrow P \subseteq \mathcal{X}.$$

Η τ είναι η ζητούμενη συνάρτηση. \square

Μια άλλη εφαρμογή του Θεωρήματος Cantor-Bendixson είναι η εξής.

Πόρισμα 2.4.4. Τα κλειστά υποσύνολα Πολωνικών χώρων ικανοποιούν την Υπόθεση του Συνεχούς.

Απόδειξη. Έστω \mathcal{X} Πολωνικός χώρος και $C \subseteq \mathcal{X}$ κλειστό. Θεωρούμε τον τέλειο πυρήνα P και το διάσπαρτο μέρος S του C .

Αν $P = \emptyset$ τότε $C = P \cup S = S$ και άρα το C είναι αριθμήσιμο. Αν $P \neq \emptyset$ από τα Πορίσματα 2.3.11 και 2.3.7 έχουμε

$$\mathbb{R} \leq_c P \leq_c C \leq_c \mathcal{X} \leq_c \mathbb{R},$$

όπου στη δεύτερη και τρίτη σχέση \leq_c πιο πάνω χρησιμοποιήσαμε την ταυτοτική συνάρτηση. Από το Θεώρημα Schröder-Bernstein προκύπτει ότι $C =_c \mathbb{R}$. \square

Αξίζει να απομονώσουμε τον εξής χαρακτηρισμό των κλειστών υποσυνόλων Πολωνικών χώρων που είναι αριθμήσιμα, ο οποίος προκύπτει από τα επιχειρήματα της προηγούμενης απόδειξης:

Αν το C είναι κλειστό υποσύνολο ενός Πολωνικού χώρου \mathcal{X} , τότε το C είναι αριθμήσιμο αν και μόνο αν ο τέλειος πυρήνας του είναι το κενό σύνολο.

Ασκήσεις

Άσκηση 2.4.5. Βρείτε τον τέλειο πυρήνα και το διάσπαρτο μέρος των κλειστών συνόλων

$$A = [0, 1] \cup \{1 + 2^{-n} \mid n \in \mathbb{N}\}$$

$$B = A \cup \{1 + 2^{-n} + 3^{-m} \mid n, m \in \mathbb{N}\}$$

$$C = \{1\} \cup \{1 + 2^{-n} \mid n \in \mathbb{N}\}.$$

Άσκηση 2.4.6. Τα μεμονωμένα σημεία ενός κλειστού συνόλου περιέχονται στο διάσπαρτο μέρος του. Ισχύει το αντίστροφο;

Άσκηση 2.4.7. Αν (X, d) είναι μετρικός χώρος και το $P \subseteq X$ είναι τέλειο, τότε για κάθε ανοικτό V το σύνολο $\overline{V} \cap P$ είναι τέλειο (ευδεχομένως κενό).

Άσκηση 2.4.8. Ο τέλειος πυρήνας ενός κλειστού υποσυνόλου Πολωνικού χώρου είναι το μεγαλύτερο τέλειο υποσύνολό του. Δηλαδή αν ο \mathcal{X} είναι Πολωνικός χώρος, το $C \subseteq \mathcal{X}$ είναι κλειστό και το $P_0 \subseteq C$ είναι τέλειο τότε το P_0 περιέχεται στον τέλειο πυρήνα του C .

Άσκηση 2.4.9. Τα G_δ υποσύνολα Πολωνικών χώρων ικανοποιούν την Υπόθεση του Συνεχούς.

2.5. Δένδρα

Ορισμός 2.5.1. Έστω X μη κενό σύνολο. Ένα $T \subseteq X^{<\mathbb{N}}$ είναι **δένδρο** στο X αν είναι μη κενό και κλειστό προς τα κάτω ως προς τη διάταξη \sqsubseteq , δηλαδή αν $w \sqsubseteq u$ και $u \in T$ τότε $w \in T$.

Για παράδειγμα το σύνολα $X^{<\mathbb{N}}$ και $\{\Lambda\}$ είναι δένδρα στο X . Άλλο παράδειγμα είναι το $T = \{\Lambda, (a), (a, b), (a, c), (d)\}$ για κάποια $a, b, c, d \in X$.

Παρατηρούμε ότι η κεινή ακολουθία Λ ανήκει σε κάθε δένδρο, γιατί $\Lambda \sqsubseteq u$ για κάθε $u \in T \neq \emptyset$.

Στους επόμενους ορισμούς θεωρούμε ότι έχουμε ένα δένδρο T . Η **ρίζα** του T είναι η κεινή ακολουθία Λ . Τα στοιχεία του T ονομάζονται **κόμβοι** ή **φύλλα** του T . Ένας κόμβος u του T ονομάζεται **τερματικός** αν δεν έχει γνήσια επέκταση w μέσα στο T , δηλαδή για κάθε $w \in T$ με $u \sqsubseteq w$ έχουμε $u = w$.

Το T είναι **κλαδεμένο** ή **περικομμένο** (pruned) αν δεν έχει τερματικούς κόμβους.

Με τον όρο **άπειρο κλαδί** του T εννοούμε μια συνάρτηση $f : \mathbb{N} \rightarrow X$ με την ιδιότητα

$$(f(0), \dots, f(n)) \in T$$

για κάθε $n \in \mathbb{N}$.

Το **σώμα** $[T]$ του T είναι το σύνολο όλων των άπειρων κλαδιών του T . Ένα δένδρο T ονομάζεται **θεμελιωμένο** (well-founded) αν $[T] = \emptyset$ και **μη θεμελιωμένο** (ill-founded) αν $[T] \neq \emptyset$.

Επειδή υποθέσαμε ότι κάθε δένδρο είναι μη κενό σύνολο, προκύπτει ότι κάθε κλαδεμένο δένδρο έχει μη κενό σώμα.

Ένα δένδρο S στο X θα λέγεται **υποδένδρο** του T αν $S \subseteq T$. Για κάθε $u \in X^{<\mathbb{N}}$ ορίζουμε το **υποδένδρο** T_u των **ακολουθιών που είναι συμβατές** με το u ,

$$T_u = \{w \in T \mid u \sqsubseteq w\}.$$

Με άλλα λόγια $w \in T_u$ αν και μόνο αν $w \in T$ και είτε $w \sqsubseteq u$ είτε $u \sqsubseteq w$. Αυτός ο ορισμός έχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον όταν $u \in T$, αλλιώς το T_u αποτελείται μόνο από τα γνήσια αρχικά τμήματα της u που ανήκουν στο T , μπορεί να έχουμε $T_u = \{\Lambda\}$.

Είναι εύκολο να δει κανείς ότι το T_u είναι δένδρο και πως για κάθε $u \in T$ που δεν είναι τερματικός κόμβος του T ισχύει

$$(2.17) \quad T_u = \bigcup \{T_{u*(x)} \mid u*(x) \in T\}$$

$$(2.18) \quad [T_u] = \bigcup \{[T_{u*(x)}] \mid u*(x) \in T\}$$

για κάθε $u \in X^{<\mathbb{N}}$ (Άσκηση 2.5.15).

Δένδρα και τοπολογία. Είναι σαφές ότι το σώμα ενός δένδρου T στο X είναι υποσύνολο του $X^{\mathbb{N}}$. Αν θεωρήσουμε στο X τη διακριτή τοπολογία τότε ο $X^{\mathbb{N}}$ είναι μετρικός χώρος. Όπως και με τον χώρο του Baire μια βάση για την τοπολογία του $X^{\mathbb{N}}$ είναι η οικογένεια όλων των συνόλων της μορφής

$$\{x_0\} \times \cdots \times \{x_{n-1}\} \times X \times X \times \dots$$

όπου $x_0, \dots, x_{n-1} \in X$.

Μια ακολουθία $(f_i)_{i \in \mathbb{N}}$ στον $X^{\mathbb{N}}$ συγκλίνει στην $f \in X^{\mathbb{N}}$ αν και μόνο αν για κάθε $n \in \mathbb{N}$ η ακολουθία $(f_i(n))_{i \in \mathbb{N}}$ συγκλίνει στο $f(n)$ μέσα στον X , ισοδύναμα για κάθε $n \in \mathbb{N}$ έχουμε $f_i(n) = f(n)$ για όλα τα μεγάλα i .

Τα σώματα δένδρων σε ένα σύνολο X χαρακτηρίζουν τα κλειστά σύνολα του $X^{\mathbb{N}}$.

Πρόταση 2.5.2. Έστω X μη κενό σύνολο με τη διακριτή μετρική και $F \subseteq X^{\mathbb{N}}$. Τότε το F είναι κλειστό ως προς την τοπολογία γινόμενο του $X^{\mathbb{N}}$ αν και μόνο αν υπάρχει δένδρο T στο X με $F = [T]$.

Απόδειξη. Για την ευθεία κατεύθυνση θεωρούμε ότι το F είναι κλειστό υποσύνολο του $X^{\mathbb{N}}$. Αν το F είναι το κενό σύνολο τότε επιλέγουμε για T ένα οποιοδήποτε δένδρο πεπερασμένης διακλάδωσης με κενό σώμα, π.χ. το $\{\Lambda\}$.

Επομένως υποθέτουμε ότι $F \neq \emptyset$. Αν $u \in X^{<\mathbb{N}}$ και $f \in X^{\mathbb{N}}$ γράφουμε $u \sqsubseteq f$ όταν $f(k) = u(k)$ για κάθε $k < |u|$. Ορίζουμε $T \subseteq X^{<\mathbb{N}}$ ως εξής:

$$u \in T \iff \exists f \in F \text{ } u \sqsubseteq f.$$

Επειδή $F \neq \emptyset$ έχουμε $\Lambda \in T$ και άρα $T \neq \emptyset$. Είναι άμεσο από τον ορισμό ότι το T είναι δένδρο.

Δείχνουμε ότι $F = [T]$. Έστω $g \in F$ και $n \in \mathbb{N}$. Είναι προφανές ότι υπάρχει $f \in F$ με $(g(0), \dots, g(n)) \sqsubseteq f$, συγκεκριμένα μπορούμε να πάρουμε $f = g$. Άρα $(g(0), \dots, g(n)) \in T$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$ και $g \in [T]$. Αντίστροφα αν $g \in [T]$ τότε για κάθε $n \in \mathbb{N}$ έχουμε $(g(0), \dots, g(n)) \in T$ και άρα υπάρχει $f_n \in F$ με $(g(0), \dots, g(n)) \sqsubseteq f_n$.

Η ακολουθία $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ συγκλίνει στο στοιχείο g . Πράγματι για κάθε $k \in \mathbb{N}$, παίρνουμε $n_0 = k$ και για κάθε $n \geq n_0$ έχουμε $f_n(k) = g(k)$ γιατί $(g(0), \dots, g(n)) \sqsubseteq f_n$. Άρα $f_n(k) \xrightarrow{X} g(k)$ για κάθε $k \in \mathbb{N}$ και επομένως $f_n \xrightarrow{X^{\mathbb{N}}} g$. Αφού $f_n \in F$ για κάθε n και το F είναι κλειστό προκύπτει ότι $g \in F$. Άρα $F = [T]$ και έχουμε αποδείξει την ευθεία κατεύθυνση.

Για την αντίστροφη κατεύθυνση θεωρούμε μια ακολουθία $(f_i)_{i \in \mathbb{N}}$ στοιχείων του $[T]$ η οποία συγκλίνει στο $f \in X^{\mathbb{N}}$. Δείχνουμε ότι $f \in T$. Για κάθε n , υπάρχει i_0 έτσι ώστε για κάθε $i \geq i_0$ και κάθε $k \leq n$ έχουμε $f_i(k) = f(k)$. Ειδικότερα $(f(0), \dots, f(n)) \sqsubseteq f_{i_0}$. Εξ ορισμού $(f(0), \dots, f(n)) \in T$. Προκύπτει ότι $f \in [T]$. □

Πόρισμα 2.5.3. Ένα σύνολο $F \subseteq \mathcal{N}$ είναι κλειστό αν και μόνο αν υπάρχει δένδρο T στο \mathbb{N} με $F = [T]$.

Απόδειξη. Εφαρμόζουμε την Πρόταση 2.5.2 για $X = \mathbb{N}$ και θυμίζουμε ότι η τοπολογία του χώρου του Baire είναι η τοπολογία γινόμενο στο $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$ (Πρόταση 2.3.3). □

Τα συμπαγή σύνολα του $X^{\mathbb{N}}$ μπορούν επίσης να χαρακτηριστούν από τα σώματα μιας ειδικής κατηγορίας δένδρων.

Ορισμός 2.5.4. Έστω X μη κενό σύνολο και T ένα δένδρο στο X . Το T είναι **πεπερασμένης διακλάδωσης** αν για κάθε $u \in T$ υπάρχουν το πολύ πεπερασμένα $w \in T$ που είναι άμεσες επεκτάσεις του u , δηλαδή για κάθε $u \in T$ υπάρχουν $x_0, \dots, x_{n-1} \in X$ έτσι ώστε

$$\forall x (u * (x) \in T \iff x \in \{x_0, \dots, x_{n-1}\}).$$

Το προηγούμενο n μπορεί να παίρνει οσοδήποτε μεγάλες τιμές. Μπορούμε ακόμα να έχουμε $n = 0$, οπότε σε αυτή την περίπτωση η πιο πάνω ισοδυναμία σημαίνει ότι ο κόμβος $u \in T$ είναι τερματικός.

Ένα κλασσικό παράδειγμα δένδρου πεπερασμένης διακλάδωσης είναι το σύνολο $\{0, 1\}^{<\mathbb{N}}$ όλων των **πεπερασμένων δυαδικών ακολουθιών**.

Λήμμα 2.5.5 (Το Λήμμα του König). *Κάθε άπειρο δένδρο πεπερασμένης διακλάδωσης έχει άπειρο κλαδί.*

Απόδειξη. Θεωρούμε $X \neq \emptyset$ και ένα άπειρο δένδρο T στο X που είναι πεπερασμένης διακλάδωσης. Ορίζουμε

$$P = \{u \in T \mid \text{το υποδένδρο } T_u \text{ είναι άπειρο}\}.$$

Αφού $T_\Lambda = T$ έχουμε $\Lambda \in P$. Ισχυριζόμαστε ότι για κάθε $u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$,

$$(2.19) \quad u \in P \implies \exists x u * (x) \in P.$$

Θεωρούμε $u \in P$. Αφού το δένδρο T είναι πεπερασμένης διακλάδωσης υπάρχουν $x_0, \dots, x_{n-1} \in T$ έτσι ώστε $u * (x) \in T$ αν και μόνο αν $x \in \{x_0, \dots, x_{n-1}\}$. Επιπλέον το u δεν είναι τερματικός κόμβος του T γιατί το T_u είναι άπειρο σύνολο. Από την (2.17) έχουμε ότι

$$T_u = \bigcup_{u*(x) \in T} T_{u*(x)} = \bigcup_{k=0}^{n-1} T_{u*(x_k)}.$$

Ένα από τα πιο πάνω σύνολα της πεπερασμένης ένωσης είναι άπειρο, γιατί αλλιώς το T_u θα ήταν πεπερασμένο. Άρα υπάρχει $k < n$ με $u * (x_k) \in P$.

Έχοντας αποδείξει την πιο πάνω συνεπαγωγή μπορούμε να βρούμε μια ακολουθία $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ στο X , ως εξής. Αρχικά εφαρμόζουμε την (2.19) για $u = \Lambda \in P$ και βρίσκουμε $x_0 \in X$ με $(x_0) \in P$. Έπειτα πάλι με εφαρμογή της (2.19) βρίσκουμε ένα στοιχείο $x_1 \in X$ με $(x_0, x_1) \in P$. Συνεχίζουμε ομοίως και βρίσκουμε μια ακολουθία $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ στο X με την ιδιότητα $(x_0, \dots, x_{n-1}) \in P$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$.

Ειδικότερα έχουμε $(x_0, \dots, x_{n-1}) \in T$ για κάθε n και επομένως η $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ είναι άπειρο κλαδί του X .

Σημείωση: Εδώ γίνεται χρήση του Αξιώματος Εξαρτημένων Επιλογών (DC), μια ασθενέστερη μορφή του Αξιώματος Επιλογής, η οποία είναι ευρέως αποδεκτή στα κλασσικά Μαθηματικά. Παραπέμπουμε στην Άσκηση 2.5.23 για περισσότερες λεπτομέρειες. \square

Πρόταση 2.5.6 (Συμπαγή σύνολα και δένδρα πεπερασμένης διακλάδωσης). *Έστω X μη κενό σύνολο με τη διακριτή τοπολογία και $K \subseteq X^{\mathbb{N}}$. Τότε το K είναι συμπαγές ως προς την τοπολογία γινόμενο του $X^{\mathbb{N}}$ αν και μόνο αν υπάρχει δένδρο T στο X πεπερασμένης διακλάδωσης με $K = [T]$.*

Απόδειξη. Υποθέτουμε αρχικά ότι το K είναι συμπαγές. Ειδικότερα το K είναι κλειστό και από την Πρόταση 2.5.2 υπάρχει ένα δένδρο R στο X με $K = [R]$. Το R μπορεί να είναι άπειρης διακλάδωσης αλλά θα περάσουμε σε ένα υποδένδρο πεπερασμένης διακλάδωσης με το ίδιο σώμα.

Ορίζουμε $S \subseteq X^{<\mathbb{N}}$ ως εξής,

$$u \in S \iff [R_u] \neq \emptyset.$$

Αν $w \sqsubseteq u$ είναι εύκολο να δει κανείς ότι κάθε ακολουθία που είναι συμβατή με το u είναι συμβατή και με το w , επομένως $R_u \subseteq R_w$. Άρα αν $u \in S$ και $w \sqsubseteq u$ τότε

$\emptyset \neq [R_u] \subseteq [R_w]$ και επομένως $w \in S$. Προκύπτει ότι αν το S είναι μη κενό τότε είναι και δένδρο.

Η περίπτωση $S = \emptyset$ δεν μπορεί να αποκλειστεί: αν $K = \emptyset$ τότε $[R] = \emptyset$ και $S = \emptyset$. Σε αυτή την περίπτωση επιλέγουμε για T ένα οποιοδήποτε δένδρο πεπερασμένης διακλάδωσης που έχει κενό σώμα, π.χ. $T = \{\Lambda\}$.

Στο εξής θεωρούμε ότι $K \neq \emptyset$ και επειδή $K = [R] = [R_\Lambda]$ έχουμε $\Lambda \in S$ και το S είναι δένδρο. Είναι εύκολο να επαληθεύσει κανείς ότι

$$(2.20) \quad [S_w] = [T_w]$$

για κάθε $w \in S$. (Τι συμπεραίνετε σε σχέση με την Άσκηση 2.5.16;)

Ισχυριζόμαστε ότι το S είναι πεπερασμένης διακλάδωσης και ότι $[S] = [R]$, συνεπώς μπορούμε να πάρουμε $T = S$.

Η ισότητα $[S] = [R]$ είναι άμεση από την (2.20) για $w = \Lambda \in S$. Επομένως δείχνουμε ότι το S είναι πεπερασμένης διακλάδωσης.

Έστω $u \in S$. Για κάθε $x \in X$ με $u * (x) \in S$ ορίζουμε

$$V(x) = \{u(0)\} \times \cdots \times \{u(|u| - 1)\} \times \{x\} \times X \times X \times \cdots$$

Τότε η οικογένεια $\{V(x) \mid u * (x) \in S\}$ είναι εύκολα ανοικτό κάλυμμα του συνόλου $[S_u]$. Από την Πρόταση 2.5.2 το $[S_u]$ είναι κλειστό υποσύνολο του K και συνεπώς είναι συμπαγές. Άρα υπάρχουν $x_0, \dots, x_m \in X$ έτσι ώστε

$$[S_u] \subseteq \bigcup_{i=0}^m V(x_i).$$

Δείχνουμε ότι για κάθε $x \in X$ με $u * (x) \in S$ υπάρχει $i \leq m$ με $x = x_i$. Έστω $w = u * (x) \in S$, τότε $[T_w] \neq \emptyset$. Από την (2.20) έχουμε $[S_w] = [T_w]$, άρα υπάρχει $f \in [S_w]$. Τότε $f(|w| - 1) = w(|w| - 1) = x$.

Από την άλλη $f \in [S_w] \subseteq [S_u]$ και άρα υπάρχει $i \leq m$ με $f \in V(x_i)$. Εξ ορισμού $f(|w| - 1) = f(|u|) = x_i$. Συνεπώς $x = x_i$.

Επομένως το S είναι πεπερασμένης διακλάδωσης. Αυτό αποδεικνύει την ευθεία κατεύθυνση.

Αντίστροφα έστω ότι $K = [T]$, όπου το T είναι δένδρο πεπερασμένης διακλάδωσης. Δείχνουμε ότι το K είναι συμπαγές. Έστω $(V_i)_{i \in I}$ ένα ανοικτό κάλυμμα του K . Αν υπάρχει $i_0 \in I$ με $K \subseteq V_{i_0}$ τότε το $\{V_{i_0}\}$ αποτελεί προφανώς πεπερασμένο υποκάλυμμα. Επομένως θεωρούμε ότι $K \not\subseteq V_i$ για κάθε $i \in I$.

Ορίζουμε $S \subseteq X^{<\mathbb{N}}$ ως εξής:

$$u \in S \iff u \in T \text{ \& \forall } i \in I [T_u] \not\subseteq V_i.$$

Από την υπόθεσή μας έχουμε $K = [T] = [T_\Lambda] \not\subseteq V_i$ για κάθε i , επομένως $\Lambda \in S$. Επιπλέον αν $w \subseteq u \in S$ τότε $u, w \in T$ και $[T_u] \subseteq [T_w]$, άρα για κάθε i έχουμε $[T_w] \not\subseteq V_i$, δηλαδή $w \in S$. Επομένως το S είναι υποδένδρο του T .

Υποθέτουμε προς άτοπο ότι το S είναι άπειρο. Αφού το S (ως υποδένδρο του T) είναι πεπερασμένης διακλάδωσης, από το Λήμμα του König (Λήμμα 2.5.5) υπάρχει ένα άπειρο κλαδί $f \in [S] \subseteq [T] = K$. Αφού το $(V_i)_{i \in I}$ είναι κάλυμμα του K υπάρχει $i_0 \in I$ με $f \in V_{i_0}$ και αφού το V_{i_0} είναι ανοικτό υπάρχει $n \in \mathbb{N}$ με

$$\{f(0)\} \times \cdots \times \{f(n)\} \times X \times X \cdots \subseteq V_{i_0}.$$

Θέτουμε $u = (f(0), \dots, f(n)) \in S$ και έχουμε

$$[T_u] \subseteq \{f(0)\} \times \cdots \times \{f(n)\} \times X \times X \cdots \subseteq V_{i_0},$$

που είναι άτοπο γιατί $u \in S$.

Άρα το S είναι πεπερασμένο σύνολο. Παίρνουμε $n = \max\{|u| \mid u \in S\}$ και $F = \{u \in T \mid |u| = n + 1\}$. Τότε το F είναι πεπερασμένο σύνολο (Άσκηση 2.5.19). Το μήκος

κάθε $u \in F$ είναι μεγαλύτερο από τα μήκη των στοιχείων του S . Άρα για κάθε $u \in F$ έχουμε $u \notin S$, και αφού $u \in T$ ισχύει

$$(2.21) \quad \exists i \in I [T_u] \subseteq V_i.$$

Θεωρούμε το σύνολο J όλων των i όπως πιο πάνω, δηλαδή

$$J = \{i \in I \mid \exists u \in F [T_u] \subseteq V_i\},$$

και δείχνουμε ότι η πεπερασμένη υποοικογένεια $\{V_i \mid i \in J\}$ αποτελεί κάλυμμα του K . Πράγματι αν $f \in K = [T]$ τότε $u = (f(0), \dots, f(n)) \in F$ και προφανώς $f \in [T_u]$. Από την (2.21) υπάρχει $i \in I$ με $[T_u] \subseteq V_i$. Άρα $i \in J$ και $f \in V_i$.

Σημείωση. Η απόδειξη της αντίστροφης κατεύθυνσης μπορεί να γίνει και με πιο στοιχειώδη τρόπο χωρίς την επίκληση του Λήμματος του Κόπινγκ. Τότε όμως θα πρέπει να επαναλάβουμε στην ουσία την απόδειξη αυτού του λήμματος. Αυτό δεν είναι σύμπτωση. Όπως είναι γνωστό, το Λήμμα του Κόπινγκ και η αντίστροφη κατεύθυνση της πρότασης που μόλις αποδείξαμε αποτελούν *ισοδύναμες εκφάνσεις της ίδιας μαθηματικής αρχής* (Άσκηση 2.5.24). □

Πόρισμα 2.5.7. Ένα σύνολο $K \subseteq \mathcal{N}$ είναι συμπαγές αν και μόνο αν υπάρχει δένδρο T στο \mathbb{N} πεπερασμένης διακλάδωσης με $K = [T]$.

Απόδειξη. Το συμπέρασμα είναι άμεσο από την Πρόταση 2.5.6 για $X = \mathbb{N}$ και επειδή η τοπολογία του χώρου του Baire είναι η τοπολογία γινόμενο στο $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$ (Πρόταση 2.3.3). □

Δένδρα και συνεχείς συναρτήσεις. Οι συνεχείς συναρτήσεις μεταξύ σωμάτων δένδρων μπορούν να προσεγγιστούν μέσω συναρτήσεων μεταξύ των αντίστοιχων δένδρων.

Ορισμός 2.5.8. Δίνονται δύο δένδρα S και T πάνω σε ένα μη κενό σύνολο X και μια συνάρτηση $\varphi : S \rightarrow T$. Η φ ονομάζεται **μονότονη** αν για κάθε $u, v \in S$ με $u \sqsubseteq v$ έχουμε $\varphi(u) \sqsubseteq \varphi(v)$. Θα λέμε ότι η φ είναι **κατάλληλη (proper)** αν για κάθε $f \in [S]$ τα μήκη των $\varphi(f|n)$ αποκτούν οσοδήποτε μεγάλο μήκος, δηλαδή για κάθε $M \in \mathbb{N}$ υπάρχει $n \in \mathbb{N}$ με $|\varphi(f|n)| \geq M$.

Είναι σαφές ότι αν έχουμε μια κατάλληλη μονότονη συνάρτηση $\varphi : S \rightarrow T$ τότε για κάθε $f \in [S]$ ισχύει

$$\varphi((f(0))) \sqsubseteq \varphi((f(0), f(1))) \sqsubseteq \dots \sqsubseteq \varphi((f(0), f(1), \dots, f(n))) \sqsubseteq \dots$$

και πως η ένωση όλων αυτών των κλαδιών παράγει ένα άπειρο κλαδί του T . Επομένως ορίζεται η συνάρτηση

$$\varphi^* : [S] \rightarrow [T] : \varphi^*(f) = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} \varphi(f|n).$$

Με άλλα λόγια η φ^* ικανοποιεί

$$\varphi^*(f)(m) = x \iff \exists n (|\varphi(f|n)| > m \ \& \ \varphi(f|n)(m) = x)$$

για κάθε $f \in [S]$, $m \in \mathbb{N}$, και $x \in X$.

Πρόταση 2.5.9. Θεωρούμε ένα μη κενό σύνολο X με τη διακριτή τοπολογία και δύο δένδρα S και T στο X , με το S κλαδεμένο. Τότε μια συνάρτηση $\Phi : [S] \rightarrow [T]$ είναι συνεχής αν και μόνο αν υπάρχει κατάλληλη μονότονη $\varphi : S \rightarrow T$ με $\Phi = \varphi^*$.

Απόδειξη. Στην απόδειξη συμβολίζουμε $V_u = \{g \in X^{\mathbb{N}} \mid u \sqsubseteq g\}$, όπου $u \in X^{<\mathbb{N}}$. Τα V_u , $u \in X^{<\mathbb{N}}$, αποτελούν βάση για τον $X^{\mathbb{N}}$.

Δείχνουμε αρχικά την αντιστροφή κατεύθυνση: θεωρούμε μια κατάλληλη μονότονη $\varphi : S \rightarrow T$ και δείχνουμε ότι η $\varphi^* : [S] \rightarrow [T]$ είναι συνεχής. Για κάθε $u \in X^{<\mathbb{N}}$ και κάθε $f \in [S]$ έχουμε

$$\begin{aligned}\varphi^*(f) \in V_u &\iff u \sqsubseteq \varphi^*(f) \\ &\iff \exists n \ u \sqsubseteq \varphi(f|n).\end{aligned}$$

Επομένως $(\varphi^*)^{-1}[V_u] = (\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n) \cap [S]$, όπου $A_n = \{f \in X^{\mathbb{N}} \mid u \sqsubseteq \varphi(f|n)\}$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$. Αν $f \in A_n$ και $h \in X^{\mathbb{N}}$ με $h|n = f|n$ τότε $h \in A_n$, συνεπώς το A_n είναι ανοικτό υποσύνολο του $X^{\mathbb{N}}$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$. Άρα το $(\varphi^*)^{-1}[V_u]$ είναι ανοικτό σύνολο στο $[S]$ και η φ^* είναι συνεχής συνάρτηση. (Παρατηρήστε ότι δεν χρησιμοποιήσαμε την υπόθεση ότι το S είναι κλαδεμένο.)

Αντίστροφα θεωρούμε μια συνεχή συνάρτηση $\Phi : [S] \rightarrow [T]$. Η ιδέα να ορίσουμε την φ ώστε να έχουμε $\varphi[V_u \cap [S]] \subseteq V_{\varphi(u)}$ για κάθε $u \in S$. Αρχικά παρατηρούμε ότι για κάθε $u \in S$ και $w_1, w_2 \in T$ αν $\Phi[V_u \cap [S]] \subseteq V_{w_1} \cap V_{w_2}$ τότε $w_1 || w_2$. Αυτό συμβαίνει γιατί το S είναι κλαδεμένο και συνεπώς για κάθε $u \in S$ έχουμε $V_u \cap [S] \neq \emptyset$, άρα $V_{w_1} \cap V_{w_2} \neq \emptyset$, το οποίο συμβαίνει μόνο όταν $w_1 || w_2$. Επιπλέον για κάθε $u \in T$ υπάρχει $w \in S$ με $\Phi[V_w \cap [S]] \subseteq V_u$, συγκεκριμένα $w = \Lambda$.

Συνεπώς για κάθε $u \in S$ και κάθε $N \in \mathbb{N}$ υπάρχει η “μεγαλύτερη” ακολουθία $w \in S$ με μήκος $\leq N$ και $\Phi[V_w \cap [S]] \subseteq V_u$, δηλαδή η w ικανοποιεί τις τελευταίες δύο ιδιότητες και για κάθε $w' \in S$ που ικανοποιεί τις τελευταίες δύο ιδιότητες ισχύει $w' \sqsubseteq w$. Ορίζουμε

$$\varphi : S \rightarrow T : \varphi(u) = \text{η μεγαλύτερη ακολουθία } w \in S \text{ με } |w| \leq |u| \text{ και } \Phi[V_w \cap [S]] \subseteq V_u.$$

Αν $u_1 \sqsubseteq u_2 \in S$ τότε $|w_1| \leq |u_1| \leq |u_2|$, επιπλέον $\Phi[V_{u_2} \cap [S]] \subseteq \Phi[V_{u_1} \cap [S]] \subseteq V_{\varphi(u_1)}$. Επομένως το $\varphi(u_1) \in T$ είναι ένα w' που ικανοποιεί $|w'| \leq |u_2|$ και $\Phi[V_{u_2} \cap [S]] \subseteq V_{w'}$. Από τον ορισμό του $\varphi(u_2)$ έχουμε ότι $\varphi(u_1) \sqsubseteq \varphi(u_2)$.

Για να δείξουμε τις υπόλοιπες ιδιότητες για τη φ θεωρούμε ένα $f \in [S]$ και $m \in \mathbb{N}$. Επειδή η Φ είναι συνεχής στο f υπάρχει $n \in \mathbb{N}$ με $\Phi[V_{f|n} \cap [S]] \subseteq V_{\Phi(f)|m}$. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι $n \geq M$ και άρα $|\Phi(f)|m| = m \leq n = |f|n|$. Επομένως από τον ορισμό του $\varphi(f|n)$ ισχύει $\Phi(f)|m \sqsubseteq \varphi(f|n)$. Ειδικότερα η $\varphi(f|n)$ έχει μήκος τουλάχιστον $|\Phi(f)|m| = m$.

Το πιο πάνω δείχνει ότι η φ είναι κατάλληλη και επιπλέον ότι $\varphi^* = \Phi$. Για να δούμε το τελευταίο, παρατηρούμε ότι για κάθε m υπάρχει n όπως πιο πάνω, δηλαδή $n \geq m$ και $\Phi(f)|m \sqsubseteq \varphi(f|n)$. Επειδή $\varphi(f|n) \sqsubseteq \varphi^*(f)$ προκύπτει ότι $\Phi(f)|m \sqsubseteq \varphi^*(f)$ για κάθε m και συνεπώς $\Phi(f) = \varphi^*(f)$. □

Δένδρα στο \mathbb{N} . Στο εξής, και εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά, θα ασχολούμαστε με δένδρα στους φυσικούς αριθμούς. Πολλά από τα επόμενα αποτελέσματα και έννοιες πάνω σε δένδρα μπορούν να διατυπωθούν σε γενικότερο πλαίσιο. Παρ' όλα αυτά η περίπτωση $X = \mathbb{N}$ είναι επαρκής για τους σκοπούς μας.

Ορισμός 2.5.10 (Ο χώρος των δένδρων Tr). Θεωρούμε το σύνολο Tr όλων των δένδρων στο \mathbb{N} ,

$$\text{Tr} = \{T \subseteq \mathbb{N}^{<\mathbb{N}} \mid \text{το } T \text{ είναι δένδρο στο } \mathbb{N}\}.$$

Θεωρούμε επίσης μια απαρίθμηση του $\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$, για παράδειγμα τη φυσική $(u_s)_{s \in \mathbb{N}}$, που έχουμε σταθεροποιήσει στο 2.2.

Τότε σε κάθε δένδρο T στο \mathbb{N} αντιστοιχεί το $\alpha_T \in 2^{\mathbb{N}}$ με

$$\alpha_T(s) = 1 \iff u_s \in T.$$

Είναι σαφές ότι η συνάρτηση $T \in \text{Tr} \mapsto \alpha_T \in 2^{\mathbb{N}}$ είναι μονομορφισμός.

Θεωρούμε το Tr με την *τοπολογία που λαμβάνει* από την τελευταία συνάρτηση, δηλαδή ένα $V \subseteq \text{Tr}$ είναι ανοικτό αν και μόνο αν το σύνολο $\{\alpha_T \mid T \in V\}$ είναι ανοικτό υποσύνολο του $2^{\mathbb{N}}$. Ο χαρακτηρισμός της σύγκλισης στον Tr δίνεται στην Άσκηση 2.5.21.

Το σύνολο Tr με την προηγούμενη τοπολογία είναι ο **χώρος των δένδρων** στο \mathbb{N} .

Πρόταση 2.5.11. *Ο χώρος των δένδρων Tr είναι συμπαγής Πολωνικός χώρος.*

Απόδειξη. Εφόσον ο $2^{\mathbb{N}}$ είναι συμπαγής αρκεί να δείξουμε ότι η εικόνα του Tr μέσω της απεικόνισης $T \in \text{Tr} \mapsto \alpha_T \in 2^{\mathbb{N}}$ είναι κλειστό υποσύνολο του $2^{\mathbb{N}}$.

Έστω $\alpha \notin \{\alpha_T \mid T \in \text{Tr}\}$ και $s_0 \in \mathbb{N}$ με $u_{s_0} = \Lambda$. Αν $\alpha(s_0) = 0$ τότε για κάθε $\beta \in T$ με $\beta(s_0) = \alpha(s_0)$ έχουμε $\beta \notin \{\alpha_T \mid T \in \text{Tr}\}$. (Αλλιώς $\beta = \alpha_T$ και η κενή ακολουθία δεν θα ανήκε στο T .)

Επομένως θεωρούμε ότι $\alpha(s_0) = 1$. Αν για κάθε s με $\alpha(s) = 1$ και κάθε t με $u_t \sqsubseteq u_s$ ισχύει $\alpha(t) = 1$, τότε $\alpha = \alpha_T$ όπου το T είναι το δένδρο που ορίζεται ως εξής:

$$T = \{u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}} \mid \exists s (u = u_s \ \& \ \alpha(s) = 1)\}.$$

Αυτό όμως είναι άτοπο γιατί υποθέσαμε πως $\alpha \notin \{\alpha_T \mid T \in \text{Tr}\}$. Επομένως υπάρχουν s, t με $\alpha(s) = 1$, $u_t \sqsubseteq u_s$ και $\alpha(t) = 0$. Τότε για κάθε $\beta \in 2^{\mathbb{N}}$ με $\beta(i) = \alpha(i)$ για κάθε $i \leq \max\{t, s\}$ έχουμε $\beta \notin \{\alpha_T \mid T \in \text{Tr}\}$.

Σε κάθε περίπτωση το συμπλήρωμα $2^{\mathbb{N}} \setminus \{\alpha_T \mid T \in \text{Tr}\}$ είναι ανοικτό υποσύνολο του $2^{\mathbb{N}}$. \square

Ορισμός 2.5.12. Ορίζουμε τα σύνολα

$$(2.22) \quad \text{WF} = \{T \in \text{Tr} \mid [T] = \emptyset\}$$

$$(2.23) \quad \text{IF} = \{T \in \text{Tr} \mid [T] \neq \emptyset\}$$

των θεμελιωμένων και μη θεμελιωμένων αντίστοιχα δένδρων στο \mathbb{N} .

Το επόμενο αποτέλεσμα μπορεί να θεωρηθεί ως η *παραμετρική εκδοχή* του Πορίσματος 2.5.3 και αποτελεί μία εξαιρετικά χρήσιμη εφαρμογή στη θεωρία των αναλυτικών και συναλυτικών συνόλων που θα μελετήσουμε στη συνέχεια.

Λήμμα 2.5.13 (Το Βασικό Λήμμα Αναπαράστασης Κλειστών Συνόλων).

Θεωρούμε έναν Πολωνικό χώρο \mathcal{X} ένα $P \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{N}$ και το σύνολο $\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ με τη διακριτή μετρική. Τότε το P είναι κλειστό ακριβώς όταν υπάρχει ένα κλειστό σύνολο $T \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ με τις ιδιότητες το $T(x) = \{u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}} \mid (x, u) \in T\}$ να είναι δένδρο στο \mathbb{N} για κάθε $x \in \mathcal{X}$ και

$$P = \{(x, \alpha) \in \mathcal{X} \times \mathcal{N} \mid \alpha \in [T(x)]\}.$$

Απόδειξη. Για τη μία κατεύθυνση υποθέτουμε ότι το P είναι κλειστό υποσύνολο του $\mathcal{X} \times \mathcal{N}$ και θεωρούμε μια αριθμήσιμη βάση $(V_n)_{n \in \mathbb{N}}$ του \mathcal{X} . Συμβολίζουμε με cP το συμπλήρωμα του P στον $\mathcal{X} \times \mathcal{N}$. Τότε

$$(2.24) \quad cP = \bigcup_{n \in I, v \in J} V_n \times \mathcal{N}'_v$$

όπου $I \subseteq \mathbb{N}$ και $J \subseteq \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$.

Μπορούμε να υποθέσουμε ότι $\Lambda \notin J$. Σε αντίθετη περίπτωση αντικαθιστούμε κάθε $V_n \times \mathcal{N}'_\Lambda \subseteq cP$, $n \in I$, με την ένωση $\bigcup_{i \in \mathbb{N}} V_n \times \mathcal{N}'_{(i)}$. Επειδή

$$V_n \times \mathcal{N}'_\Lambda = V_n \times \mathcal{N} = V_n \times \bigcup_{i \in \mathbb{N}} \mathcal{N}'_{(i)} = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} (V_n \times \mathcal{N}'_{(i)}),$$

η (2.24) παραμένει αληθής αν αντικαταστήσουμε το J με το

$$J' = (J \setminus \{\Lambda\}) \cup \{(i) \mid i \in \mathbb{N}\}.$$

Μπορούμε επίσης να υποθέσουμε ότι $V_0 = \emptyset$. Αλλιώς αντικαθιστούμε την ακολουθία $(V_0, V_1, \dots, V_n, \dots)$ με την $(\emptyset, V_0, V_1, \dots, V_n, \dots)$. Η (2.24) εξακολουθεί να παραμένει αληθής.

Ορίζουμε

$$(2.25) \quad (x, u) \in T \iff \forall v \in J \forall n \in I \text{ με } n \leq |u| \ (x \notin V_n \ \& \ v \not\sqsubseteq u).$$

Επειδή κάθε V_n είναι ανοικτό σύνολο και το $\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ είναι εφοδιασμένο με τη διακριτή μετρική είναι εύκολο να δει κανείς ότι το T είναι κλειστό υποσύνολο του $\mathcal{X} \times \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ (δείτε την Άσκηση 2.5.22).

Θεωρούμε $x \in \mathcal{X}$ και δείχνουμε αρχικά ότι το $T(x)$ είναι δένδρο. Παρατηρούμε ότι αν $n \leq |\Lambda|$ τότε $n = 0$ και άρα $x \notin V_0 = \emptyset$. Επιπλέον $v \not\sqsubseteq \Lambda$ για κάθε $v \in J$ επειδή $\Lambda \notin J$. Από την (2.25) έχουμε ότι $\Lambda \in T(x)$ και επομένως $T(x) \neq \emptyset$. Αν $u' \sqsubseteq u$ και $u \in T(x)$ τότε για κάθε $v \in J$ και κάθε $n \in I$ με $n \leq |u|$ ισχύει $x \notin V_n$ και $v \not\sqsubseteq u$, απ' όπου προκύπτει ότι για κάθε $v \in J$ και κάθε $n \in I$ με $n \leq |u'| \leq |u|$ ισχύει $x \notin V_n$ και $v \not\sqsubseteq u'$. Συνεπώς $u' \in T(x)$ και το $T(x)$ είναι δένδρο.

Τώρα δείχνουμε τη ζητούμενη ισότητα για το P . Αν $(x, \alpha) \notin P$ τότε υπάρχει $n \in I$ με $x \in V_n$. Προκύπτει από την (2.25) ότι κάθε $u \in T(x)$ πρέπει να έχει μήκος μικρότερο του n και συνεπώς $[T(x)] = \emptyset$. Ειδικότερα $\alpha \notin [T(x)]$.

Αν $(x, \alpha) \in P$ τότε για κάθε $n \in I$ και κάθε $v \in J$ έχουμε $x \notin V_n$ και $\alpha \notin \mathcal{N}_v$, δηλαδή $v \not\sqsubseteq \alpha$. Άρα

$$\forall t \in \mathbb{N} \forall v \in J \ (v \not\sqsubseteq \alpha|t).$$

Αφού $x \notin \bigcup_{n \in I} V_n$ ισχύει

$$\forall t \forall v \in J \forall n \in I \ (x \notin V_n \ \& \ v \not\sqsubseteq \alpha|t).$$

Ειδικότερα το ζεύγος $(x, \alpha|t)$ ικανοποιεί το δεξιό σκέλος της (2.25) και άρα $\alpha|t \in T(x)$ για κάθε $t \in \mathbb{N}$, δηλαδή $\alpha \in [T(x)]$.

Για την αντίστροφη κατεύθυνση θεωρούμε ένα κλειστό σύνολο $T \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ με $P = \{(x, \alpha) \in \mathcal{X} \times \mathcal{N} \mid \alpha \in [T(x)]\}$. Τότε

$$\begin{aligned} (x, \alpha) \in P &\iff \forall t \ \alpha|t \in T(x) \\ &\iff \forall t \ (x, \alpha|t) \in T. \end{aligned}$$

Αφού το T είναι κλειστό και η συνάρτηση $f_t = (\alpha \mapsto \alpha|t)$ είναι συνεχής (Άσκηση 2.3.13), το σύνολο P είναι κλειστό. \square

Ασκήσεις

Άσκηση 2.5.14. Δώστε τα παραδείγματα δένδρων T^0, T^1, T^2 και T^3 στο \mathbb{N} με τις εξής ιδιότητες.

- (i) Το T^0 είναι πεπερασμένο σύνολο και έχει τουλάχιστον μία ακολουθία μήκους 3.
- (ii) Το T^1 είναι άπειρο σύνολο και κάθε $u \in T^1$ έχει μήκος το πολύ 1.
- (iii) Κάθε $u \in T^2$ έχει το πολύ δύο άμεσες προεκτάσεις.
- (iv) Το T^3 είναι πεπερασμένης διακλάδωσης και για κάθε $n \in \mathbb{N}$ υπάρχει $u \in T^3$ που έχει ακριβώς n άμεσες προεκτάσεις.

Επίσης επιλέξτε $u \in T^3$ και $w \notin T^3$ και βρείτε τα υποδένδρα T_u^3, T_w^3 .

Άσκηση 2.5.15. Για κάθε δένδρο T σε ένα σύνολο $X \neq \emptyset$ και για κάθε $u \in X^{<\mathbb{N}}$ το υποδένδρο

$$T_u = \{w \in T \mid u||w\}$$

είναι δένδρο στο X . Επιπλέον αν το u δεν είναι τερματικός κόμβος του T ,

$$\begin{aligned} T_u &= \bigcup_{u*(x) \in T} T_{u*(x)} \\ [T_u] &= \bigcup_{u*(x) \in T} [T_{u*(x)}]. \end{aligned}$$

Άσκηση 2.5.16. Για κάθε δένδρο T σε ένα μη κενό σύνολο X , το οποίο έχει μη κενό σώμα, υπάρχει ένα κλαδεμένο δένδρο $S \subseteq T$ (δηλαδή το S δεν έχει τερματικούς κόμβους) με $[S_u] = [T_u]$ για κάθε $u \in T$. Ειδικότερα έχουμε $[S] = [T]$.

Άσκηση 2.5.17. Συμπεράνετε από το Λήμμα 2.5.13 τον χαρακτηρισμό των κλειστών υποσυνόλων του \mathcal{N} ως τα σύνολα $[T]$ όπου το T είναι δένδρο στο \mathbb{N} (Πόρισμα 2.5.3).

Άσκηση 2.5.18. Συμπεράνετε από το Πόρισμα 2.5.7 ότι το σύνολο $2^{\mathbb{N}}$ είναι συμπαγές υποσύνολο του \mathcal{N} (Πρόταση 2.3.9).

Άσκηση 2.5.19. Για κάθε δένδρο T πεπερασμένης διακλάδωσης και κάθε $n \in \mathbb{N}$ το σύνολο $F_n = \{u \in T \mid |u| = n\}$ είναι πεπερασμένο.

Άσκηση 2.5.20 (Δείτε [Kec95] - 2.8). Για κάθε μη κενά κλειστά σύνολα $F \subseteq H \subseteq \mathcal{N}$ υπάρχει μια συνεχής συνάρτηση $\Phi : H \rightarrow F$ με $\Phi(\alpha) = \alpha$ για κάθε $\alpha \in F$.

Άσκηση 2.5.21. Για κάθε πεπερασμένη συλλογή $u_0, \dots, u_m, w_0, \dots, w_k \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ ορίζουμε

$$B(u_0, \dots, u_m, w_0, \dots, w_k) = \{T \in \text{Tr} \mid \forall i \leq m \forall j \leq k (u_i \in T \ \& \ w_j \notin T)\}.$$

Τότε η οικογένεια όλων των συνόλων $B(u_0, \dots, u_m, w_0, \dots, w_k)$ αποτελεί βάση για την τοπολογία του Tr .

Συμπεράνετε ότι για κάθε ακολουθία δένδρων $(T_l)_{l \in \mathbb{N}}$ στον Tr και κάθε $T \in \text{Tr}$ έχουμε

$$T_l \xrightarrow{i \rightarrow \infty} T \iff \forall u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}} \exists l_0 \forall l \geq l_0 [u \in T_l \iff u \in T].$$

Άσκηση 2.5.22. Έστω \mathcal{X} Πολωνικός χώρος, $(V_n)_{n \in \mathbb{N}}$ μια ακολουθία από ανοικτά υποσύνολα του \mathcal{X} και $T \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ που ικανοποιεί την ισοδυναμία (2.25),

$$(x, u) \in T \iff \forall v \in J \forall n \in I \text{ με } n \leq |u| (x \notin V_n \ \& \ v \notin u).$$

Τότε το T είναι κλειστό υποσύνολο του $\mathcal{X} \times \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ και η συνάρτηση $f : \mathcal{X} \rightarrow \text{Tr}$

$$f(x) = T(x) = \{u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}} \mid (x, u) \in T\}$$

αντιστρέφει ανοικτά σύνολα σε F_σ σύνολα.

Επιπλέον αν τα V_n είναι κλειστά-ανοικτά υποσύνολα του \mathcal{X} τότε η συνάρτηση f είναι συνεχής.

Το **Αξίωμα Εξαρτημένων Επιλογών** (DC) είναι η πρόταση: για κάθε μη κενό σύνολο X και κάθε $Q \subseteq X \times X$ με την ιδιότητα $\forall x \in X \exists y \in X (x, y) \in Q$ υπάρχει συνάρτηση $f : \mathbb{N} \rightarrow X$ με $(f(n), f(n+1)) \in Q$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$.

Το **Αξίωμα Απαριθμητής Επιλογής** ($\text{AC}_{\mathbb{N}}$) είναι η πρόταση: για κάθε μη κενό σύνολο X και κάθε $P \subseteq \mathbb{N} \times X$ με την ιδιότητα $\forall n \in \mathbb{N} \exists x \in X (n, x) \in P$ υπάρχει συνάρτηση $f : \mathbb{N} \rightarrow X$ με $(n, f(n)) \in P$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$.

Όπως είναι γνωστό ισχύει η συνεπαγωγή $\text{DC} \Rightarrow \text{AC}_{\mathbb{N}}$. Το $\text{AC}_{\mathbb{N}}$ αποτελεί μια από τις πιο θεμελιώδεις μορφές επιλογής στα κλασσικά Μαθηματικά καθώς μας επιτρέπει να λαμβάνουμε ακολουθίες με συγκεκριμένες ιδιότητες.

Άσκηση 2.5.23. Εξηγήστε λεπτομερώς την εφαρμογή του Αξιώματος Εξαρτημένων Επιλογών DC στην απόδειξη του Λήμματος του König (Λήμμα 2.5.5).

Άσκηση 2.5.24. Δεδομένου του Αξιώματος Απαριθμητής Επιλογής $\text{AC}_{\mathbb{N}}$ δείξτε ότι το Λήμμα του König (Λήμμα 2.5.5) είναι ισοδύναμο με την εξής πρόταση: για κάθε δένδρο T σε ένα μη κενό σύνολο X με τη διακριτή μετρική, αν το T είναι πεπερασμένης διακλάδωσης τότε το $[T]$ είναι συμπαγές υποσύνολο του $X^{\mathbb{N}}$. (Αυτή είναι η μία κατεύθυνση της Πρότασης 2.5.6.)

Βασικές κλάσεις συνόλων και ιεράρχηση

3.1. Θεμελιώδεις τελεστές και η έννοια της κλάσης

Ορισμός 3.1.1. Με τον όρο **τελεστής συνόλων** εννοούμε οποιαδήποτε πράξη ανάμεσα σε σύνολα, για παράδειγμα έχουμε τον τελεστή της ένωσης όπου παίρνει δύο σύνολα A, B και δίνει την ένωση $A \cup B$. Περιορίζουμε το πεδίο εφαρμογής των τελεστών μας στα υποσύνολα Πολωνικών χώρων. Έχουμε τους εξής τελεστές.

(I) Ο τελεστής της **διάζευξης** \vee . Αν έχουμε $P, Q \subseteq \mathcal{X}$ ορίζουμε το σύνολο της διάζευξης $P \vee Q \subseteq \mathcal{X}$ με

$$x \in P \vee Q \iff x \in P \text{ ή } x \in Q.$$

Παρατηρούμε ότι το $P \vee Q$ είναι η συνολοθεωρητική ένωση $P \cup Q$, γι' αυτό θα αποκαλούμε τη διάζευξη $P \vee Q$ και ως ένωση των P, Q . Η διαφορά ανάμεσα σε αυτούς τους δύο τελεστές είναι ότι η ένωση μπορεί να εφαρμοστεί σε σύνολα που δεν είναι απαραίτητα υποσύνολα του ίδιου χώρου. Για παράδειγμα μπορούμε να πάρουμε την ένωση ενός συνόλου πραγματικών αριθμών με ένα σύνολο συναρτήσεων. Από την άλλη ο τελεστής της διάζευξης ορίζεται σε υποσύνολα του ίδιου χώρου.

Εδώ κάνουμε μια μικρή κατάχρηση του συμβολισμού. Όπως έχουμε αναφέρει στην εισαγωγή θα χρησιμοποιούμε το σύμβολο \vee για να δηλώσουμε τον τελεστή της διάζευξης μέσα σε λογικές προτάσεις. Σε αυτό το σημείο χρησιμοποιούμε το ίδιο σύμβολο για να ορίσουμε μια πράξη ανάμεσα σε σύνολα. Ισχύει η προφανής σχέση

$$x \in P \vee Q \iff x \in P \vee x \in Q.$$

Θα είναι σαφές από το κείμενο σε ποια χρήση του συμβόλου \vee αναφερόμαστε κάθε φορά και δεν θα δίνουμε περαιτέρω εξηγήσεις.

(II) Ο τελεστής της **σύζευξης** $\&$. Αν έχουμε $P, Q \subseteq \mathcal{X}$ ορίζουμε το σύνολο της σύζευξης $P \& Q \subseteq \mathcal{X}$ με

$$x \in P \& Q \iff x \in P \text{ και } x \in Q.$$

Παρατηρούμε ότι το $P \& Q$ είναι η συνολοθεωρητική τομή $P \cap Q$ υποσυνόλων του ίδιου χώρου, γι' αυτό θα αποκαλούμε τη σύζευξη $P \& Q$ και ως τομή των P, Q . Ισχύουν οι ανάλογες παρατηρήσεις σχετικά με τον συμβολισμό.

(III) Ο τελεστής του **συμπληρώματος** c . Αν $P \subseteq \mathcal{X}$ ορίζουμε το συμπλήρωμα $c_{\mathcal{X}}P$ του P ως προς \mathcal{X} ως το σύνολο $\mathcal{X} \setminus P$. Προφανώς

$$x \in c_{\mathcal{X}}P \iff \neg(x \in P).$$

Όταν ο \mathcal{X} είναι σαφής από το κείμενο γράφουμε απλά c αντί του $c_{\mathcal{X}}$.

(IV) Ο τελεστής της **άπειρης αριθμήσιμης διάζευξης ή ένωσης** $\bigvee_{\mathbb{N}}$. Αν έχουμε μια ακολουθία συνόλων $P_n \subseteq \mathcal{X}$, $n \in \mathbb{N}$, ορίζουμε την **άπειρη διάζευξη** $\bigvee_{\mathbb{N}} (P_n)_{n \in \mathbb{N}}$ ως εξής,

$$x \in \bigvee_{\mathbb{N}} (P_n)_{n \in \mathbb{N}} \iff \exists n \in \mathbb{N} x \in P_n.$$

Με άλλα λόγια η άπειρη διάζευξη $\bigvee_{\mathbb{N}} (P_n)_{n \in \mathbb{N}}$ είναι η ένωση $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} P_n$ υποσυνόλων του ίδιου Πολωνικού χώρου. Όπως και προηγουμένως θα αποκαλούμε την άπειρη διάζευξη και ως ένωση.

(V) Ο τελεστής της **άπειρης αριθμήσιμης σύζευξης ή τομής** $\bigwedge_{\mathbb{N}}$. Αν έχουμε μια ακολουθία συνόλων $P_n \subseteq \mathcal{X}$, $n \in \mathbb{N}$, ορίζουμε την **άπειρη σύζευξη** $\bigwedge_{\mathbb{N}} (P_n)_{n \in \mathbb{N}}$ ως εξής,

$$x \in \bigwedge_{\mathbb{N}} (P_n)_{n \in \mathbb{N}} \iff \forall n \in \mathbb{N} x \in P_n.$$

Η άπειρη σύζευξη $\bigwedge_{\mathbb{N}} (P_n)_{n \in \mathbb{N}}$ είναι η τομή $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} P_n$ υποσυνόλων του ίδιου Πολωνικού χώρου, και θα την αποκαλούμε και ως τομή.

(VI) Ο τελεστής του **υπαρξιακού ποσοδείκτη** $\exists^{\mathcal{Y}}$ υπεράνω του \mathcal{Y} . Αν έχουμε ένα $P \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{Y}$ ορίζουμε το σύνολο

$$\exists^{\mathcal{Y}} P = \{x \in \mathcal{X} \mid \exists y (x, y) \in P\}.$$

Το $\exists^{\mathcal{Y}} P$ είναι ακριβώς η *προβολή του P υπεράνω του \mathcal{X}* , με άλλα λόγια

$$\exists^{\mathcal{Y}} P = \text{pr}[P] \text{ όπου } \text{pr} : \mathcal{X} \times \mathcal{Y} \rightarrow \mathcal{X} : \text{pr}(x, y) = x.$$

Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι περιπτώσεις όπου $\mathcal{Y} = \mathbb{N}$ και $\mathcal{Y} = \mathcal{N}$. Στην τελευταία περίπτωση έχουμε στην ουσία μια άπειρη αριθμήσιμη ένωση, αν και όπως θα εξηγήσουμε στη συνέχεια υπάρχει μια ουσιαστική διαφορά ανάμεσα στους δύο τελεστές.

(VII) Ο τελεστής του **καθολικού ποσοδείκτη** $\forall^{\mathcal{Y}}$ υπεράνω του \mathcal{Y} . Αν έχουμε ένα $P \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{Y}$ ορίζουμε το σύνολο

$$\forall^{\mathcal{Y}} P = \{x \in \mathcal{X} \mid \forall y (x, y) \in P\}.$$

Είναι εύκολο να δει κανείς ότι $\forall^{\mathcal{Y}} P = c_{\mathcal{X}}(\exists^{\mathcal{Y}}(c_{(\mathcal{X} \times \mathcal{Y})} P))$. Όπως με πριν ιδιαίτερη σημασία έχουν οι περιπτώσεις όπου $\mathcal{Y} = \mathbb{N}$ και $\mathcal{Y} = \mathcal{N}$.

(VIII) Ο τελεστής του **φραγμένου υπαρξιακού ποσοδείκτη** \exists^{\leq} . Αν έχουμε ένα σύνολο $P \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}$ ορίζουμε το σύνολο $\exists^{\leq} P \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}$ με

$$(x, n) \in \exists^{\leq} P \iff \exists m \leq n (x, m) \in P.$$

Παρατηρούμε ότι το σύνολο $\exists^{\leq} P$ παραμένει υποσύνολο του $\mathcal{X} \times \mathbb{N}$. Επίσης βλέπουμε ότι το $\exists^{\mathbb{N}} P$ “προσομοιάζει” την πεπερασμένη ένωση συνόλων. Το καινούργιο στοιχείο είναι ότι το “μήκος” της ένωσης (ο φυσικός αριθμός $n + 1$) αποτελεί μεταβλητή.

(IX) Ο τελεστής του **φραγμένου καθολικού ποσοδείκτη** \forall^{\leq} . Αν έχουμε $P \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}$ ορίζουμε το σύνολο $\forall^{\leq} P \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}$ με

$$(x, n) \in \forall^{\leq} P \iff \forall m \leq n (x, m) \in P.$$

Όπως πιο πάνω το σύνολο $\forall^{\leq} P$ παραμένει υποσύνολο του $\mathcal{X} \times \mathbb{N}$. Επίσης το $\forall^{\leq} P$ “προσομοιάζει” την πεπερασμένη τομή συνόλων όπου το “μήκος” της τομής αποτελεί μεταβλητή.

(X) Ο τελεστής της **πεπερασμένης ένωσης** \bigvee_{\leq} . Αν έχουμε πεπερασμένα το πλήθος $P_0, \dots, P_n \subseteq \mathcal{X}$ τότε ορίζουμε το σύνολο

$$\bigvee_{\leq} (P_0, \dots, P_n) = P_0 \cup \dots \cup P_n.$$

Με άλλα λόγια το $\bigvee_{\leq} (P_0, \dots, P_n)$ είναι η πεπερασμένη ένωση των συνόλων P_0, \dots, P_n . Διευκρινίζουμε ότι το n είναι τυχαίος φυσικός αριθμός. Δηλαδή το πεδίο εφαρμογής του τελεστή \bigvee_{\leq} είναι όλες οι μη κενές πεπερασμένες ακολουθίες υποσυνόλων του ίδιου χώρου.

(XI) Ο τελεστής της **πεπερασμένης τομής** \bigwedge_{\leq} . Αν έχουμε πεπερασμένα το πλήθος $P_0, \dots, P_n \subseteq \mathcal{X}$ τότε ορίζουμε το σύνολο

$$\bigwedge_{\leq} (P_0, \dots, P_n) = P_0 \cap \dots \cap P_n.$$

Με άλλα λόγια το $\bigwedge_{\leq} (P_0, \dots, P_n)$ είναι η πεπερασμένη ένωση των συνόλων P_0, \dots, P_n και το πεδίο εφαρμογής του τελεστή \bigwedge_{\leq} είναι όλες οι μη κενές πεπερασμένες ακολουθίες υποσυνόλων του ίδιου χώρου.

Σημείωση: Κάποιες φορές θα αναφερόμαστε στους πιο πάνω τελεστές για υποσύνολα μετρικών χώρων X , που δεν προκύπτουν απαραίτητα από Πολωνικούς. Ο ορισμός δίνεται με τον προφανή τρόπο.

Ορισμός 3.1.2. Για κάθε $P \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{Y}$ και κάθε $y \in \mathcal{Y}$ ορίζουμε το σύνολο

$$P_y = \{x \in \mathcal{X} \mid (x, y)\}.$$

Το P_y είναι η y -τομή (**section**) του συνόλου P .

Μπορεί κανείς να θεωρήσει την y -τομή ως τελεστή σε σύνολα, αλλά δεν μας είναι ιδιαίτερα χρήσιμη αυτή η θεώρηση.

Ειδική περίπτωση αυτού του ορισμού είναι όταν $\mathcal{Y} = \mathbb{N}$ οπότε για κάθε $P \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}$ λαμβάνουμε την ακολουθία $(P_n)_{n \in \mathbb{N}}$ των **τομών** του P . Στην περίπτωση $\mathcal{Y} = \mathbb{N}$ το n -στο δείκτη μπορεί να έχει δύο έννοιες: α) την n -τομή και β) το n -στο σύνολο μιας δοσμένης ακολουθίας, θα είναι σαφές από το κείμενο σε ποια από τις δύο έννοιες αναφερόμαστε. Γενικότερα, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά, θα φροντίζουμε όταν έχουμε $P \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}$ και μια ακολουθία $(P_n)_{n \in \mathbb{N}}$ τότε η P_n να είναι n -τομή του συνόλου P έτσι που οι δύο έννοιες να συμβαδίζουν.

Ορισμός 3.1.3. Με τον όρο **κλάση συνόλων** εννοούμε τη συλλογή όλων των συνόλων σε μετρικούς χώρους που χαρακτηρίζονται από μια συγκεκριμένη ιδιότητα. Για παράδειγμα θα αναφερόμαστε στην κλάση των *ανοικτών* συνόλων. Οι κλάσεις θα συμβολίζονται συνήθως με Γ . Εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά οι κλάσεις συνόλων θα αναφέρονται σε υποσύνολα *Πολωνικών* χώρων.

Για κάθε Πολωνικό χώρο \mathcal{X} και κάθε κλάση συνόλων Γ θέτουμε

$$\Gamma|\mathcal{X} = \{A \subseteq \mathcal{X} \mid \text{το } A \text{ ανήκει στην κλάση } \Gamma\}.$$

Θα λέμε ότι ένα $A \subseteq \mathcal{X}$ είναι Γ **υποσύνολο** του \mathcal{X} αν $A \in \Gamma|\mathcal{X}$.

Επεκτείνουμε τη σχέση του εγκλεισμού και τις στοιχειώδεις συνολοθεωρητικές πράξεις στις κλάσεις για υποσύνολα του ίδιου χώρου: αν έχουμε κλάσεις Γ_0 και Γ_1 ορίζουμε

$$\Gamma_0 \subseteq \Gamma_1 \iff \text{κάθε στοιχείο της } \Gamma_0 \text{ είναι στοιχείο της } \Gamma_1$$

$$\Gamma_0 \cup \Gamma_1 = \text{η κλάση όλων των } A \text{ που ανήκουν στην } \Gamma_0 \text{ ή στην } \Gamma_1$$

$$\Gamma_0 \cap \Gamma_1 = \text{η κλάση όλων των } A \text{ που ανήκουν στην } \Gamma_0 \text{ και στην } \Gamma_1$$

$$\Gamma_0 \setminus \Gamma_1 = \text{η κλάση όλων των } A \text{ που ανήκουν στη } \Gamma_0 \text{ και δεν ανήκουν στη } \Gamma_1.$$

Επίσης ορίζουμε την ένωση $\bigcup_{k \leq n} \Gamma_k$ και τομή $\bigcap_{k \leq n} \Gamma_k$ των κλάσεων $\Gamma_0, \dots, \Gamma_n$ με τον προφανή τρόπο. Ομοια ορίζουμε την άπειρη ένωση και άπειρη τομή κλάσεων.

Αν Φ είναι ένας από τους προηγούμενους τελεστές, π.χ. $\Phi = \exists^{\mathbb{N}}$, συμβολίζουμε με $\Phi\Gamma$ την **κλάση που προκύπτει από όλα τα σύνολα της μορφής** ΦP όπου το P ανήκει στη Γ και εμπίπτει στο πεδίο εφαρμογής του Φ . Ο ανάλογος συμβολισμός δίνεται για τους τελεστές που αναφέρονται σε δύο σύνολα ή σε μια ακολουθία συνόλων. Για παράδειγμα έχουμε

$$c\Gamma = \text{η συλλογή όλων των } c_{\mathcal{X}}P = \mathcal{X} \setminus P \text{ όπου } P \in \Gamma|\mathcal{X}, \\ \text{για κάποιον Πολωνικό χώρο } \mathcal{X}$$

$$\vee\Gamma = \text{η συλλογή όλων των } A \vee B = A \cup B \text{ όπου } A, B \in \Gamma|\mathcal{X}, \\ \text{για κάποιον Πολωνικό χώρο } \mathcal{X}$$

$$\exists^{\mathcal{Y}}\Gamma = \text{η συλλογή όλων των } \exists^{\mathbb{N}}P \text{ όπου } P \in \Gamma|(\mathcal{X} \times \mathcal{Y}), \\ \text{για κάποιον Πολωνικό χώρο } \mathcal{X}$$

$$\bigvee_{\mathbb{N}} \Gamma = \text{η συλλογή όλων των } \bigvee_{\mathbb{N}} (P_i)_{i \in \mathbb{N}} = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} P_i \\ \text{όπου } P_i \in \Gamma|\mathcal{X}, i \in \mathbb{N}, \text{ για κάποιον Πολωνικό χώρο } \mathcal{X}.$$

Θα λέμε ότι η κλάση Γ είναι **κλειστή ως προς τον τελεστή** Φ αν το αποτέλεσμα της εφαρμογής του Φ στα σύνολα της Γ που εμπίπτουν στο πεδίο εφαρμογής του είναι σύνολο που ανήκει στη Γ , ισοδύναμα $\Phi\Gamma \subseteq \Gamma$.

Για παράδειγμα η Γ είναι κλειστή ως προς τον τελεστή \vee αν για κάθε $P, Q \in \Gamma|\mathcal{X}$ η ένωση $P \vee Q$ ανήκει στη $\Gamma|\mathcal{X}$, ενώ είναι κλειστή ως προς τον τελεστή \exists^N αν για κάθε $P \in \Gamma|(\mathcal{X} \times \mathcal{N})$ το σύνολο $\exists^N P$ ανήκει στην $\Gamma|\mathcal{X}$.

Θα αναφερόμαστε επίσης σε **κλάση συναρτήσεων**. Με αυτό τον όρο θα εννοούμε μια συλλογή συναρτήσεων ανάμεσα σε μετρικούς χώρους (συνήθως Πολωνικούς) που χαρακτηρίζονται από μια συγκεκριμένη ιδιότητα. Για παράδειγμα έχουμε την κλάση των συνεχών συναρτήσεων. Όταν θα λέμε κλάση χωρίς να διευκρινίζουμε αν πρόκειται για σύνολα ή συναρτήσεις θα εννοούμε πάντα κλάση συνόλων.

Μια κλάση Γ είναι **κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση** αν για κάθε συνεχή συνάρτηση

$$f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$$

και κάθε $Q \in \Gamma|\mathcal{Y}$ έχουμε $f^{-1}[Q] \in \mathcal{X}|\Gamma$, ισοδύναμα το σύνολο $P \subseteq \mathcal{X}$ που ορίζεται ως εξής

$$x \in P \iff f(x) \in Q$$

ανήκει στη Γ .

Για παράδειγμα η κλάση των ανοικτών συνόλων είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση γιατί η αντίστροφη εικόνα ενός ανοικτού συνόλου μέσω μιας συνεχούς συνάρτησης είναι ανοικτό σύνολο.

Στις εφαρμογές οι χώροι \mathcal{X}, \mathcal{Y} είναι συνήθως πεπερασμένα γινόμενα $\mathcal{X}_1 \times \dots \times \mathcal{X}_n$ και $\mathcal{Y}_1 \times \dots \times \mathcal{Y}_m$ αντίστοιχα.

Γενικότερα αν έχουμε μια κλάση από συναρτήσεις Γ' θα λέμε ότι η Γ είναι **κλειστή ως προς Γ' -αντικατάσταση** αν για κάθε $f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$ που ανήκει στην Γ' και για κάθε $Q \in \Gamma|\mathcal{Y}$ έχουμε $f^{-1}[Q] \in \mathcal{X}|\Gamma$. Επομένως η κλειστότητα ως προς συνεχή αντικατάσταση είναι κλειστότητα ως προς Γ' -αντικατάσταση όπου $\Gamma' =$ κλάση όλων των συνεχών συναρτήσεων.

Παρατήρηση 3.1.4. Η κλειστότητα μια κλάσης Γ ως προς συνεχή αντικατάσταση μας επιτρέπει να (i) αναδιατάξουμε n -αδες μεταβλητών καθώς και (ii) να παραλείψουμε μερικές μεταβλητές χωρίς να εξέλθουμε της κλάσης.

Συγκεκριμένα για (i) πιο πάνω: αν έχουμε μια κλάση Γ που είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση και Πολωνικούς χώρους $\mathcal{X}_1, \dots, \mathcal{X}_n$ τότε για κάθε συνάρτηση

$$\tau : \{1, \dots, n\} \rightarrow \{1, \dots, n\}$$

και κάθε σύνολο $Q \subseteq \mathcal{X}_{\tau(1)} \times \dots \times \mathcal{X}_{\tau(n)}$ που ανήκει στη Γ , το σύνολο $P \subseteq \mathcal{X}_1 \times \dots \times \mathcal{X}_n$ που ορίζεται ως εξής

$$(x_1, \dots, x_n) \in P \iff (x_{\tau(1)}, \dots, x_{\tau(n)}) \in Q$$

ανήκει επίσης στη Γ .

Ο ισχυρισμός είναι άμεσος από το ότι η συνάρτηση

$$\begin{aligned} f : \mathcal{X}_1 \times \dots \times \mathcal{X}_n &\rightarrow \mathcal{X}_{\tau(1)} \times \dots \times \mathcal{X}_{\tau(n)} \\ f(x_1, \dots, x_n) &= (x_{\tau(1)}, \dots, x_{\tau(n)}). \end{aligned}$$

είναι συνεχής.

Για το (ii) πιο πάνω: αν έχουμε μια κλάση Γ που είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση και Πολωνικούς χώρους $\mathcal{X}_1, \dots, \mathcal{X}_n$ τότε για κάθε συνάρτηση προβολής

$$\begin{aligned} \text{pr} : \mathcal{X}_1 \times \dots \times \mathcal{X}_n &\rightarrow \mathcal{X}_{k_1} \times \dots \times \mathcal{X}_{k_m} \\ \text{pr}(x_1, \dots, x_n) &= (x_{k_1}, \dots, x_{k_m}) \end{aligned}$$

και κάθε $Q \subseteq \mathcal{X}_{k_1} \times \dots \times \mathcal{X}_{k_m}$ που ανήκει στη Γ το σύνολο $P \subseteq \mathcal{X}_1 \times \dots \times \mathcal{X}_n$ με

$$(x_1, \dots, x_n) \in P \iff (x_{k_1}, \dots, x_{k_m}) \in Q$$

ανήκει επίσης στη Γ . Αυτό συμβαίνει γιατί η συνάρτηση της προβολής pr είναι συνεχής και προφανώς $P = \text{pr}^{-1}[Q]$.

Ως παράδειγμα εφαρμογής των προηγούμενων ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια κλάση Γ , τρεις Πολωνικούς χώρους $\mathcal{X}, \mathcal{Y}, \mathcal{Z}$, και δύο σύνολα $Q_0 \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{Y}$, $Q_1 \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{Y} \times \mathcal{Z}$, που ανήκουν στη Γ . Τότε τα σύνολα $P_0 \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{Y}$ και $P_1 \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{Z} \times \mathcal{Y}$ που ορίζονται ως εξής,

$$(x, y, z) \in P_0 \iff (x, y) \in Q_0$$

$$(x, z, y) \in P_1 \iff (x, y, z) \in Q_1$$

ανήκουν επίσης στη Γ . Για να το δούμε αυτό παίρνουμε $\mathcal{X}_1 = \mathcal{X}$, $\mathcal{X}_2 = \mathcal{Y}$ και $\mathcal{X}_3 = \mathcal{Z}$ και εφαρμόζουμε την παρατήρηση παίρνοντας

$$\text{pr} : \mathcal{X}_1 \times \mathcal{X}_2 \times \mathcal{X}_3 \rightarrow \mathcal{X}_1 \times \mathcal{X}_2 : \text{pr}(x, y, z) = (x, y)$$

$$\tau : \{1, 2, 3\} \rightarrow \{1, 2, 3\} : \tau_1(1) = 1, \tau_1(2) = 3, \tau_1(3) = 2.$$

Στη συνέχεια θα εφαρμόζουμε την παρατήρηση χωρίς αναφορά στις λεπτομέρειες. Ως καιόνα έχουμε ότι μπορούμε να αναδιατάξουμε και να παραλείψουμε μεταβλητές παραμένοντας στην κλάση.

Παρατήρηση 3.1.5. Υπό κάποιες προϋποθέσεις για την κλάση Γ μπορούμε να παραμείνουμε σε αυτήν αν αντικαταστήσουμε τον όρο $n \leq m$ με τον πιο γενικό $n \leq f(x, y)$ όπου η $f : \mathcal{X} \times \mathcal{Y} \rightarrow \mathbb{N}$ είναι συνεχής συνάρτηση.

Συγκεκριμένα θεωρούμε μια κλάση Γ που είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση και τον τελεστή \forall^{\leq} , έναν Πολωνικό χώρο \mathcal{X} και ένα σύνολο $P \in \Gamma | (\mathcal{X} \times \mathbb{N})$.

Τότε για κάθε Πολωνικό χώρο \mathcal{Y} και κάθε συνεχή συνάρτηση $f : \mathcal{X} \times \mathcal{Y} \rightarrow \mathbb{N}$ το σύνολο $Q \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{Y}$ με

$$(x, y) \in Q \iff \exists n \leq f(x, y) (x, n) \in P$$

ανήκει στη Γ .

Για να το δούμε αυτό θεωρούμε το σύνολο S με

$$(x, m) \in S \iff \exists n \leq m (x, n) \in P$$

και παρατηρούμε ότι

$$(x, y) \in Q \iff \exists n \leq f(x, y) (x, n) \in P \iff (x, f(x, y)) \in S.$$

Το σύνολο S ανήκει στην κλάση $\forall^{\leq} \Gamma \subseteq \Gamma$. Λόγω της κλειστότητας της Γ ως προς συνεχή αντικατάσταση έχουμε ότι το Q ανήκει επίσης στην $\forall^{\leq} \Gamma \subseteq \Gamma$.

Ο υπαρξιακός ποσοδείκτης υπεράνω του \mathbb{N} και η αριθμήσιμη ένωση. Οι τελεστές $\exists^{\mathbb{N}}$ και $\bigvee_{\mathbb{N}}$ φαίνονται να περιγράφουν την ίδια μαθηματική έννοια, καθώς και οι δύο αναφέρονται στην ύπαρξη κάποιου φυσικού αριθμού n ώστε το δοσμένο x να ανήκει σε ένα σύνολο P_n . Συγκεκριμένα:

Αν έχουμε μια ακολουθία $(P_n)_{n \in \mathbb{N}}$ υποσυνόλων κάποιου Πολωνικού χώρου και ορίσουμε

$$(3.1) \quad P = \{(x, n) \in \mathcal{X} \times \mathbb{N} \mid x \in P_n\}$$

τότε είναι άμεσο πως $\exists^{\mathbb{N}} P = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} P_n$. Αντίστροφα αν έχουμε $P \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}$ και ορίσουμε

$$(3.2) \quad P_n = \{x \in \mathcal{X} \mid (x, n) \in P\}, \quad n \in \mathbb{N},$$

τότε πάλι έχουμε $\exists^{\mathbb{N}} P = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} P_n$.

Με άλλα λόγια βλέπουμε ότι ο ένας τελεστής ανάγεται στον άλλο. Δεν σημαίνει όμως ότι η κλειστότητα μιας κλάσης Γ ως προς τον έναν τελεστή είναι το ίδιο με την κλειστότητα της Γ ως προς τον άλλον.

Για να εξηγήσουμε το τελευταίο καλύτερα ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια κλάση Γ που είναι κλειστή ως προς τον τελεστή $\exists^{\mathbb{N}}$ και ας εξετάσουμε αν η Γ είναι κλειστή ως

προς τον τελεστή $\bigvee_{\mathbb{N}}$. Θεωρούμε μια ακολουθία $(P_n)_{n \in \mathbb{N}}$ υποσυνόλων κάποιου Πολω-
νικού χώρου \mathcal{X} που ανήκουν στην Γ . Σύμφωνα με όσα περιγράψαμε πιο πάνω υπάρχει
έναν “φυσιολογικός” τρόπος να προχωρήσουμε.

Θεωρούμε το σύνολο P όπως ορίζεται στην (3.1) έτσι που $\exists^{\mathbb{N}}P = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} P_n$. Αν γνω-
ρίζαμε ότι το P ανήκει στη Γ τότε λόγω της κλειστότητας της Γ ως προς τις αριθμήσιμες
ενώσεις υποσυνόλων του \mathcal{X} θα είχαμε

$$\bigcup_{n \in \mathbb{N}} P_n = \exists^{\mathbb{N}}P \in \Gamma|\mathcal{X}.$$

Εδώ ακριβώς εντοπίζεται η διαφορά ανάμεσα στους δύο τελεστές. Δεν είμαστε σε
θέση να συμπεράνουμε ότι το προηγούμενο σύνολο P ανήκει στη Γ χωρίς να γνωρίζουμε
κάτι περισσότερο για τη δομή της Γ . Συνεπώς ο “φυσιολογικός” τρόπος για να δείξουμε
ότι η κλειστότητα ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$ συνεπάγεται και την κλειστότητα ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$ αποτυ-
χάνει.

Μάλιστα υπάρχουν παραδείγματα κλάσεων Γ που είναι κλειστές ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$ αλλά
όχι ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$. Ένα τέτοιο παράδειγμα κλάσης Γ μπορεί να κατασκευαστεί εύκολα
(Άσκηση 3.1.13). Το παράδειγμα είναι κάπως “τεχνητό” αλλά υπάρχουν και άλλα πα-
ραδείγματα τέτοιων κλάσεων Γ που προκύπτουν με πιο φυσιολογικό τρόπο. Αυτές οι
κλάσεις είναι αντικείμενο μελέτης της κατασκευαστικής περιγραφικής θεωρίας συνόλων
(effective descriptive set theory) που δεν μας απασχολεί στο παρόν σύγγραμμα.

Ο αντίστοιχος συλλογισμός μπορεί να γίνει αν αλλάξουν θέσεις οι δύο τελεστές.
Υποθέτουμε ότι έχουμε μια κλάση Γ που είναι κλειστή ως προς αριθμήσιμες ενώσεις και
ας επιχειρήσουμε να δείξουμε ότι η Γ είναι κλειστή ως προς τον τελεστή $\exists^{\mathbb{N}}$. Θεωρούμε
 $P \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}$ που ανήκει στη Γ και για κάθε $n \in \mathbb{N}$ ορίζουμε P_n όπως στην (3.2) ώστε να
έχουμε $\exists^{\mathbb{N}}P = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} P_n$.

Αν γνωρίζαμε ότι κάθε P_n ανήκει στη Γ , λόγω της κλειστότητας της τελευταίας
ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$ θα είχαμε ότι $\exists^{\mathbb{N}}P = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} P_n \in \Gamma$. Όμως, όμοια με πριν, δεν είμαστε
σε θέση να συμπεράνουμε ότι τα σύνολα P_n , $n \in \mathbb{N}$, ανήκουν στη Γ . Για την ακρίβεια
μπορεί κανείς να δώσει παραδείγματα κλάσεων Γ που είναι κλειστές ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$
αλλά όχι ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$ (Άσκηση 3.1.14). Σε αυτή την περίπτωση όμως, τα παραδείγματα
που γνωρίζουμε είναι τεχνητά. Στις κλάσεις Γ που προκύπτουν με φυσιολογικό τρόπο,
η κλειστότητα ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$ συνεπάγεται και κλειστότητα ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$. Αυτό γίνεται
εμφανές από το επόμενο αποτέλεσμα και την παρατήρηση που το ακολουθεί.

Πρόταση 3.1.6. Για κάθε κλάση Γ που είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατά-
σταση ισχύουν τα εξής.

- (i) Αν το σύνολο $P \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{Y}$ ανήκει στη Γ τότε για κάθε $y \in \mathcal{Y}$ η y -τομή

$$P_y = \{x \in \mathcal{X} \mid (x, y) \in P\}$$

ανήκει επίσης στη Γ .

- (ii) Προκύπτει ότι ισχύει η εξής συνεπαγωγή,

$$\Gamma: \text{κλειστή ως προς } \bigvee_{\mathbb{N}} \implies \Gamma: \text{κλειστή ως προς } \exists^{\mathbb{N}}.$$

Απόδειξη. Για το (i) θεωρούμε $y \in \mathcal{Y}$ και παρατηρούμε ότι

$$x \in P_y \iff (x, y) \in P \iff a_{\mathcal{X},y}(x) \in P \iff x \in a_{\mathcal{X},y}^{-1}[P]$$

όπου

$$a_{\mathcal{X},y}: \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{X} \times \mathcal{Y}: a_{\mathcal{X},y}(x) = (x, y).$$

Είναι σαφές ότι οι $a_{\mathcal{X},y}$ είναι συνεχείς συναρτήσεις. Επομένως από την κλειστότητα
της Γ ως προς συνεχή αντικατάσταση προκύπτει ότι το σύνολο P_y ανήκει στη Γ για κάθε
 $y \in \mathcal{Y}$.

Για το (ii) εφαρμόζουμε τις παρατηρήσεις της προηγούμενης συζήτησης για $\mathcal{Y} = \mathbb{N}$ και το (i). Θεωρούμε $P \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}$ που ανήκει στη Γ και δείχνουμε ότι το σύνολο $\exists^{\mathbb{N}} P \subseteq \mathcal{X}$ ανήκει επίσης στη Γ . Παρατηρούμε ότι

$$\begin{aligned} x \in \exists^{\mathbb{N}} P &\iff \exists n (x, n) \in P \\ &\iff \exists n x \in P_n \end{aligned}$$

όπου P_n είναι η n -τομή $\{x \in \mathcal{X} \mid (x, n) \in P\}$. Από το (i) κάθε P_n ανήκει στη Γ και από την κλειστότητα της Γ ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$ έχουμε ότι το σύνολο $\exists^{\mathbb{N}} P = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} a_{\mathcal{X}, n}^{-1}[P]$ ανήκει επίσης στη Γ . \square

Παρατήρηση 3.1.7. Είναι άμεσο ότι τα συμπεράσματα στα (i) και (ii) της προηγούμενης πρότασης ισχύουν ακόμα και αν η Γ είναι κλειστή ως προς την αντικατάσταση από μια μικρή συλλογή συνεχών συναρτήσεων. Συγκεκριμένα στην προηγούμενη πρόταση αρκεί να υποθέσει κανείς ότι η Γ είναι κλειστή ως προς Γ' -αντικατάσταση, όπου Γ' είναι η κλάση όλων των συναρτήσεων $a_{\mathcal{X}, y}$ της τελευταίας απόδειξης.

Η κλειστότητα ως προς Γ' -αντικατάσταση είναι το ελάχιστο που θα θέλαμε να ικανοποιεί μια ενδιαφέρουσα κλάση Γ , συνεπώς για τις ενδιαφέρουσες κλάσεις η κλειστότητα ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$ συνεπάγεται την κλειστότητα ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$.

Το ακόλουθο αποτέλεσμα μας βοηθά να συμπεράνουμε την αντίστροφη συνεπαγωγή της Πρότασης 3.1.6.

Πρόταση 3.1.8. *Θεωρούμε μια κλάση Γ που ικανοποιεί την ιδιότητα:*

$$(3.3) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{για κάθε Πολωνικό χώρο } \mathcal{X} \text{ και κάθε ακολουθία } (P_n)_{n \in \mathbb{N}} \text{ από} \\ \text{σύνολα της } \Gamma | \mathcal{X} \text{ το σύνολο } P \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N} \text{ που ορίζεται ως εξής} \\ (x, n) \in P \iff x \in P_n \\ \text{ανήκει στη } \Gamma. \end{array} \right.$$

Αν η Γ είναι επιπλέον κλειστή ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$, τότε είναι επίσης κλειστή ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$.

Απόδειξη. Θεωρούμε μια ακολουθία $(P_n)_{n \in \mathbb{N}}$ από υποσύνολα του ίδιου χώρου \mathcal{X} που ανήκουν στη Γ και το σύνολο $P \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}$ που ορίζεται όπως στην (3.3). Από την υπόθεση το P ανήκει στη Γ . Επιπλέον για κάθε $x \in \mathcal{X}$,

$$\begin{aligned} x \in \bigcup_{n \in \mathbb{N}} P_n &\iff \exists n x \in P_n \\ &\iff \exists n (x, n) \in P. \end{aligned}$$

Επομένως αν η Γ είναι κλειστή ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$ τότε από τις προηγούμενες ισοδυναμίες το σύνολο $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} P_n$ ανήκει στη Γ και άρα η τελευταία είναι κλειστή ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$. \square

Η προηγούμενη πρόταση είναι προφανής υπό το φως της προηγούμενης συζήτησης, αποτελεί όμως ένα χρήσιμο εργαλείο. Θα δούμε ότι όλες οι κλάσεις που μας απασχολούν στο παρόν σύγγραμμα ικανοποιούν την ιδιότητα (3.3) και επίσης είναι κλειστές ως προς συνεχή αντικατάσταση. Με βάση τις τελευταίες δύο προτάσεις συμπεραίνουμε ότι οι κλειστότητες ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$ και $\exists^{\mathbb{N}}$ για τις κλάσεις μας είναι ισοδύναμες ιδιότητες. Αξίζει να απομονώσουμε αυτό τον συλλογισμό σε ένα ξεχωριστό αποτέλεσμα.

Πόρισμα 3.1.9. *Θεωρούμε μια κλάση Γ που είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση και που ικανοποιεί την πιο πάνω ιδιότητα (3.3). Τότε η Γ είναι κλειστή ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$ αν και μόνο αν είναι κλειστή ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$.*

Απόδειξη. Άμεση από τις Προτάσεις 3.1.6 και 3.1.8. \square

Τέλος παρατηρούμε ότι τα προηγούμενα ισχύουν και για άλλα ζεύγη τελεστών στη θέση των $(\bigvee_{\mathbb{N}}, \exists^{\mathbb{N}})$.

Πρόταση 3.1.10. Οι Προτάσεις 3.1.6 και 3.1.8 και συνεπώς το Πόρισμα 3.1.9 ισχύουν αν αντικαταστήσουμε το ζεύγος τελεστών $(\bigvee_{\mathbb{N}}, \exists^{\mathbb{N}})$ με οποιαδήποτε από τα $(\exists^{\leq}, \bigvee_{\leq})$, $(\bigvee^{\mathbb{N}}, \bigwedge_{\mathbb{N}})$ και $(\forall^{\leq}, \bigwedge_{\leq})$.

Η απόδειξη είναι ουσιαστικά η ίδια – αποφεύγουμε να εισέλθουμε σε περαιτέρω λεπτομέρειες.

Εκτίμηση της πολυπλοκότητας με βάση τους τελεστές. Δείχνουμε πώς μπορούμε να εκτιμήσουμε την πολυπλοκότητα ενός δοσμένου συνόλου με βάση τη χαρακτηριστική ιδιότητα που το ορίζει.

Παράδειγμα 3.1.11. Θεωρούμε μια κλάση Γ που είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση και τον τελεστή της διάζευξης \vee . Θεωρούμε επίσης δύο σύνολα $Q \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{Y}$, $R \subseteq \mathcal{Y} \times \mathcal{Z}$ που ανήκουν στη Γ και ορίζουμε

$$P = \{(x, y, z) \in \mathcal{X} \times \mathcal{Y} \times \mathcal{Z} \mid (x, y) \in Q \text{ ή } (y, z) \in R\}.$$

Δείχνουμε ότι το P ανήκει στη Γ . Ένας τρόπος για να το κάνουμε αυτό είναι να πάρουμε τα σύνολα

$$Q^* = \{(x, y, z) \in \mathcal{X} \times \mathcal{Y} \times \mathcal{Z} \mid (x, y) \in Q\}$$

$$R^* = \{(x, y, z) \in \mathcal{X} \times \mathcal{Y} \times \mathcal{Z} \mid (y, z) \in R\}$$

και τις συναρτήσεις

$$f_1 : \mathcal{X} \times \mathcal{Y} \times \mathcal{Z} \rightarrow \mathcal{X} \times \mathcal{Y} : f_1(x, y, z) = (x, y)$$

$$f_2 : \mathcal{X} \times \mathcal{Y} \times \mathcal{Z} \rightarrow \mathcal{Y} \times \mathcal{Z} : f_2(x, y, z) = (y, z).$$

Τότε

$$Q^* = f_1^{-1}[Q], \quad R^* = f_2^{-1}[R]$$

και

$$P = f_1^{-1}[Q] \cup f_2^{-1}[R] = Q^* \cup R^*.$$

Τα σύνολα Q^* και R^* ανήκουν στη Γ λόγω της κλειστότητας της τελευταίας ως προς συνεχή αντικατάσταση. Έπεται ότι το P ανήκει στη Γ επειδή η τελευταία είναι κλειστή ως προς την ένωση δύο υποσυνόλων του ίδιου χώρου.

Μπορούμε να αναδιατυπώσουμε τον πιο πάνω συλλογισμό ως εξής. Πρώτα βλέπουμε ότι δεν χρειάζεται να κάνουμε αναφορά στις συναρτήσεις f_1 και f_2 , γιατί τα σύνολα

$$(x, y, z) \in Q^* \iff (x, y) \in Q$$

$$(x, y, z) \in R^* \iff (y, z) \in R$$

ανήκουν στη Γ από την κλειστότητα ως προς συνεχή αντικατάσταση και την Παρατήρηση 3.1.4. Έπειτα βλέπουμε ότι

$$(x, y, z) \in P \iff (x, y, z) \in Q^* \vee (x, y, z) \in R^*,$$

συνεπώς από την κλειστότητα της Γ ως προς \vee έχουμε ότι το P ανήκει στη Γ .

Συνηθώς δεν θα κάνουμε αναφορά στα σύνολα Q^* και R^* και έτσι θα μπορούμε να συμπεραίνουμε ότι το σύνολο P ανήκει στην Γ κατευθείαν από τον ορισμό,

$$(x, y, z) \in P \iff (x, y) \in Q \vee (y, z) \in R.$$

Με αυτή τη μέθοδο ταυτίζουμε ένα σύνολο με τη σχέση που το ορίζει. Η εκτίμηση της πολυπλοκότητας του συνόλου μετατρέπεται σε εκτίμηση της πολυπλοκότητας αυτής της σχέσης. Η τελευταία γίνεται μέσω των αντίστοιχων τελεστών κλειστότητας της Γ και την κλειστότητα ως προς συνεχή αντικατάσταση, πολλές φορές με χρήση της Παρατήρησης 3.1.4, την οποία θα εφαρμόζουμε χωρίς ιδιαίτερη αναφορά.

Πρόκειται για μια αρκετά ισχυρή μέθοδο, η οποία αναδεικνύει την αξία της σε πιο σύνθετα παραδείγματα.

Παράδειγμα 3.1.12. Ας πάρουμε ως δεύτερο παράδειγμα μια κλάση Γ που περιέχει τα κλειστά σύνολα και που είναι κλειστή ως προς τους τελεστές \vee , $\forall^{\mathbb{N}}$, $\exists^{\mathbb{N}}$ και συνεχή αντικατάσταση. Θεωρούμε το σύνολο $P \subseteq \mathcal{X}$ με

$$x \in P \iff \forall n \exists \alpha \forall m (x = f_n(\alpha) \vee g_m(x, \alpha) = 0)$$

όπου οι $f_n, g_m, m, n \in \mathbb{N}$ είναι συνεχείς συναρτήσεις. Δείχνουμε ότι το P ανήκει στη Γ . Τα σύνολα A, B με

$$\begin{aligned} (x, \alpha, n) \in A &\iff x = f_n(\alpha) \\ (x, \alpha, m) \in B &\iff g_m(x, \alpha) = 0 \end{aligned}$$

είναι κλειστά επειδή οι συναρτήσεις είναι συνεχείς και άρα ανήκουν στη Γ . Συνεπώς το σύνολο C με

$$(x, \alpha, n) \in C \iff \forall m ((x, \alpha, n) \in A \& (x, \alpha, m) \in B)$$

ανήκει στη Γ χρησιμοποιώντας την κλειστότητα ως προς \vee και $\forall^{\mathbb{N}}$. Το σύνολο D με

$$(x, n) \in D \iff \exists \alpha (x, \alpha, n) \in C$$

ανήκει επίσης στη Γ λόγω κλειστότητας ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$ και συνεχούς αντικατάστασης (εδώ εφαρμόζουμε την Παρατήρηση 3.1.4 γιατί έχουμε αναδιατάξει τις μεταβλητές). Τέλος το $P = \forall^{\mathbb{N}} D$ ανήκει στη Γ από την κλειστότητα ως προς $\forall^{\mathbb{N}}$.

Στη συνέχεια δεν θα κάνουμε αναφορά στα “ενδιάμεσα” σύνολα A, B, C , και D , εκτός και αν συντρέχει ιδιαίτερος λόγος. Οι ιδιότητες κλειστότητας της Γ μας καθιστούν σαφές ότι το P ανήκει στη Γ . Για βοήθεια μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει τον εξής “διαγραμματικό” συλλογισμό:

$$x \in P \iff \underbrace{\forall n \exists \alpha \forall m \underbrace{(x = f_n(\alpha) \vee g_m(x, \alpha) = 0)}_{\Gamma}}_{\forall^{\mathbb{N}} \Gamma \subseteq \Gamma}.$$

$$\underbrace{\qquad\qquad\qquad}_{\exists^{\mathbb{N}} \Gamma \subseteq \Gamma}$$

$$\underbrace{\qquad\qquad\qquad}_{\forall^{\mathbb{N}} \Gamma \subseteq \Gamma}$$

Αφήνουμε για άσκηση την αντίστοιχη “κλασική” απόδειξη με βάση τις συνολοθεωρητικές ιδιότητες ότι το προηγούμενο P ανήκει στη Γ (Άσκηση 3.1.15, για να γίνουν πιο εμφανείς οι διαφορές κάνουμε μια μικρή αναδιατύπωση του προβλήματος.)

Άσκησης

Άσκηση 3.1.13. Θεωρούμε την κλάση Γ των *μοιουσυνόλων* σε Πολωνικούς χώρους, δηλαδή

$$\Gamma|\mathcal{X} = \{\{x\} \mid x \in \mathcal{X}\}$$

για κάθε Πολωνικό χώρο \mathcal{X} . Εξετάστε την κλειστότητα της Γ ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$ και $\bigvee_{\mathbb{N}}$.

Άσκηση 3.1.14. Θεωρούμε την κλάση Γ των υποσυνόλων Πολωνικών χώρων με *τουλάχιστον δύο στοιχεία*, δηλαδή

$$\Gamma|\mathcal{X} = \{A \in \mathcal{P}(\mathcal{X}) \mid \exists a, b \in A \ a \neq b\}$$

για κάθε Πολωνικό χώρο \mathcal{X} . Εξετάστε την κλειστότητα της Γ ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$ και $\bigvee_{\mathbb{N}}$.

Άσκηση 3.1.15. Θεωρούμε έναν Πολωνικό χώρο \mathcal{X} και συνεχείς συναρτήσεις

$$f_n : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{N}, \ g_m : \mathcal{X} \times \mathcal{N} \rightarrow \mathbb{R}, \ m, n \in \mathbb{N}.$$

Ορίζουμε το σύνολο $P \subseteq \mathcal{X}$ ως εξής,

$$x \in P \iff \forall n \exists \alpha \forall m (x = f_n(\alpha) \vee g_m(x, \alpha) = 0).$$

Τότε το P γράφεται ως αριθμήσιμη τομή συνόλων που είναι προβολές κλειστών συνόλων.

Άσκηση 3.1.16. Έστω \mathcal{X} Πολωνικός χώρος και T κλειστό υποσύνολο του $\mathcal{X} \times \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ (όπου στο $\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ θεωρούμε τη διακριτή μετρική), έτσι ώστε για κάθε $x \in \mathcal{X}$ το σύνολο $T(x) = \{u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}} \mid (x, u) \in T\}$ να είναι δένδρο. Τότε για κάθε $u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ το σύνολο

$$A_u = \{x \in \mathcal{X} \mid \text{το υποδένδρο } T_u(x) \text{ έχει κόμβους οσοδήποτε μεγάλου μήκους}\}$$

ανήκει στην $\forall^{\mathbb{N}} \exists^{\mathbb{N}} \Gamma$, όπου Γ είναι η κλάση των κλειστών συνόλων σε Πολωνικούς χώρους.

Άσκηση 3.1.17. Επαναλαμβάνουμε την Άσκηση 2.5.22 όπου τώρα ζητείται οι υπολογισμοί να γίνουν με χρήση των τελεστών. Συγκρίνετε τις λύσεις των δύο ασκήσεων.

Έστω \mathcal{X} Πολωνικός χώρος, $(V_n)_{n \in \mathbb{N}}$ μια ακολουθία από ανοικτά υποσύνολα του \mathcal{X} , ένα σύνολο $T \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ που ικανοποιεί την ισοδυναμία (2.25),

$$(x, u) \in T \iff \forall v \in J \forall n \in I \text{ με } n \leq |u| (x \notin V_n \ \& \ v \not\subseteq u)$$

και η συνάρτηση $f : \mathcal{X} \rightarrow \text{Tr}$

$$f(x) = T(x) = \{u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}} \mid (x, u) \in T\}.$$

Παίρνουμε δεδομένο ότι η κλάση των ανοικτών συνόλων είναι κλειστή ως προς τον τελεστή $\forall^{\mathbb{N}}$. Τότε το T είναι κλειστό σύνολο και για κάθε $u, w \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ το σύνολο $P_{u,w} \subseteq \mathcal{X}$ με

$$x \in P_{u,w} \iff u \in f(x) \ \& \ w \notin f(x)$$

είναι F_σ .

Μάλιστα αν τα V_n είναι κλειστά-ανοικτά υποσύνολα του \mathcal{X} τα $P_{u,w}$ είναι ανοικτά σύνολα.

3.2. Οι κλάσεις Borel συνόλων πεπερασμένης τάξης

Ορισμός 3.2.1. Ορίζουμε με αναδρομή στο $n \geq 1$ τις εξής κλάσεις συνόλων σε Πολωνικούς χώρους:

$$\Sigma_1^0 = \text{η κλάση όλων των ανοικτών συνόλων}$$

$$\Pi_1^0 = \text{c}\Sigma_1^0 = \text{η κλάση όλων των κλειστών συνόλων}$$

και

$$\begin{aligned} \Sigma_{n+1}^0 &= \bigvee_{\mathbb{N}} \Pi_n^0 \\ &= \text{οι αριθμήσιμες ενώσεις συνόλων της } \Pi_n^0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{n+1}^0 &= \text{c}\Sigma_{n+1}^0 \\ &= \text{τα συμπληρώματα των συνόλων της } \Sigma_{n+1}^0. \end{aligned}$$

Τέλος θέτουμε

$$\Delta_n^0 = \Sigma_n^0 \cap \Pi_n^0.$$

Είναι άμεσο ότι ένα $P \subseteq \mathcal{X}$ ανήκει στη Δ_n^0 αν και μόνο αν τα σύνολα P και $\mathcal{X} \setminus P$ ανήκουν στη Σ_n^0 . Επιπλέον είναι εύκολο να δει κανείς (Άσκηση 3.2.10) ότι

$$\Sigma_{n+1}^0 = \bigwedge_{\mathbb{N}} \Pi_n^0.$$

Οι κλάσεις Σ_n^0 είναι οι **κλάσεις Borel συνόλων πεπερασμένης τάξης** ενώ οι Π_n^0 και Δ_n^0 είναι οι **δυϊκές** (dual) και **αμφίσημες** (ambiguous) αντίστοιχα κλάσεις Borel συνόλων πεπερασμένης τάξης.

Η συλλογή των προηγούμενων κλάσεων ονομάζεται **ιεραρχία των Borel συνόλων πεπερασμένης τάξης**.

Παρατήρηση 3.2.2. Η κλάση Σ_2^0 αποτελείται ακριβώς από τα F_σ σύνολα και συνεπώς η Π_2^0 αποτελείται ακριβώς από τα G_δ σύνολα.

Πρόταση 3.2.3. Για κάθε Πολωνικό χώρο \mathcal{X} και κάθε $n \geq 1$ έχουμε

$$\Sigma_n^0|\mathcal{X} \subseteq \Delta_{n+1}^0|\mathcal{X}$$

και επομένως ισχύει επίσης

$$\Pi_n^0|\mathcal{X} \subseteq \Delta_{n+1}^0|\mathcal{X}.$$

Απόδειξη. Δείχνουμε με επαγωγή στο $n \geq 1$ ότι

$$(3.4) \quad \Sigma_n^0|\mathcal{X} \subseteq \Sigma_{n+1}^0|\mathcal{X} \quad \text{και} \quad \Sigma_n^0|\mathcal{X} \subseteq \Pi_{n+1}^0|\mathcal{X}.$$

Προφανώς από το πιο πάνω προκύπτουν οι εγκλεισμοί $\Sigma_n^0|\mathcal{X} \subseteq \Delta_{n+1}^0|\mathcal{X}$.

Για $n = 1$, από την Πρόταση 2.1.6 κάθε ανοικτό υποσύνολο του \mathcal{X} είναι F_σ και G_δ , οπότε από την Παρατήρηση 3.2.2 ισχύει $\Sigma_1^0|\mathcal{X} \subseteq \Sigma_2^0|\mathcal{X}$ και $\Pi_1^0|\mathcal{X} \subseteq \Pi_2^0|\mathcal{X}$.

Θεωρούμε ότι για κάποιο $n \geq 1$ ισχύει η (3.4) και δείχνουμε το αντίστοιχο για το $n + 1$. Έστω $A \in \Sigma_{n+1}^0|\mathcal{X}$. Τότε από τον ορισμό υπάρχει μια ακολουθία $(B_i)_{i \in \mathbb{N}}$ από Π_n^0 υποσύνολα του \mathcal{X} με $A = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} B_i$.

Έχουμε

$$\mathcal{X} \setminus B_i \in \Sigma_n^0|\mathcal{X} \subseteq \Sigma_{n+1}^0|\mathcal{X}$$

όπου στον τελευταίο εγκλεισμό χρησιμοποίησαμε την Επαγωγική Υπόθεση. Άρα $B_i \in \Pi_{n+1}^0|\mathcal{X}$ για κάθε $i \in \mathbb{N}$ και

$$A = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} B_i \in \bigvee_{\mathbb{N}} \Pi_{n+1}^0|\mathcal{X} = \Sigma_{n+2}^0|\mathcal{X}.$$

Επιπλέον αν πάρουμε $A_i = A$ για κάθε $i \in \mathbb{N}$ έχουμε ότι $A = \bigcap_{i \in \mathbb{N}} A_i$ και $A_i \in \Sigma_{n+1}^0|\mathcal{X}$ για κάθε $i \in \mathbb{N}$. Επομένως

$$\mathcal{X} \setminus A = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} (\mathcal{X} \setminus A_i) \in \bigvee_{\mathbb{N}} \Pi_{n+1}^0|\mathcal{X} = \Sigma_{n+2}^0|\mathcal{X}$$

και άρα $A \in \Pi_{n+2}^0|\mathcal{X}$. Έτσι έχουμε δείξει την (3.4) για το $n + 1$.

Είναι επίσης σαφές ότι οι εγκλεισμοί $\Pi_n^0|\mathcal{X} \subseteq \Delta_{n+1}^0|\mathcal{X}$ είναι άμεσοι από αυτούς της (3.4) παίρνοντας τα συμπληρώματα. \square

Στο επόμενο βήμα εξασφαλίζουμε κάποιες στοιχειώδεις ιδιότητες κλειστότητας των πιο πάνω κλάσεων. Οι πλήρης λίστα με τις ιδιότητες κλειστότητας δίνεται σε μεταγενέστερο στάδιο στο Θεώρημα 3.2.8.

Λήμμα 3.2.4. Οι κλάσεις Σ_n^0 , Π_n^0 και Δ_n^0 , $n \geq 1$ είναι κλειστές ως προς \vee , $\&$, και συνεχή αντικατάσταση.

Απόδειξη. Αρχικά παρατηρούμε ότι οι ιδιότητες κλειστότητας για τις κλάσεις Δ_n^0 είναι άμεσες από τις αντίστοιχες των κλάσεων Σ_n^0 και Π_n^0 . Για παράδειγμα για να δείξουμε ότι η Σ_{17}^0 και η Π_{17}^0 είναι κλειστές ως προς \vee τότε για κάθε $A, B \in \Delta_{17}^0|\mathcal{X}$ έχουμε $A, B \in \Sigma_{17}^0|\mathcal{X}$ και $A, B \in \Pi_{17}^0|\mathcal{X}$ και άρα

$$A \vee B \in \Sigma_{17}^0|\mathcal{X} \cap \Pi_{17}^0|\mathcal{X} = \Delta_{17}^0|\mathcal{X}.$$

Παρατηρούμε επίσης ότι η κλειστότητα ως προς συνεχή αντικατάσταση της Σ_n^0 είναι ισοδύναμη με την κλειστότητα ως προς συνεχή αντικατάσταση της Π_n^0 , γιατί για κάθε συνάρτηση $f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$ και κάθε $A \subseteq \mathcal{Y}$ έχουμε

$$f^{-1}[\mathcal{Y} \setminus A] = \mathcal{X} \setminus A.$$

Με άλλα λόγια αν η f αντιστρέφει στοιχεία της Σ_n^0 σε στοιχεία της Σ_n^0 τότε αντιστρέφει και στοιχεία της Π_n^0 σε στοιχεία της Π_n^0 και αντίστροφα.

Τέλος παρατηρούμε ότι η κλειστότητα της Σ_n^0 ως προς \vee και $\&$ είναι ισοδύναμη με την κλειστότητα της Π_n^0 ως προς τους ίδιους τελεστές και αντίστροφα. Αυτό συμβαίνει λόγω των νόμων του *de Morgan*,

$$\begin{aligned} \mathcal{X} \setminus (A \cup B) &= (\mathcal{X} \setminus A) \cap (\mathcal{X} \setminus B) \\ \mathcal{X} \setminus (A \cap B) &= (\mathcal{X} \setminus A) \cup (\mathcal{X} \setminus B). \end{aligned}$$

Για παράδειγμα αν έχουμε ότι η Σ_n^0 είναι κλειστή ως προς \vee και πάρουμε $A, B \in \Pi_n^0 | \mathcal{X}$ τότε τα σύνολα $c_{\mathcal{X}}A = \mathcal{X} \setminus A$ και $c_{\mathcal{X}}B = \mathcal{X} \setminus B$ ανήκουν στην Σ_n^0 και συνεπώς το σύνολο $c_{\mathcal{X}}(A \cap B) = c_{\mathcal{X}}A \cup c_{\mathcal{X}}B$ ανήκει επίσης στη Σ_n^0 . Επομένως το σύνολο $A \& B = A \cap B$ ανήκει στη Π_n^0 και άρα η τελευταία κλάση είναι κλειστή ως προς $\&$.

Έπειτα δείχνουμε με επαγωγή στο n ότι οι Σ_n^0, Π_n^0 έχουν τις ζητούμενες ιδιότητες κλειστότητας.

Για $n = 1$ αφού η πεπερασμένη ένωση και η πεπερασμένη τομή ανοικτών (αντίστοιχα κλειστών) συνόλων είναι ανοικτό (αντίστοιχα κλειστό) υποσύνολο του ίδιου χώρου έχουμε ότι οι κλάσεις Σ_1^0 και Π_1^0 είναι κλειστές ως προς \vee και $\&$. Επίσης η Σ_1^0 είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση γιατί η αντίστροφη εικόνα ανοικτού συνόλου μέσω συνεχούς συνάρτησης είναι ανοικτό σύνολο.

Υποθέτουμε ότι ισχύει το ζητούμενο για κάποιο $n \in \mathbb{N}$ και δείχνουμε το ζητούμενο για το $n + 1$. Έστω $A, B \subseteq \mathcal{X}$ που ανήκουν στην Σ_{n+1}^0 και $f : \mathcal{Y} \rightarrow \mathcal{X}$ συνεχής. Σύμφωνα με τα προηγούμενα αρκεί να δείξουμε ότι τα σύνολα $A \cup B, A \cap B$ και $f^{-1}[A]$ ανήκουν στη Σ_{n+1}^0 .

Υπάρχουν ακολουθίες $(A_i)_{i \in \mathbb{N}}$ και $(B_i)_{i \in \mathbb{N}}$ με $A_i, B_i \in \Pi_n^0 | \mathcal{X}$ για κάθε $i \in \mathbb{N}$ ώστε

$$A = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} A_i \quad \text{και} \quad B = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} B_i.$$

Τότε

$$\begin{aligned} A \cup B &= \bigcup_{i \in \mathbb{N}} (A_i \cup B_i) \\ A \cap B &= \bigcup_{i, j \in \mathbb{N}} (A_i \cap B_j) \\ f^{-1}[A] &= \bigcup_{i \in \mathbb{N}} f^{-1}[A_i]. \end{aligned}$$

Από την επαγωγική υπόθεση η κλάση Π_n^0 είναι κλειστή ως προς $\vee, \&$, και συνεχή αντικατάσταση. Άρα τα σύνολα $A_i \cup B_i, A_i \cap B_j$ και $f^{-1}[A_i]$ στις πιο πάνω ισότητες ανήκουν στην Π_n^0 . Αφού οι πιο πάνω ενώσεις είναι αριθμήσιμες έχουμε ότι τα σύνολα $A \cup B, A \cap B$ και $f^{-1}[A]$ ανήκουν στην Σ_{n+1}^0 και έχουμε το ζητούμενο. \square

Πριν προχωρήσουμε στις υπόλοιπες ιδιότητες κλειστότητας είναι χρήσιμο να χαρακτηρίσουμε τις κλάσεις Σ_n^0 με βάση τον υπαρξιακό ποσοδείκτη $\exists^{\mathbb{N}}$. Δίνουμε πρώτα κάποια βοηθητικά αποτελέσματα.

Παρατήρηση 3.2.5. Για κάθε φυσικό αριθμό $n \geq 1$, κάθε Πολωνικό χώρο \mathcal{X} και κάθε $A \in \Sigma_n^0 | (\mathcal{X} \times \mathbb{N})$ τα σύνολα $A_i \subseteq \mathcal{X}, i \in \mathbb{N}$, που ορίζονται ως εξής

$$x \in A_i \iff (x, i) \in A$$

ανήκουν επίσης στην κλάση Σ_n^0 .

Αυτό είναι άμεσο από το (i) της Πρότασης 3.1.6 γιατί κάθε A_i είναι η i -τομή του A και η Σ_n^0 είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση (Λήμμα 3.2.4). Φυσικά μπορεί κανείς να το αποδείξει κατευθείαν όπως στην Πρόταση 3.1.6 παρατηρώντας ότι

$$A_i = f_i^{-1}[A] \quad \text{όπου} \quad f_i : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{X} \times \mathbb{N} : f_i(x) = (x, i), \quad i \in \mathbb{N}.$$

Προφανώς ισχύουν τα ίδια αν αντί της κλάσης Σ_n^0 έχουμε την Π_n^0 .

Στη συνέχεια δείχνουμε ότι οι κλάσεις Borel συνόλων πεπερασμένης τάξης ικανοποιούν την ιδιότητα (3.3) της Πρότασης 3.1.8.

Λήμμα 3.2.6 ([Mos09], 1F.7). *Θεωρούμε έναν φυσικό αριθμό $n \geq 1$, έναν Πολωνικό χώρο \mathcal{X} , και μια ακολουθία συνόλων $(B_i)_{i \in \mathbb{N}}$ που ανήκουν στην οικογένεια $\Sigma_n^0 | \mathcal{X}$. Τότε το σύνολο $B \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}$ που ορίζεται ως εξής*

$$(x, i) \in B \iff x \in B_i$$

ανήκει στην κλάση Σ_n^0 .

Τα πιο πάνω ισχύει επίσης αν αντικαταστήσουμε την κλάση Σ_n^0 με την Π_n^0 .

Απόδειξη. Ο ισχυρισμός για την Π_n^0 προκύπτει από αυτόν για την Σ_n^0 παίρνοντας τα συμπληρώματα. Γι' αυτό δείχνουμε μόνο τον ισχυρισμό για την Σ_n^0 .

Ορίζουμε τα σύνολα $C_i \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}$, $i \in \mathbb{N}$, ως εξής:

$$(x, s) \in C_i \iff x \in B_i \ \& \ s = i.$$

Για κάθε i το σύνολο $V_i = \{(x, s) \mid s = i\}$ είναι προφανώς ανοικτό υποσύνολο του $\mathcal{X} \times \mathbb{N}$ και από το Λήμμα 3.2.4 ανήκει στην Σ_n^0 . Πάλι με εφαρμογή του τελευταίου λήμματος το σύνολο $C_i = B_i \cap V_i$ ανήκει επίσης στη Σ_n^0 .

Στη συνέχεια παρατηρούμε ότι

$$\begin{aligned} (x, s) \in \bigcup_{i \in \mathbb{N}} C_i &\iff \exists i (x, s) \in C_i \\ &\iff \exists i (x \in B_i \ \& \ s = i) \\ &\iff x \in B_s \\ &\iff (x, s) \in B, \end{aligned}$$

δηλαδή $B = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} C_i$.

Αν $n = 1$ τότε κάθε C_i είναι ανοικτό σύνολο και άρα το B είναι επίσης ανοικτό ως ένωση ανοικτών συνόλων, δηλαδή $B \in \Sigma_1^0|\mathcal{X}$. Αν $n > 1$ τότε για κάθε i υπάρχει ακολουθία συνόλων $(C_j^i)_{j \in \mathbb{N}}$ από Π_{n-1}^0 υποσύνολα του \mathcal{X} με

$$C_i = \bigcup_{j \in \mathbb{N}} C_j^i.$$

Επομένως

$$B = \bigcup_{i, j \in \mathbb{N}} C_j^i$$

και άρα το B είναι αριθμήσιμη ένωση Π_{n-1}^0 υποσυνόλων του \mathcal{X} , δηλαδή $B \in \Sigma_n^0|\mathcal{X}$. \square

Πρόταση 3.2.7 (Ισοδύναμος ορισμός των κλάσεων Σ_n^0 , [Kle43], [Mos47]). Για κάθε $n \geq 1$ έχουμε

$$\Sigma_{n+1}^0 = \exists^{\mathbb{N}} \Pi_n^0$$

και συνεπώς

$$\Pi_{n+1}^0 = \forall^{\mathbb{N}} \Sigma_n^0.$$

Απόδειξη. Ορίζουμε προσωρινά τις κλάσεις

$$\Sigma_1^* = \eta \text{ κλάση όλων των ανοικτών συνόλων} = \Sigma_1^0$$

$$\Pi_1^* = \eta \text{ κλάση όλων των κλειστών συνόλων} = \Pi_1^0$$

$$\Sigma_{n+1}^* = \exists^{\mathbb{N}} \Pi_n^*$$

$$\Pi_{n+1}^* = \forall^{\mathbb{N}} \Sigma_{n+1}^*.$$

Δείχνουμε με επαγωγή στο $n \geq 1$ ότι

$$\Sigma_n^0|\mathcal{X} = \Sigma_n^*|\mathcal{X} \quad \text{και} \quad \Pi_n^0|\mathcal{X} = \Pi_n^*|\mathcal{X}.$$

(Προφανώς η τελευταία ισότητα προκύπτει από την προτελευταία παίρνοντας τα συμπληρώματα.)

Για $n = 1$ το ζητούμενο είναι άμεσο από τον ορισμό. Θεωρούμε ότι για κάποιο $n \geq 1$ έχουμε το ζητούμενο και δείχνουμε το ίδιο για το $n + 1$.

Έστω $P \subseteq \mathcal{X}$ που ανήκει στη Σ_{n+1}^* . Τότε υπάρχει $A \in \Pi_n^*|\mathcal{X}$ με $P = \exists^{\mathbb{N}} A$. Από την Επαγωγική Υπόθεση $A \in \Pi_n^0|\mathcal{X}$. Εφαρμόζουμε την Παρατήρηση 3.2.5 για την κλάση Π_n^0 και έχουμε ότι για κάθε $i \in \mathbb{N}$ το σύνολο

$$A_i = \{x \mid (x, i) \in A\}$$

ανήκει στην Π_n^0 . Επιπλέον

$$x \in P \iff \exists i (x, i) \in A \iff \exists i x \in A_i,$$

άρα $P = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} A_i$. Προκύπτει ότι το P ανήκει στη $\Sigma_{n+1}^0|\mathcal{X}$.

Αντίστροφα θεωρούμε ένα $P \subseteq \mathcal{X}$ που ανήκει στη Σ_{n+1}^0 και $(B_i)_{i \in \mathbb{N}}$ μια ακολουθία στοιχείων της $\underline{\Pi}_n^0 | \mathcal{X}$ έτσι ώστε $P = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} B_i$. Από το Λήμμα 3.2.6 το σύνολο

$$B = \{(x, i) \mid x \in B_i\}$$

ανήκει επίσης στην $\underline{\Pi}_n^0$. Από την Επαγωγική Υπόθεση $B \in \underline{\Pi}_n^* | (\mathcal{X} \times \mathbb{N})$. Επιπλέον

$$x \in P \iff \exists i x \in B_i \iff \exists i (x, i) \in B$$

και άρα $P = \exists^{\mathbb{N}} B \in \Sigma_{n+1}^* | \mathcal{X}$. \square

Θεώρημα 3.2.8 (Οι Θεμελιώδεις Ιδιότητες Κλειστότητας των Borel κλάσεων πεπερασμένης τάξης, [Kur66], [Mos09]). Οι κλάσεις Σ_n^0 , $\underline{\Pi}_n^0$ και $\underline{\Delta}_n^0$, όπου $n \geq 1$, είναι κλειστές ως προς συνεχή αντικατάσταση καθώς και ως προς τους τελεστές \vee , $\&$, \exists^{\leq} , \forall^{\leq} , \bigvee_{\leq} και \bigwedge_{\leq} .

Οι κλάσεις Σ_n^0 είναι επιπλέον κλειστές ως προς τους τελεστές

$$\bigvee_{\mathbb{N}}, \exists^{\mathbb{N}} \text{ και γενικότερα } \exists^Y \text{ όπου } Y \text{ είναι αριθμήσιμος Πολωνικός χώρος.}$$

Οι κλάσεις $\underline{\Pi}_n^0$ είναι επιπλέον κλειστές ως προς τους τελεστές

$$\bigwedge_{\mathbb{N}}, \forall^{\mathbb{N}} \text{ και γενικότερα } \forall^Y \text{ όπου } Y \text{ είναι αριθμήσιμος Πολωνικός χώρος.}$$

Οι κλάσεις $\underline{\Delta}_n^0$ είναι επιπλέον κλειστές ως προς τον τελεστή του συμπληρώματος c .

Απόδειξη. Η κλειστότητα των κλάσεων ως προς συνεχή αντικατάσταση και ως προς τους τελεστές \vee , $\&$ αποδείχθηκε στο Λήμμα 3.2.4. Η κλειστότητα ως προς τους τελεστές της πεπερασμένης ένωσης \bigvee_{\leq} και τομής \bigwedge_{\leq} προκύπτει από την κλειστότητα ως προς \vee και $\&$ αντίστοιχα με επαγωγή στο πλήθος της πεπερασμένης ακολουθίας συνόλων που θεωρούμε.

Από την Πρόταση 3.1.10 η κλειστότητα της Σ_n^0 ως προς \exists^{\leq} και \forall^{\leq} είναι ισοδύναμη με την κλειστότητα ως προς \bigvee_{\leq} και \bigwedge_{\leq} αντίστοιχα, (εδώ χρησιμοποιούμε φυσικά την κλειστότητα της Σ_n^0 ως προς συνεχή αντικατάσταση).

Στη συνέχεια ασχολούμαστε με τις επιπλέον ιδιότητες κλειστότητας της Σ_n^0 . Θεωρούμε αρχικά μια ακολουθία $(P_i)_{i \in \mathbb{N}}$ υποσυνόλων του \mathcal{X} που ανήκει στη Σ_n^0 και δείχνουμε ότι η ένωση $P = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} P_i$ είναι ανοικτό σύνολο.

Αν $n = 1$ τότε τα P_i είναι ανοικτά σύνολα και συνεπώς το P είναι ανοικτό ως ένωση ανοικτών συνόλων. Αν $n > 1$ τότε κάθε P_i είναι η ένωση μια ακολουθίας $(Q_j^i)_{j \in \mathbb{N}}$ από $\underline{\Pi}_{n-1}^0$ υποσύνολα του \mathcal{X} . Επομένως

$$P = \bigcup_{i,j} Q_j^i$$

και άρα το P είναι αριθμήσιμη ένωση ακολουθίας $\underline{\Pi}_{n-1}^0$ υποσυνόλων του \mathcal{X} , δηλαδή $P \in \Sigma_n^0 | \mathcal{X}$.

Το πιο πάνω δείχνει την κλειστότητα της Σ_n^0 ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$. Από το Πόρισμα 3.1.9 η κλειστότητα της Σ_n^0 είναι ισοδύναμη με την κλειστότητα ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$.

Για την κλειστότητα της Σ_n^0 ως προς \exists^Y όπου Y είναι ένας αριθμήσιμος Πολωνικός χώρος, θεωρούμε μια απαρίθμηση $f : \mathbb{N} \rightarrow Y$. Αφού το \mathbb{N} θεωρείται με τη διακριτή τοπολογία η f είναι συνεχής. Για κάθε $Q \in \Sigma_n^0 | (\mathcal{X} \times Y)$ έχουμε

$$\begin{aligned} x \in \exists^Y Q &\iff \exists y (x, y) \in Q \\ &\iff \exists n (x, f(n)) \in Q \end{aligned}$$

και το σύνολο $\exists^Y Q$ ανήκει στην κλάση Σ_n^0 λόγω της κλειστότητας της τελευταίας ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$ και συνεχή αντικατάσταση.

Οι ιδιότητες κλειστότητας της $\underline{\Pi}_n^0$ ως προς \exists^{\leq} , \forall^{\leq} , $\bigwedge_{\mathbb{N}}$, $\forall^{\mathbb{N}}$, \forall^Y , όπου Y είναι αριθμήσιμος Πολωνικός χώρος προκύπτουν από τις αντίστοιχες της $\underline{\Pi}_n^0$ παίρνοντας τον τελεστή του συμπληρώματος. Προκύπτει ότι η $\underline{\Delta}_n^0$ είναι επίσης κλειστή ως προς \exists^{\leq} και \forall^{\leq} . Τέλος είναι σαφές ότι η $\underline{\Delta}_n^0$ είναι κλειστή ως προς τον τελεστή του συμπληρώματος c . Αυτό ολοκληρώνει την απόδειξη. \square

Η κλειστότητα ως προς \exists^Y ή \forall^Y , όπου Y είναι ένας αριθμήσιμος Πολωνικός χώρος μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε τον Πολωνικό χώρο $\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ χωρίς να χρειαστεί να καταφύγουμε σε κάποια απαρίθμηση του όπως έχουμε κάνει στην επίλυση της Ασκήσης 3.1.16. Δείτε για παράδειγμα τις λύσεις των Ασκήσεων 3.2.12 και 3.2.14.

Παράδειγμα 3.2.9. Θεωρούμε τον Πολωνικό χώρο $\mathcal{X} = \mathbb{R}^{\mathbb{N}} \times \mathbb{R}$ και το σύνολο

$$P = \{((x_n)_{n \in \mathbb{N}}, x) \in \mathcal{X} \mid x_n \rightarrow x\}.$$

Δείχνουμε ότι το P είναι $\underline{\Pi}_3^0$ υποσύνολο του \mathcal{X} . Έχουμε

$$\begin{aligned} ((x_n)_{n \in \mathbb{N}}, x) \in P &\iff \forall k \exists n_0 \forall n \geq n_0 |x_n - x| \leq 2^{-k} \\ &\iff \forall k \exists n_0 \forall n (n < n_0 \vee |x_n - x| \leq 2^{-k}). \end{aligned}$$

Με χρήση του διαγραμματικού συλλογισμού εκτιμούμε:

$$\begin{aligned} &\forall k \exists n_0 \forall n \underbrace{(n < n_0 \vee |x_n - x| \leq 2^{-k})}_{\underline{\Pi}_1^0} \\ &\quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\underline{\Pi}_1^0 \text{ κλειστότητα ως προς } \vee} \\ &\quad \underbrace{\forall^{\mathbb{N}} \underline{\Pi}_1^0 = \underline{\Pi}_1^0}_{\underline{\Sigma}_2^0} \\ &\quad \underbrace{\exists^{\mathbb{N}} \underline{\Pi}_1^0 = \underline{\Sigma}_2^0}_{\underline{\Sigma}_2^0} \\ &\quad \underbrace{\forall^{\mathbb{N}} \underline{\Sigma}_2^0 = \underline{\Pi}_3^0}_{\underline{\Pi}_3^0} \end{aligned}$$

Πιο πάνω έχουμε χρησιμοποιήσει την Πρόταση 3.2.7 (ισοδύναμος ορισμός των $\underline{\Sigma}_n^0$ με βάση τον τελεστή $\exists^{\mathbb{N}}$) καθώς και την κλειστότητα της κλάσης $\underline{\Pi}_1^0$ ως προς \vee και συνεχή αντικατάσταση (Θεώρημα 3.2.8).

Δίνουμε κάποιες εξηγήσεις. Αυστηρά θεωρούμε τα σύνολα A, B με

$$\begin{aligned} ((x_i)_{i \in \mathbb{N}}, x, k, n_0, n) \in A &\iff n < n_0 \\ &\iff f((x_i)_{i \in \mathbb{N}}, x, k, n_0, n) > 0 \\ &\iff ((x_i)_{i \in \mathbb{N}}, x, k, n_0, n) \in f^{-1}[(0, \infty) \cap \mathbb{N}] \\ ((x_i)_{i \in \mathbb{N}}, x, k, n_0, n) \in B &\iff |x_n - x| \leq 2^{-k} \\ &\iff g((x_i)_{i \in \mathbb{N}}, x, k, n_0, n) \geq 0 \\ &\iff ((x_i)_{i \in \mathbb{N}}, x, k, n_0, n) \in g^{-1}[[0, \infty)], \end{aligned}$$

όπου

$$\begin{aligned} f((x_i)_{i \in \mathbb{N}}, x, k, n_0, n) &= n - n_0 \\ g((x_i)_{i \in \mathbb{N}}, x, k, n_0, n) &= |x_n - x| - 2^{-k}. \end{aligned}$$

Είναι σαφές ότι οι πιο πάνω συναρτήσεις f και g είναι συνεχείς. Επειδή τα σύνολα $(0, \infty) \cap \mathbb{N}$ και $[0, \infty)$ είναι κλειστά υποσύνολα των \mathbb{N} και \mathbb{R} αντίστοιχα, έχουμε από την κλειστότητα της $\underline{\Pi}_1^0$ ως προς συνεχή αντικατάσταση ότι τα σύνολα A, B είναι κλειστά.

Επιπλέον από τα προηγούμενα έχουμε ότι

$$P = \forall^{\mathbb{N}} \exists^{\mathbb{N}} \forall^{\mathbb{N}} A \vee B$$

Επομένως το P είναι $\underline{\Pi}_3^0$ σύνολο.

Οπως έχουμε εξηγήσει στην Ενότητα 3.1 (δείτε τα Παραδείγματα 3.1.11 και 3.1.12) δεν θα κάνουμε συνήθως αναφορά στις πιο πάνω συναρτήσεις f, g ούτε στα ενδιάμεσα σύνολα A, B , αλλά θα εφαρμόζουμε κατευθείαν τον πιο πάνω διαγραμματικό συλλογισμό.

Ασκήσεις

Άσκηση 3.2.10. Για κάθε $n \geq 1$ ισχύει

$$\underline{\Sigma}_{n+1}^0 = \bigwedge_{\mathbb{N}} \underline{\Sigma}_n^0 \quad \text{και} \quad \underline{\Sigma}_n^0 = \text{c}\underline{\Pi}_n^0.$$

Άσκηση 3.2.11. Θεωρούμε έναν Πολωνικό χώρο \mathcal{X} ένα $n \geq 1$ και μια ακολουθία $(B_i)_{i \in \mathbb{N}}$ υποσυνόλων του \mathcal{X} . Αν για κάθε i υπάρχει $n_i \leq n$ με $\underline{\Pi}_{n_i}^0$ τότε το σύνολο $A = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} B_i$ είναι $\underline{\Sigma}_{n+1}^0$ υποσύνολο του \mathcal{X} .

Συμπεράνετε ότι

$$\underline{\Sigma}_{n+1}^0 = \bigvee_{\mathbb{N}} \left(\bigcup_{k \leq n} \underline{\Pi}_k^0 \right).$$

Άσκηση 3.2.12. Κάθε $\underline{\Sigma}_{n+1}^0$ σύνολο μπορεί να γραφεί ως αριθμήσιμη ένωση μιας *αύξουσας* ακολουθίας $\underline{\Pi}_n^0$ συνόλων.

Άσκηση 3.2.13. Χρησιμοποιήστε την κλειστότητα της κλάσης $\underline{\Sigma}_2^0$ ως προς $\exists^{\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}}$ για να δείξετε ότι τα σύνολα A_u της Άσκησης 3.1.16 είναι $\underline{\Pi}_3^0$.

Άσκηση 3.2.14. Το σύνολο όλων των δένδρων πεπερασμένης διακλάδωσης είναι $\underline{\Pi}_3^0$ υποσύνολο του Tr .

Άσκηση 3.2.15. Δείξτε την κλειστότητα των κλάσεων $\underline{\Sigma}_n^0$ ($n \geq 1$) ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$ κατευθείαν από την κλειστότητα των τελευταίων ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$ χωρίς την επίκληση του Πορίσματος 3.1.9.

Άσκηση 3.2.16. Δείξτε την κλειστότητα των κλάσεων $\underline{\Sigma}_n^0$ ($n \geq 1$) ως προς \exists^{\leq} και \forall^{\leq} κατευθείαν από την κλειστότητα των τελευταίων ως προς \bigvee_{\leq} και \bigwedge_{\leq} αντίστοιχα, χωρίς την επίκληση της Πρότασης 3.1.10.

Άσκηση 3.2.17. Το Λήμμα 3.2.6 αποτυγχάνει για την κλάση $\underline{\Sigma}_1^0$ αν αντικαταστήσουμε το σύνολο \mathbb{N} με τον Πολωνικό χώρο $\mathcal{Y} = [0, 1]$.

Μάλιστα για κάθε Πολωνικό χώρο \mathcal{X} υπάρχει οικογένεια $(V_y)_{y \in [0,1]}$ ανοικτών υποσυνόλων του \mathcal{X} έτσι ώστε το σύνολο $V \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{Y}$ με

$$(x, y) \in V \iff x \in V_y$$

δεν είναι ανοικτό υποσύνολο του $\mathcal{X} \times \mathcal{Y}$.

Άσκηση 3.2.18. Θεωρούμε Πολωνικούς χώρους \mathcal{X}_i , $i \in \mathbb{N}$ και έναν φυσικό αριθμό $n \geq 1$. Τότε για κάθε ακολουθία συνόλων $(A_i)_{i \in \mathbb{N}}$ με $A_i \in \underline{\Sigma}_n^0 | \mathcal{X}_i$, όπου $i \in \mathbb{N}$, το σύνολο $\prod_{i \in \mathbb{N}} A_i$ είναι $\underline{\Pi}_{n+1}^0$ υποσύνολο του χώρου γινόμενο $\mathcal{X} = \prod_{i \in \mathbb{N}} \mathcal{X}_i$.

Επίσης για κάθε $m \in \mathbb{N}$ το σύνολο $A_0 \times \cdots \times A_m$ είναι $\underline{\Sigma}_n^0$ υποσύνολο του $\mathcal{X}_0 \times \cdots \times \mathcal{X}_m$.

Διατυπώστε τα ανάλογα συμπεράσματα για ακολουθία συνόλων $(A_i)_{i \in \mathbb{N}}$ με $A_i \in \underline{\Pi}_n^0 | \mathcal{X}_i$.

3.3. Οι προβολικές κλάσεις συνόλων

Ορισμός 3.3.1 (Ορισμός των προβολικών κλάσεων, [Lus25c], [Lus25b], [Lus25a], [Sie25], [Mos09]). Ορίζουμε με αναδρομή στο $n \geq 1$ τις εξής κλάσεις συνόλων σε Πολωνικούς χώρους:

$$\begin{aligned} \underline{\Sigma}_1^1 &= \exists^{\mathcal{N}} \underline{\Pi}_1^0 \\ &= \text{οι προβολές κλειστών } F \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{N} \text{ υπεράνω του } \mathcal{X}, \\ &\quad \text{όπου } \mathcal{X} \text{ Πολωνικός χώρος} \end{aligned}$$

$$\underline{\Pi}_1^1 = \text{c}\underline{\Sigma}_1^1 = \text{τα συμπληρώματα των } \underline{\Sigma}_1^1 \text{ συνόλων}$$

και

$$\begin{aligned}\underline{\Sigma}_{n+1}^1 &= \exists^{\mathcal{N}} \underline{\Pi}_n^1 \\ &= \text{οι προβολές } \underline{\Pi}_n^1 \text{ συνόλων } F \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{N} \text{ υπεράνω του } \mathcal{X}, \\ &\quad \text{όπου } \mathcal{X} \text{ Πολωνικός χώρος} \\ \underline{\Pi}_{n+1}^1 &= c\underline{\Sigma}_{n+1}^1 \\ &= \text{τα συμπληρώματα των } \underline{\Sigma}_{n+1}^1 \text{ συνόλων.}\end{aligned}$$

Με άλλα λόγια ένα $P \subseteq \mathcal{X}$ είναι $\underline{\Sigma}_1^1$ (ή $\underline{\Sigma}_{n+1}^1$) σύνολο αν και μόνο αν υπάρχει ένα $\underline{\Pi}_1^0$ (ή $\underline{\Pi}_n^1$ αντίστοιχα) σύνολο $Q \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{N}$ έτσι ώστε για κάθε $x \in \mathcal{X}$,

$$x \in P \iff \exists \alpha (x, \alpha) \in Q.$$

Παίρνοντας τα συμπληρώματα έχουμε ότι ένα $P_* \subseteq \mathcal{X}$ είναι $\underline{\Pi}_1^1$ (ή $\underline{\Pi}_{n+1}^1$) σύνολο αν και μόνο αν υπάρχει ένα $\underline{\Sigma}_1^0$ (ή $\underline{\Sigma}_n^1$ αντίστοιχα) σύνολο $Q_* \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{N}$ έτσι ώστε για κάθε $x \in \mathcal{X}$,

$$x \in P_* \iff \forall \alpha (x, \alpha) \in Q_*.$$

Είναι αρκετά βολικό να θέσουμε

$$\underline{\Pi}_0^1 = \underline{\Pi}_1^0 \quad \text{και} \quad \underline{\Sigma}_0^1 = \underline{\Sigma}_1^0$$

έτσι που

$$\underline{\Sigma}_n^1 = \exists^{\mathcal{N}} \underline{\Pi}_{n-1}^1 \quad \text{και} \quad \underline{\Pi}_n^1 = \forall^{\mathcal{N}} \underline{\Sigma}_{n-1}^1$$

για κάθε $n \geq 1$.

Τέλος θέτουμε

$$\underline{\Delta}_n^1 = \underline{\Sigma}_n^1 \cap \underline{\Pi}_n^1.$$

Είναι άμεσο ότι ένα $P \subseteq \mathcal{X}$ ανήκει στη $\underline{\Delta}_n^1$ αν και μόνο αν τα σύνολα P και $\mathcal{X} \setminus P$ ανήκουν στη $\underline{\Sigma}_n^1$.

Οι κλάσεις $\underline{\Sigma}_n^1$ λέγονται **προβολικές** ή αλλιώς **κλάσεις του Lusin** ενώ οι $\underline{\Pi}_n^0$ και $\underline{\Pi}_n^1$ είναι οι **δυϊκές** (dual) και **αμφίσημες** (ambiguous) αντίστοιχα προβολικές κλάσεις.

Η συλλογή των προηγούμενων κλάσεων ονομάζεται **ιεραρχία των προβολικών συνόλων**.

Τα σύνολα της κλάσης $\underline{\Sigma}_1^1$ ονομάζονται **αναλυτικά** (analytic) και αυτά της κλάσης $\underline{\Pi}_1^1$ **συναλυτικά** (coanalytic). Τα σύνολα της κλάσης $\underline{\Delta}_1^1$ ονομάζονται **αμφι-αναλυτικά** (bi-analytic).

Λήμμα 3.3.2. *Οι κλάσεις $\underline{\Sigma}_n^1$, $\underline{\Pi}_n^1$ και $\underline{\Delta}_n^1$ είναι κλειστές ως προς συνεχή αντικατάσταση.*

Απόδειξη. Όπως και στην απόδειξη του Λήμματος 3.2.4 παρατηρούμε ότι η κλειστότητα ως προς συνεχή αντικατάσταση της $\underline{\Sigma}_n^1$ είναι ισοδύναμη με την κλειστότητα της $\underline{\Pi}_n^1$ ως προς συνεχή αντικατάσταση. (Γενικότερα μια κλάση Γ είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση αν και μόνο αν η $c\Gamma$ είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση.)

Επιπλέον η κλειστότητα της $\underline{\Delta}_n^1$ ως προς συνεχή αντικατάσταση είναι άμεση από την ίδια ιδιότητα των κλάσεων $\underline{\Sigma}_n^1$ και $\underline{\Pi}_n^1$.

Στη συνέχεια δείχνουμε ότι αν μια κλάση Γ είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση τότε και η $\exists^{\mathcal{N}}\Gamma$ έχει την ίδια ιδιότητα. Θεωρούμε Πολωνικούς χώρους \mathcal{X} , \mathcal{Y} , μια συνεχή συνάρτηση $f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$ και ένα $P \subseteq \mathcal{Y}$ που ανήκει στη $\exists^{\mathcal{N}}\Gamma$, όπου η Γ είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση. Πρέπει να δείξουμε ότι το σύνολο $f^{-1}[P]$ ανήκει στη $\exists^{\mathcal{N}}\Gamma$.

Υπάρχει $Q \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{N}$ που ανήκει στη Γ έτσι ώστε $P = \exists^{\mathcal{N}} Q$. Τότε για κάθε $x \in \mathcal{X}$,

$$\begin{aligned} x \in f^{-1}[P] &\iff f(x) \in P \\ &\iff \exists \alpha (f(x), \alpha) \in Q \\ &\iff \exists \alpha h(x, \alpha) \in Q \\ &\iff \exists \alpha (x, \alpha) \in h^{-1}[Q], \end{aligned}$$

όπου $h(x, \alpha) = (f(x), \alpha)$. Η h είναι συνεχής συνάρτηση και από την υπόθεσή μας για τη Γ το σύνολο $h^{-1}[Q]$ ανήκει στη Γ . Από τις πιο πάνω ισοδυναμίες προκύπτει $f^{-1}[P] = \exists^{\mathcal{N}} h^{-1}[Q]$ και συνεπώς το $f^{-1}[P]$ ανήκει στη Γ .

Τέλος δείχνουμε με επαγωγή στο $n \geq 1$ ότι η κλάση Σ_n^1 είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση. Για $n = 1$ έχουμε ότι η $\Sigma_1^1 = \exists^{\mathcal{N}} \Pi_1^0$ είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση από τα πιο πάνω και από το ότι η κλάση Π_1^0 έχει αυτή την ιδιότητα.

Υποθέτουμε ότι για κάποιο $n \geq 1$ η κλάση Σ_n^0 είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση. Επομένως και η Π_n^1 έχει την ίδια ιδιότητα και από τα πιο πάνω το ίδιο ισχύει και για την $\Sigma_{n+1}^1 = \exists^{\mathcal{N}} \Pi_n^1$. \square

Πρόταση 3.3.3. Για κάθε Πολωνικό χώρο \mathcal{X} και κάθε $n \geq 1$ έχουμε

$$\Sigma_n^1 | \mathcal{X} \subseteq \Delta_{n+1}^1 | \mathcal{X}$$

και επομένως ισχύει επίσης

$$\Pi_n^1 | \mathcal{X} \subseteq \Delta_{n+1}^1 | \mathcal{X}.$$

Απόδειξη. Προφανώς ο δεύτερος εγκλεισμός προκύπτει από τον πρώτο παίρνοντας το συμπλήρωμα του συνόλου. Αρχικά δείχνουμε τη συμπερίληψη $\Sigma_n^1 | \mathcal{X} \subseteq \Pi_{n+1}^1 | \mathcal{X}$. Θεωρούμε $P \subseteq \mathcal{X}$ που ανήκει στην Σ_n^1 και $Q \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{N}$ που ανήκει στη Π_{n-1}^1 έτσι ώστε $P = \exists^{\mathcal{N}} Q$. Θέτουμε

$$R = Q \times \mathcal{N}$$

και ισχυριζόμαστε ότι το R είναι επίσης Π_{n-1}^1 σύνολο. Για κάθε $(x, \alpha, \beta) \in \mathcal{X} \times \mathcal{N} \times \mathcal{N}$ έχουμε

$$(x, \alpha, \beta) \in R \iff (x, \alpha) \in Q$$

και το R ανήκει στην Π_{n-1}^1 λόγω της κλειστότητας της τελευταίας ως προς συνεχή αντικατάσταση, δείτε το Λήμμα 3.3.2.

Επιπλέον για κάθε $x \in \mathcal{X}$ έχουμε

$$\begin{aligned} x \in P &\iff \exists \alpha (x, \alpha) \in Q \\ &\iff \forall \beta \exists \alpha (x, \alpha, \beta) \in R. \end{aligned}$$

Άρα το P ανήκει στην κλάση $\forall^{\mathcal{N}} \exists^{\mathcal{N}} \Pi_{n-1}^1 = \forall^{\mathcal{N}} \Sigma_n^1 = \Pi_{n+1}^1$.

Στη συνέχεια δείχνουμε ότι κάθε κλειστό σύνολο είναι Π_1^1 υποσύνολο του ίδιου χώρου. Έστω \mathcal{X} Πολωνικός χώρος και $F \subseteq \mathcal{X}$ κλειστό.

Το F , ως κλειστό, είναι επίσης G_δ σύνολο επομένως υπάρχει ακολουθία $(V_n)_{n \in \mathbb{N}}$ από ανοικτά υποσύνολα του \mathcal{X} με $F = \bigcap_{n \in \mathbb{N}} V_n$. Θεωρούμε το σύνολο

$$V = \{(x, \alpha) \in \mathcal{X} \times \mathcal{N} \mid x \in V_{\alpha(0)}\}.$$

Είναι εύκολο να δει κανείς ότι το V είναι ανοικτό υποσύνολο του $\mathcal{X} \times \mathcal{N}$. Επιπλέον για κάθε $x \in \mathcal{X}$,

$$\begin{aligned} x \in F &\iff \forall n x \in V_n \\ &\iff \forall \alpha x \in V_{\alpha(0)} \\ &\iff \forall \alpha (x, \alpha) \in V. \end{aligned}$$

Συνεπώς το F είναι $\forall^{\mathcal{N}} \Sigma_1^0 = \Pi_1^1$ σύνολο.

Έπειτα δείχνουμε με επαγωγή στο $n \geq 1$ ότι για κάθε Πολωνικό χώρο \mathcal{X} ισχύει $\Sigma_n^1|\mathcal{X} \subseteq \Sigma_{n+1}^1|\mathcal{X}$. Με βάση αυτό και τις προηγούμενες συμπεριλήψεις έχουμε το ζητούμενο.

Για $n = 1$, θεωρούμε έναν Πολωνικό χώρο \mathcal{X} και $P \subseteq \mathcal{X}$ που ανήκει στη Σ_1^1 . Τότε υπάρχει κλειστό σύνολο $F \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{N}$ έτσι ώστε $P = \exists^{\mathcal{N}}F$.

Δείξαμε ότι το F ως κλειστό είναι Π_1^1 υποσύνολο του $\mathcal{X} \times \mathcal{N}$. Επομένως το P είναι $\exists^{\mathcal{N}}\Pi_1^1 = \Sigma_2^1$ υποσύνολο του \mathcal{X} .

Υποθέτουμε ότι για κάποιο $n \geq 1$ και κάθε Πολωνικό χώρο \mathcal{X} ισχύει

$$\Sigma_n^1|\mathcal{X} \subseteq \Sigma_{n+1}^1|\mathcal{X}, \quad \text{ισοδύναμα} \quad \Pi_n^1|\mathcal{X} \subseteq \Pi_{n+1}^1|\mathcal{X}.$$

Έστω \mathcal{X} Πολωνικός χώρος και ένα Σ_{n+1}^1 σύνολο $P \subseteq \mathcal{X}$. Δείχνουμε ότι το P είναι Σ_{n+2}^1 υποσύνολο του \mathcal{X} . Από τον ορισμό υπάρχει ένα Π_n^1 σύνολο $Q \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{N}$ με $P = \exists^{\mathcal{N}}Q$. Από την Επαγωγική Υπόθεση εφαρμοσμένη στον χώρο $\mathcal{X} \times \mathcal{N}$ το Q είναι Π_{n+1}^1 σύνολο. Συνεπώς το P είναι $\exists^{\mathcal{N}}\Pi_{n+1}^1 = \Sigma_{n+2}^1$ υποσύνολο του \mathcal{X} . \square

Θεώρημα 3.3.4 (Οι Θεμελιώδεις Ιδιότητες Κλειστότητας των κλάσεων του Lusin, [Sie28], [Mos09]). *Οι κλάσεις Σ_n^1 , Π_n^1 και Δ_n^1 , $n \geq 1$, είναι κλειστές ως προς συνεχή αντικατάσταση και τους τελεστές \vee , $\&$, \exists^{\leq} , \forall^{\leq} , \bigvee_{\leq} , \bigwedge_{\leq} , $\exists^{\mathbb{N}}$, $\forall^{\mathbb{N}}$, $\bigvee_{\mathbb{N}}$, $\bigwedge_{\mathbb{N}}$.*

Οι κλάσεις Σ_n^1 είναι επιπλέον κλειστές ως προς τον τελεστή $\exists^{\mathcal{Y}}$ και οι Π_n^1 ως προς τον $\forall^{\mathcal{Y}}$ για κάθε Πολωνικό χώρο \mathcal{Y} . Οι κλάσεις Δ_n^1 είναι επιπλέον κλειστές ως προς τον τελεστή του συμπληρώματος c .

Απόδειξη. Η κλειστότητα ως προς συνεχή αντικατάσταση έχει δειχθεί στο Λήμμα 3.3.2.

Ως συνήθως οι ιδιότητες κλειστότητας των κλάσεων Σ_n^1 δίνουν τις αντίστοιχες για τις κλάσεις Π_n^1 και κατά συνέπεια και για τις Δ_n^1 . Επιπλέον είναι σαφές ότι οι τελευταίες είναι κλειστές ως προς το συμπλήρωμα. Επομένως δείχνουμε τις ζητούμενες ιδιότητες για τις Σ_n^1 .

Αν δείξουμε ότι οι Σ_n^1 είναι κλειστές ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$ τότε θα έχουμε και κλειστότητα ως προς πεπερασμένη ένωση (υποσυνόλων του ίδιου χώρου), γιατί το κενό σύνολο ανήκει σε όλες αυτές τις κλάσεις. Δηλαδή θα έχουμε και την κλειστότητα ως προς \bigvee_{\leq} και \vee . Επιπλέον από την Άσκηση 3.3.9 η κλειστότητα ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$ και \bigvee_{\leq} είναι ισοδύναμη με την κλειστότητα ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$ και \exists^{\leq} αντίστοιχα.

Με όμοια συλλογιστική έχουμε επίσης ότι η κλειστότητα των Σ_n^1 ως προς $\bigwedge_{\mathbb{N}}$ συνεπάγεται και την κλειστότητα ως προς \bigwedge_{\leq} και $\&$ χρησιμοποιώντας ότι κάθε Πολωνικός χώρος \mathcal{X} ανήκει σε όλες αυτές τις κλάσεις. Επιπλέον πάλι από την Άσκηση 3.3.9 η κλειστότητα ως προς $\bigwedge_{\mathbb{N}}$ και \bigwedge_{\leq} είναι ισοδύναμη με την κλειστότητα ως προς $\forall^{\mathbb{N}}$ και \forall^{\leq} αντίστοιχα.

Επομένως αρκεί να δείξουμε την κλειστότητα των κλάσεων Σ_n^1 ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$, $\forall^{\mathbb{N}}$ και $\exists^{\mathcal{Y}}$, όπου \mathcal{Y} είναι τυχαίος Πολωνικός χώρος.

Υπειθυμίζουμε τη συνάρτηση κωδικοποίησης $\langle \cdot \rangle$ από το (2.7) και τους συμβολισμούς

$$\begin{aligned} \alpha^* &= (\alpha(1), \dots, \alpha(n), \dots) \in \mathcal{N} \\ (\alpha)_i &= (\alpha(\langle i, 0 \rangle), \alpha(\langle i, 1 \rangle), \dots, \alpha(\langle i, t \rangle), \dots) \in \mathcal{N}. \end{aligned}$$

από τα (2.9), και (2.12) αντίστοιχα, όπου $i \in \mathbb{N}$ και $\alpha \in \mathcal{N}$. Όπως έχουμε πει οι συναρτήσεις $(\alpha \mapsto \alpha^*)$ και $((i, \alpha) \mapsto (\alpha)_i)$ είναι συνεχείς (Άσκηση 2.3.13).

Παρατηρούμε ότι για κάθε ακολουθία $(\alpha_i)_{i \in \mathbb{N}}$ από στοιχεία του \mathcal{N} μπορούμε να βρούμε ένα $\alpha \in \mathcal{N}$ με την ιδιότητα $(\alpha)_i = \alpha_i$ για κάθε $i \in \mathbb{N}$. Μια τέτοια επιλογή α είναι η

$$\alpha(\langle i, t \rangle) = \alpha_i(t) \quad \text{και} \quad \alpha(k) = 0, \quad \text{αν } k \neq \langle i, t \rangle \text{ για κάθε } i, t.$$

Αρχικά δείχνουμε ότι κάθε κλάση Σ_n^1 , $n \geq 1$, είναι κλειστή ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$. Θεωρούμε $n \geq 1$, ένα Σ_n^1 σύνολο $P \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}$ και ένα Π_{n-1}^1 σύνολο $Q \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N} \times \mathcal{N}$ έτσι ώστε $P = \exists^{\mathbb{N}} Q$. Για κάθε $x \in \mathcal{X}$ έχουμε

$$\begin{aligned} x \in \exists^{\mathbb{N}} P &\iff \exists i (x, i) \in P \\ &\iff \exists i \exists \alpha (x, i, \alpha) \in Q \\ &\iff \exists \beta (x, \beta(0), \beta^*) \in Q, \end{aligned}$$

όπου πιο πάνω παίρνουμε $\beta = (i, \alpha(0), \alpha(1), \dots)$. Αφού η κλάση Π_{n-1}^1 είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση προκύπτει από την τελευταία ισοδυναμία ότι το σύνολο $\exists^{\mathbb{N}} P$ ανήκει στην κλάση $\exists^{\mathbb{N}} \Pi_{n-1}^1 = \Sigma_n^1$.

Επομένως οι κλάσεις Σ_n^1 , $n \geq 1$ είναι κλειστές ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$. Για την κλειστότητα ως προς $\forall^{\mathbb{N}}$, θεωρούμε ένα $n \geq 1$ και P, Q όπως πιο πάνω. Για κάθε $x \in \mathcal{X}$ έχουμε

$$\begin{aligned} x \in \forall^{\mathbb{N}} P &\iff \forall i (x, i) \in P \\ &\iff \forall i \exists \alpha (x, i, \alpha) \in Q \\ &\iff \exists \alpha \forall i (x, i, (\alpha)_i) \in Q. \end{aligned}$$

Για την τελευταία ισοδυναμία αν για κάθε i υπάρχει κάποιο $\alpha \equiv \alpha_i$ με $(x, i, \alpha_i) \in Q$ τότε μπορούμε να επιλέξουμε ένα $\alpha \in \mathcal{N}$ με $(\alpha)_i = \alpha_i$ για κάθε i , όπως έχουμε εξηγήσει πιο πάνω. Τότε θα έχουμε $(x, i, (\alpha)_i) \in Q$ για κάθε i .

Από την τελευταία ισοδυναμία προκύπτει ότι το σύνολο $\forall^{\mathbb{N}} P$ ανήκει στην κλάση $\exists^{\mathbb{N}} \forall^{\mathbb{N}} \Pi_{n-1}^1$. Όπως έχουμε δείξει πιο πάνω η κλάση Σ_{n-1}^1 είναι κλειστή ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$. (Για $n = 1$ το ζητούμενο προκύπτει από τις ιδιότητες κλειστότητας της κλάσης $\Sigma_0^1 = \Sigma_1^0$, δείτε το Θεώρημα 3.2.8.) Παίρνοντας το συμπλήρωμα η Π_{n-1}^1 είναι κλειστή ως προς $\forall^{\mathbb{N}}$. Επομένως το σύνολο $\forall^{\mathbb{N}} P$ ανήκει στην κλάση $\exists^{\mathbb{N}} \forall^{\mathbb{N}} \Pi_{n-1}^1 = \exists^{\mathbb{N}} \Sigma_{n-1}^1 = \Sigma_n^1$.

Τέλος δείχνουμε την κλειστότητα των Σ_n^1 ως προς $\exists^{\mathcal{Y}}$. Θεωρούμε $n \geq 1$, ένα Σ_n^1 σύνολο $P \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{N}$, και ένα Π_{n-1}^1 σύνολο $Q \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{N} \times \mathcal{N}$. Τότε για κάθε $x \in \mathcal{X}$ έχουμε

$$\begin{aligned} x \in \exists^{\mathcal{N}} P &\iff \exists \alpha (x, \alpha) \in P \\ &\iff \exists \alpha \exists \beta (x, \alpha, \beta) \in Q \\ &\iff \exists \gamma (x, (\gamma)_0, (\gamma)_1) \in Q. \end{aligned}$$

Επομένως το σύνολο $\exists^{\mathcal{N}} P$ ανήκει στην κλάση $\exists^{\mathcal{N}} \Pi_{n-1}^1 = \Sigma_n^1$. \square

Πόρισμα 3.3.5 (Ισοδύναμος ορισμός των κλάσεων Σ_n^1). Για κάθε $n \geq 1$ η κλάση Σ_n^1 αποτελείται ακριβώς από τις συνεχείς εικόνες Π_{n-1}^1 συνόλων.

Απόδειξη. Κάθε Σ_n^1 σύνολο είναι προβολή (και επομένως είναι συνεχής εικόνα) ενός Π_{n-1}^1 συνόλου, επομένως πρέπει να δείξουμε το αντίστροφο. Έστω $f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$ συνεχής και $Q \subseteq \mathcal{X}$ το οποίο είναι Π_{n-1}^1 . Πρέπει να δείξουμε ότι η εικόνα $f[Q]$ είναι Σ_n^1 σύνολο. Πράγματι, για κάθε $y \in \mathcal{Y}$ έχουμε

$$\begin{aligned} y \in f[Q] &\iff \exists x (x \in Q \ \& \ f(x) = y) \\ &\iff \exists x (x \in Q \ \& \ (x, y) \in \text{Graph}(f)) \end{aligned}$$

Το γράφημα της f είναι κλειστό σύνολο και επομένως από την Πρόταση 3.3.3 (και την απόδειξή της) είναι Π_{n-1}^1 σύνολο. Από το Θεώρημα 3.3.4 (Ιδιότητες Κλειστότητας των κλάσεων του Lusin) η κλάση Π_{n-1}^1 είναι κλειστή ως προς $\&$. Στην περίπτωση όπου $n = 1$ αυτό προκύπτει από τις ιδιότητες κλειστότητας των κλειστών συνόλων.

Με βάση την τελευταία από τις πιο πάνω ισοδυναμίες καταλήγουμε ότι $f[Q] = \exists^{\mathcal{X}} R$ όπου το R είναι ένα Π_{n-1}^1 υποσύνολο του $\mathcal{Y} \times \mathcal{X}$. Συνεπώς το $f[Q]$ είναι Σ_n^1 υποσύνολο του \mathcal{Y} . \square

Πόρισμα 3.3.6. Η συνεχής εικόνα Σ_n^1 συνόλου είναι Σ_n^1 σύνολο.

Απόδειξη. Από το Πόρισμα 3.3.5 το δοσμένο Σ_n^1 σύνολο είναι συνεχής εικόνα Π_{n-1}^1 συνόλου. Εφόσον η σύνθεση συνεχών συναρτήσεων είναι συνεχής συνάρτηση, προκύπτει ότι η συνεχής εικόνα του δοσμένου Σ_n^1 συνόλου είναι συνεχής εικόνα Π_{n-1}^1 συνόλου, και πάλι από το Πόρισμα 3.3.5 είναι Σ_n^1 σύνολο. \square

Ασκήσεις

Άσκηση 3.3.7. Κάθε αριθμητική κλάση Σ_n^0 περιέχεται στην Δ_1^1 .

Άσκηση 3.3.8. Κάθε κλάση Σ_n^1 είναι κλειστή ως προς συνεχείς εικόνες.

Άσκηση 3.3.9. Έστω Γ οποιαδήποτε από τις κλάσεις Σ_n^1 και Π_n^1 , $n \geq 1$. Τότε για κάθε ακολουθία $(P_s)_{s \in \mathbb{N}}$ από υποσύνολα του ίδιου Πολωνικού χώρου \mathcal{X} που ανήκουν στην Γ το σύνολο

$$P = \{(x, s) \in \mathcal{X} \times \mathbb{N} \mid x \in P_s\}$$

ανήκει στην $\Gamma(\mathcal{X} \times \mathbb{N})$.

Αντιστρόφως για κάθε $R \in \Gamma(\mathcal{X} \times \mathbb{N})$ και κάθε $s \in \mathbb{N}$ το σύνολο

$$R_s = \{x \in \mathcal{X} \mid (x, s) \in R\}$$

ανήκει στην Γ .

Συμπεράνετε ότι ο ισχυρισμός πως η Γ είναι κλειστή ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$ και \bigvee_{\leq} είναι αντίστοιχα ισοδύναμος με τον ισχυρισμό ότι η Γ είναι κλειστή ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$ και \exists^{\leq} , (όπου $\Gamma = \Sigma_n^1, \Pi_n^1$).

Όμοια ο ισχυρισμός πως η Γ είναι κλειστή ως προς $\bigwedge_{\mathbb{N}}$ και \bigwedge_{\leq} είναι αντίστοιχα ισοδύναμος με τον ισχυρισμό ότι η Γ είναι κλειστή ως προς $\forall^{\mathbb{N}}$ και \forall^{\leq} , (όπου $\Gamma = \Sigma_n^1, \Pi_n^1$).

Άσκηση 3.3.10. Θεωρούμε μια κλάση συνόλων Γ που περιέχει τα κλειστά σύνολα, και είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση όπως επίσης ως προς τον τελεστή $\&$. Τα ακόλουθα είναι ισοδύναμα:

- (i) Η Γ είναι κλειστή ως προς $\exists^{\mathcal{N}}$.
- (ii) Η Γ είναι κλειστή ως προς $\exists^{\mathcal{Y}}$ για όλους τους Πολωνικούς χώρους \mathcal{Y} .
- (iii) Η Γ είναι κλειστή ως προς συνεχείς εικόνες.

Συμπεράνετε ότι ο ισχυρισμός πως η Σ_n^1 είναι κλειστή ως προς $\exists^{\mathcal{Y}}$ για κάθε Πολωνικό χώρο \mathcal{Y} είναι ισοδύναμος με τον ισχυρισμό ότι η Σ_n^1 είναι κλειστή ως προς συνεχείς εικόνες, όπου $n \geq 1$.

3.4. Γ-μετρησιμότητα

3.5. Παραμετρικοποίηση και Καθολικά Σύνολα

3.6. Γ-πληρότητα

3.7. Η ιδιότητα της ομαλοποίησης (uniformization property)

Borel σύνολα

4.1. Θεμελιώδεις ιδιότητες

Ορισμός 4.1.1. Θεωρούμε ένα μη κενό σύνολο X και μια οικογένεια \mathcal{A} υποσυνόλων του X . Η \mathcal{A} είναι σ -άλγεβρα στο X αν ικανοποιεί τις ακόλουθες ιδιότητες.

- (i) Τα σύνολα \emptyset, X ανήκουν στην \mathcal{A} .
- (ii) Αν $A \in \mathcal{A}$ τότε $X \setminus A \in \mathcal{A}$.
- (iii) Αν $A_n \in \mathcal{A}$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$ τότε $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{A}$.

Μερικά τετριμμένα παραδείγματα σ -άλγεβρων στο X είναι το δυναμοσύνολο $\mathcal{P}(X)$ και το $\{\emptyset, X\}$.

Όπως είναι γνωστό αν έχουμε ένα μη κενό σύνολο \mathcal{F} από σ -άλγεβρες στο ίδιο σύνολο X τότε η τομή

$$\bigcap \mathcal{F} = \{A \subseteq X \mid \forall A \in \mathcal{F} A \in \mathcal{A}\}$$

είναι επίσης σ -άλγεβρα στο X .

Ορισμός 4.1.2. Θεωρούμε έναν μετρικό χώρο X και το σύνολο \mathcal{F} όλων των σ -άλγεβρων στο X που περιέχουν τα ανοικτά υποσύνολα του X , δηλαδή

$$\mathcal{F} = \{\mathcal{A} \mid \eta \mathcal{A} \text{ είναι } \sigma\text{-άλγεβρα στο } X \text{ και για κάθε ανοικτό } V \subseteq X \text{ έχουμε } V \in \mathcal{A}\}$$

Παρατηρούμε ότι $\mathcal{P}(X) \in \mathcal{F}$ και συνεπώς $\mathcal{F} \neq \emptyset$. Η σ -άλγεβρα $\mathcal{B}|X$ των **Borel υποσυνόλων του X** είναι η οικογένεια

$$\mathcal{B}|X = \bigcap \mathcal{F}.$$

Ένα υποσύνολο του X ονομάζεται **Borel** αν ανήκει στη σ -άλγεβρα $\mathcal{B}|X$.

Είναι σαφές από τα προηγούμενα ότι η οικογένεια $\mathcal{B}|X$ έχει τις εξής ιδιότητες:

- (1) Η $\mathcal{B}|X$ είναι σ -άλγεβρα και κάθε ανοικτό υποσύνολο του X περιέχεται στην $\mathcal{B}|X$, δηλαδή η $\mathcal{B}|X$ είναι στοιχείο της πιο πάνω \mathcal{F} .
- (2) Αν \mathcal{A} είναι σ -άλγεβρα στο X που περιέχει όλα τα ανοικτά υποσύνολα του X τότε $\mathcal{B}|X \subseteq \mathcal{A}$.

Με άλλα λόγια η $\mathcal{B}|X$ είναι η *ελάχιστη σ -άλγεβρα στο X που περιέχει τα ανοικτά σύνολα*. Συμβολίζουμε με \mathcal{B} την **κλάση** όλων των Borel συνόλων σε *μετρικούς χώρους*.

Μερικά *παραδείγματα Borel συνόλων* είναι όλα τα ανοικτά σύνολα και τα συμπληρώματά τους δηλαδή τα κλειστά σύνολα. Τα F_σ σύνολα είναι επίσης Borel ως αριθμήσιμη ένωση Borel συνόλων και τα G_δ είναι ως συμπληρώματα F_σ συνόλων, τα οποία είναι Borel.

Πρόταση 4.1.3. Για κάθε Πολωνικό χώρο \mathcal{X} και κάθε $n \geq 1$ ισχύει

$$\Sigma_n^0|X \subseteq \mathcal{B}|X,$$

δηλαδή κάθε Σ_n^0 υποσύνολο του X είναι και Borel υποσύνολο του X .

Απόδειξη. Με επαγωγή στο $n \geq 1$. □

Ο ορισμός των Borel συνόλων μας υπαγορεύει μια **θεμελιώδη μέθοδο** για να αποδεικνύουμε ιδιότητες των Borel συνόλων. Συγκεκριμένα ως υποθέσουμε ότι θέλουμε να δείξουμε μια πρόταση της μορφής

για κάθε Borel σύνολο $B \subseteq \mathcal{X}$ ισχύει η ιδιότητα Q .

Τότε θεωρούμε την οικογένεια

$$\mathcal{A} = \{A \subseteq \mathcal{X} \mid \text{το } A \text{ έχει την ιδιότητα } Q\}.$$

Αν δείξουμε ότι το \mathcal{A} είναι σ -άλγεβρα που περιέχει τα ανοικτά υποσύνολα του \mathcal{X} τότε θα έχουμε $\mathcal{B}|\mathcal{X} \subseteq \mathcal{A}$ και επομένως θα έχουμε αποδείξει την πιο πάνω πρόταση. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής αυτής της μεθόδου είναι το επόμενο αποτέλεσμα.

Λήμμα 4.1.4. *Η κλάση των Borel συνόλων είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση.*

Απόδειξη. Θεωρούμε μετρικούς χώρους X, Y και μια συνεχή συνάρτηση $f : X \rightarrow Y$. Θα δείξουμε ότι για κάθε Borel $A \subseteq Y$ το σύνολο $f^{-1}[A]$ είναι Borel υποσύνολο του X . Θεωρούμε την οικογένεια

$$\mathcal{A} = \{A \subseteq Y \mid f^{-1}[A] \in \mathcal{B}|X\}$$

και δείχνουμε ότι είναι σ -άλγεβρα που περιέχει όλα τα ανοικτά υποσύνολα του Y . Εφόσον η $\mathcal{B}|X$ είναι η ελάχιστη σ -άλγεβρα που περιέχει τα ανοικτά υποσύνολα του Y , προκύπτει από το προηγούμενο ότι $\mathcal{B}|X \subseteq \mathcal{A}$ που είναι και το ζητούμενο.

Θεωρούμε ένα ανοικτό $V \subseteq Y$. Αφού η f είναι συνεχής συνάρτηση η αντίστροφη εικόνα $f^{-1}[V]$ είναι ανοικτό υποσύνολο του X και συνεπώς είναι Borel σύνολο. Άρα $V \in \mathcal{A}$ και η \mathcal{A} περιέχει όλα τα ανοικτά υποσύνολα του Y .

Στη συνέχεια παρατηρούμε ότι $\emptyset, Y \in \mathcal{A}$ γιατί τα σύνολα \emptyset, Y είναι ανοικτά. Αν $A \in \mathcal{A}$ τότε

$$f^{-1}[Y \setminus A] = X \setminus f^{-1}[A] \in \mathcal{B}|X$$

όπου πιο πάνω χρησιμοποιήσαμε ότι $f^{-1}[A] \in \mathcal{B}|X$ και ότι η οικογένεια των Borel υποσυνόλων του X είναι κλειστή ως προς τα συμπληρώματα στο X . \square

Θεώρημα 4.1.5 (Οι Θεμελιώδεις Ιδιότητες Κλειστότητας της κλάσης των Borel συνόλων). *Η κλάση \mathcal{B} των Borel συνόλων είναι κλειστή*

- (i) *ως προς συνεχή αντικατάσταση,*
- (ii) *ως προς τους τελεστές $\vee, \&, \exists^{\leq}, \forall^{\leq}, \bigvee_{\leq}, \bigwedge_{\leq}, c_X$, όπου X είναι μετρικός χώρος, και*
- (iii) *ως προς τους τελεστές $\bigvee_{\mathbb{N}}, \exists^{\mathbb{N}}, \exists^Y, \bigwedge_{\mathbb{N}}, \forall^{\mathbb{N}}, \forall^Y$, όπου Y είναι αριθμήσιμος Πολωνικός χώρος.*

Απόδειξη. Η κλειστότητα ως προς συνεχή αντικατάσταση είναι το Λήμμα 4.1.4. Η κλειστότητα ως προς \vee και \bigvee_{\leq} είναι άμεση από την κλειστότητα ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$. Ομοια η κλειστότητα ως προς $\&$ και \bigwedge_{\leq} είναι άμεση από την κλειστότητα ως προς $\bigwedge_{\mathbb{N}}$.

Οι κλειστότητες ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$ και c_X είναι σαφείς γιατί για κάθε μετρικό χώρο X η $\mathcal{B}|X$ είναι σ -άλγεβρα. Για την κλειστότητα ως προς $\bigwedge_{\mathbb{N}}$ θεωρούμε έναν μετρικό χώρο X και μια ακολουθία $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ Borel υποσυνόλων του X . Παρατηρούμε ότι

$$X \setminus \bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} X \setminus A_n \in \mathcal{B}|X$$

όπου πιο πάνω χρησιμοποιήσαμε ότι $A_n \in \mathcal{B}|X$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$ και ότι η $\mathcal{B}|X$ είναι σ -άλγεβρα. Αφού $X \setminus \bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{B}|X$ έχουμε και ότι $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{B}|X$.

Στη συνέχεια ισχυριζόμαστε ότι για κάθε μετρικό χώρο X και κάθε ακολουθία $(B_s)_{s \in \mathbb{N}}$ από Borel υποσύνολα του X το σύνολο $B \subseteq X \times \mathbb{N}$ με

$$(x, s) \in B \iff x \in B_s$$

είναι επίσης Borel. Η απόδειξη είναι ακριβώς η ίδια με αυτήν του Λήμματος 3.2.6, με τη \mathcal{B} στην θέση της Σ_n^0 . (Χρησιμοποιούμε ότι η κλάση όλων των Borel συνόλων περιέχει όλα τα ανοικτά σύνολα και είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση, & καθώς και $\bigvee_{\mathbb{N}}$.)

Αφού η \mathcal{B} είναι κλειστή ως προς τους τελεστές $\bigvee_{\mathbb{N}}$, \bigvee_{\leq} , $\bigwedge_{\mathbb{N}}$, και \bigwedge_{\leq} , προκύπτει από τα Πορίσματα 3.1.9 και 3.1.10 ότι η \mathcal{B} είναι επίσης κλειστή ως προς τους τελεστές $\exists^{\mathbb{N}}$, \exists^{\leq} , $\forall^{\mathbb{N}}$, και \forall^{\leq} .

Τέλος θεωρούμε έναν αριθμήσιμο Πολωνικό χώρο Y , μια απαρίθμηση $f : \mathbb{N} \rightarrow Y$ και ένα Borel $B \subseteq \mathcal{X} \times Y$, όπου \mathcal{X} Πολωνικός χώρος. Τότε για κάθε $x \in \mathcal{X}$,

$$\begin{aligned} x \in \exists^Y B &\iff \exists y \in Y (x, y) \in B \\ &\iff \exists n (x, f(n)) \in B \end{aligned}$$

και όμοια

$$x \in \forall^Y B \iff \forall n (x, f(n)) \in B.$$

Αφού η f είναι συνεχής και η \mathcal{B} είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση και τους τελεστές $\exists^{\mathbb{N}}$, $\forall^{\mathbb{N}}$, προκύπτει από τις προηγούμενες ισοδυναμίες ότι τα σύνολα $\exists^Y B, \forall^Y B$ ανήκουν στη $\mathcal{B}|_{\mathcal{X}}$. \square

Πόρισμα 4.1.6. Για κάθε Πολωνικό χώρο \mathcal{X} έχουμε

$$\mathcal{B}|_{\mathcal{X}} \subseteq \Delta_1^1|_{\mathcal{X}}.$$

Απόδειξη. Από το Θεώρημα 3.3.4 (και την απόδειξη της Πρότασης 3.3.3) η οικογένεια $\Delta_1^1|_{\mathcal{X}}$ είναι σ -άλγεβρα που περιέχει τα ανοικτά υποσύνολα του \mathcal{X} . \square

Πρόταση 4.1.7. Αν X είναι μετρικός χώρος και το Y είναι ένα μη κενό υποσύνολο του X τότε ένα $A \subseteq Y$ είναι Borel στον μετρικό χώρο Y αν και μόνο αν είναι της μορφής $B \cap Y$ όπου το B είναι Borel στον X . Δηλαδή

$$\mathcal{B}|_Y = \{B \cap Y \mid B \in \mathcal{B}|_X\}.$$

Ειδικότερα αν το Y είναι Borel υποσύνολο του X και το $A \subseteq Y$ είναι Borel στον Y τότε το A είναι Borel στον X .

Απόδειξη. Για ευκολία θέτουμε προσωρινά

$$\mathcal{B}^*|_Y = \{B \cap Y \mid B \in \mathcal{B}|_X\}.$$

Δείχνουμε αρχικά ότι $\mathcal{B}|_Y \subseteq \mathcal{B}^*|_Y$. Αρκεί να δείξουμε ότι η οικογένεια $\mathcal{B}^*|_Y$ είναι σ -άλγεβρα στο Y που περιέχει τα ανοικτά υποσύνολα του Y .

Έστω $V \subseteq Y$ ανοικτό στο Y . Τότε όπως είναι γνωστό υπάρχει $U \subseteq X$ που είναι ανοικτό στο X ώστε $V = U \cap Y$. Τότε $U \in \mathcal{B}|_X$ και άρα $V \in \mathcal{B}^*|_Y$, δηλαδή η τελευταία οικογένεια περιέχει τα ανοικτά υποσύνολα του Y .

Ειδικότερα έχουμε $\emptyset, Y \in \mathcal{B}^*|_Y$ γιατί τα σύνολα \emptyset, Y είναι ανοικτά. Για τις άλλες δύο ιδιότητες παρατηρούμε ότι

$$(4.1) \quad Y \setminus (B \cap Y) = (X \setminus B) \cap Y$$

$$(4.2) \quad \bigcup_{n \in \mathbb{N}} (B_n \cap Y) = \left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} B_n \right) \cap Y.$$

Επομένως αν $A = B \cap Y \in \mathcal{B}^*|_Y$, όπου $B \in \mathcal{B}|_X$, τότε $X \setminus B \in \mathcal{B}|_X$ και με χρήση της (4.1)

$$Y \setminus A = Y \setminus (B \cap Y) = (X \setminus B) \cap Y \in \mathcal{B}|_Y.$$

Με χρήση της (4.2) δείχνει όμοια κανείς ότι η $\mathcal{B}^*|_Y$ είναι κλειστή ως προς τις αριθμήσιμες ενώσεις υποσυνόλων του Y . Προκύπτει ότι η $\mathcal{B}^*|_Y$ είναι σ -άλγεβρα στο Y που περιέχει όλα τα ανοικτά υποσύνολα του Y .

Για να δείξουμε τον εγκλεισμό $\mathcal{B}^*|Y \subseteq \mathcal{B}|Y$ θεωρούμε την οικογένεια υποσυνόλων του \mathcal{X} ,

$$\mathcal{A} = \{B \subseteq X \mid B \cap Y \in \mathcal{B}|Y\}.$$

Αν δείξουμε ότι η \mathcal{A} είναι σ -άλγεβρα στο X που περιέχει τα ανοικτά υποσύνολα του X τότε θα έχουμε $\mathcal{B}|X \subseteq \mathcal{A}$ και συνεπώς για κάθε $B \in \mathcal{B}|X$ θα ισχύει $B \cap Y \in \mathcal{B}|Y$, δηλαδή $\mathcal{B}^*|Y \subseteq \mathcal{B}|Y$.

Για να δείξουμε ότι η πιο πάνω \mathcal{A} περιέχει τα ανοικτά σύνολα, θεωρούμε $V \subseteq X$ ανοικτό. Τότε το $V \cap Y$ είναι ανοικτό στο Y και ειδικότερα $V \cap Y \in \mathcal{B}|Y$. Προκύπτει ότι $V \in \mathcal{A}$.

Όπως προηγουμένως προκύπτει επίσης ότι $\emptyset, X \in \mathcal{A}$. Αν $B \in \mathcal{A}$ τότε από την (4.1),

$$(X \setminus B) \cap Y = Y \setminus (B \cap Y) \in \mathcal{B}|Y,$$

όπου πιο πάνω χρησιμοποιήσαμε ότι $B \cap Y \in \mathcal{B}|Y$. Προκύπτει ότι $X \setminus B \in \mathcal{A}$.

Όμοια με χρήση της (4.2) δείχνει κανείς ότι η \mathcal{A} είναι κλειστή ως προς τις αριθμησιμες ενώσεις υποσυνόλων του X .

Καταλήγουμε ότι $\mathcal{B}|Y = \{B \cap Y \mid B \in \mathcal{B}|X\}$. Τέλος αν το Y είναι Borel υποσύνολο του X και το A είναι Borel υποσύνολο του Y τότε $A = B \cap Y$ για κάποιο $B \in \mathcal{B}|X$. Άρα το A είναι Borel υποσύνολο του X από την κλειστότητα της $\mathcal{B}|X$ ως προς $\&$. \square

4.2. Borel-μετρησιμότητα

Ορισμός 4.2.1. Θεωρούμε μετρικούς χώρους X και Y . Μια συνάρτηση $f : X \rightarrow Y$ είναι **Borel-μετρήσιμη** αν αντιστρέφει τα ανοικτά υποσύνολα του Y σε Borel υποσύνολα του X , δηλαδή για κάθε ανοικτό $U \subseteq Y$ έχουμε $f^{-1}[U] \in \mathcal{B}|X$.

Προφανώς κάθε συνεχής συνάρτηση $f : X \rightarrow Y$ είναι Borel-μετρήσιμη γιατί για κάθε ανοικτό $U \subseteq Y$ το σύνολο $f^{-1}[U]$ είναι ανοικτό και συνεπώς Borel.

Ένας ισομορφισμός $f : X \rightarrow Y$ είναι **Borel ισομορφισμός** αν οι συναρτήσεις $f : X \rightarrow Y$ και $f^{-1} : Y \rightarrow X$ είναι Borel-μετρήσιμες.

Οι μετρικοί χώροι X και Y είναι **Borel ισομορφικοί** αν υπάρχει Borel ισομορφισμός $f : X \rightarrow Y$.

Οι Borel-μετρήσιμες συναρτήσεις χαρακτηρίζονται ως εξής.

Πρόταση 4.2.2. Θεωρούμε μετρικούς χώρους X, Y και μια συνάρτηση $f : X \rightarrow Y$. Τα εξής είναι ισοδύναμα.

- (1) Η f αντιστρέφει τα ανοικτά υποσύνολα του Y σε Borel υποσύνολα του X , δηλαδή η f είναι Borel-μετρήσιμη.
- (2) Η f αντιστρέφει τα Borel υποσύνολα του Y σε Borel υποσύνολα του X , δηλαδή για κάθε Borel σύνολο $B \subseteq Y$ το σύνολο $f^{-1}[B]$. (Μερικές φορές ο ορισμός των Borel-μετρησίμων συναρτήσεων δίνεται με αυτή τη συνθήκη.)

Απόδειξη. Εργασία. \square

Ορισμός 4.2.3. Θεωρούμε δύο Πολωνικούς χώρους \mathcal{X}, \mathcal{Y} και έναν μονομορφισμό $f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$. Η f λέγεται **καλός Borel μονομορφισμός** αν

- (i) είναι Borel-μετρήσιμη,
- (ii) η εικόνα $f[\mathcal{X}]$ είναι Borel υποσύνολο του \mathcal{Y} , και
- (iii) η αντίστροφη συνάρτηση $f^{-1} : f[\mathcal{X}] \rightarrow \mathcal{X}$ είναι Borel μετρήσιμη. (Θεωρούμε το $f[\mathcal{X}]$ ως μετρικό υπόχωρο του \mathcal{Y} .)

Σχόλιο. Είναι γνωστό ότι κάθε ένα-προς-ένα Borel-μετρήσιμη συνάρτηση ικανοποιεί όλες τις πιο πάνω ιδιότητες, δηλαδή είναι καλός Borel-μονομορφισμός. Αυτό όμως είναι συνήθεια ενός δύσκολου θεωρήματος, το οποίο δεν παίρνουμε δεδομένο στο παρόν στάδιο.

Παρατήρηση 4.2.4. Για κάθε καλό Borel-μοινομορφισμό $f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$ και κάθε Borel σύνολο $B \subseteq \mathcal{X}$ το σύνολο $f[B]$ είναι Borel υποσύνολο του \mathcal{Y} .

Απόδειξη. Έχουμε

$$f[B] = g^{-1}[B] \quad \text{όπου } g = f^{-1} : f[\mathcal{X}] \rightarrow \mathcal{X}.$$

Επειδή η g είναι Borel-μετρήσιμη από την Πρόταση 4.2.2 το σύνολο $g^{-1}[B] = f[B]$ είναι Borel υποσύνολο του χώρου $f[\mathcal{X}]$. Επειδή η f είναι καλός Borel-μοινομορφισμός το $f[\mathcal{X}]$ είναι Borel υποσύνολο του \mathcal{Y} και από την Πρόταση 4.1.7 το $f[B]$ είναι Borel υποσύνολο του \mathcal{Y} . \square

Παρατήρηση 4.2.5. Η σύνθεση καλών Borel-μοινομορφισμών είναι Borel μοινομορφισμός.

Απόδειξη. Θεωρούμε καλούς Borel μοινομορφισμούς $f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$ και $g : \mathcal{Y} \rightarrow \mathcal{Z}$. Οι συναρτήσεις $g \circ f$ και $(g \circ f)^{-1} = f^{-1} \circ g^{-1}$ είναι Borel-μετρήσιμες από την Άσκηση 4.2.16.

Αφού το \mathcal{X} είναι προφανώς Borel υποσύνολο του \mathcal{X} και η f είναι καλός Borel μοινομορφισμός έχουμε ότι το σύνολο $f[\mathcal{X}]$ είναι Borel υποσύνολο του \mathcal{Y} . Εφόσον η g είναι επίσης καλός Borel μοινομορφισμός προκύπτει από την Παρατήρηση ότι η εικόνα

$$(g \circ f)[\mathcal{X}] = g[f[\mathcal{X}]]$$

είναι Borel υποσύνολο του \mathcal{Z} . \square

Λήμμα 4.2.6. Για κάθε υπεραριθμήσιμο Πολωνικό χώρο \mathcal{X} υπάρχει ένας καλός Borel μοινομορφισμός $\tau : 2^{\mathbb{N}} \rightarrow \mathcal{X}$.

Απόδειξη. Γνωρίζουμε από τη θεωρία ότι υπάρχει ένας συνεχής μοινομορφισμός $\tau : 2^{\mathbb{N}} \rightarrow \mathcal{X}$. Δείχνουμε ότι η τ είναι επίσης καλός Borel-μοινομορφισμός. Επειδή η τ είναι συνεχής είναι και Borel-μετρήσιμη. Επιπλέον το σύνολο $\tau[2^{\mathbb{N}}]$ είναι συμπαγές (ως συνεχής εικόνα συμπαγούς) και άρα είναι κλειστό υποσύνολο του \mathcal{X} . Ειδικότερα το $\tau[2^{\mathbb{N}}]$ είναι Borel υποσύνολο του \mathcal{X} . Τέλος η αντίστροφη συνάρτηση $\tau^{-1} : \tau[2^{\mathbb{N}}] \rightarrow 2^{\mathbb{N}}$ είναι συνεχής και άρα Borel-μετρήσιμη. (Θεωρούμε γνωστό ότι αν ο X είναι συμπαγής μετρικός χώρος και η $f : X \rightarrow Y$ είναι συνεχής και ένα-προς-ένα τότε η αντίστροφη συνάρτηση $f^{-1} : f[X] \rightarrow X$ είναι συνεχής.) \square

Λήμμα 4.2.7. Υπάρχει συνεχής μοινομορφισμός $\rho : \mathcal{N} \rightarrow 2^{\mathbb{N}}$ για την οποία η συνάρτηση $f^{-1} : f[\mathcal{N}] \rightarrow 2^{\mathbb{N}}$ να είναι συνεχής και το σύνολο $f[\mathcal{N}]$ είναι $\underline{\Pi}_2^0$ υποσύνολο του $2^{\mathbb{N}}$.

Απόδειξη. Εργασία. \square

Λήμμα 4.2.8. Για κάθε υπεραριθμήσιμο Πολωνικό χώρο \mathcal{X} υπάρχει ένας καλός Borel μοινομορφισμός $f : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{X}$.

Απόδειξη. Θεωρούμε τη συνάρτηση $\rho : \mathcal{N} \rightarrow 2^{\mathbb{N}}$ όπως στο 4.2.7. Επειδή κάθε συνεχής συνάρτηση είναι Borel-μετρήσιμη και τα $\underline{\Pi}_2^0$ σύνολα είναι Borel προκύπτει ότι η ρ είναι καλός Borel μοινομορφισμός.

Από το Λήμμα 4.2.7 υπάρχει καλός Borel μοινομορφισμός $\tau : 2^{\mathbb{N}} \rightarrow \mathcal{X}$ και από την Παρατήρηση 4.2.5 η σύνθεση

$$f = \tau \circ \rho : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{X}$$

είναι καλός Borel μοινομορφισμός. \square

Λήμμα 4.2.9. Για κάθε Πολωνικό χώρο \mathcal{X} υπάρχει ένας καλός Borel μοινομορφισμός $\tau : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{N}$.

Απόδειξη. Θεωρούμε μια κατάλληλη μετρική d στον \mathcal{X} και ένα αριθμήσιμο $D = \{r_n \mid n \in \mathbb{N}\}$ και πυκνό υποσύνολο του \mathcal{X} . Θεωρούμε τη συνάρτηση

$$u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}} \setminus \{\Lambda\} \mapsto x_u \in \mathcal{X}$$

που ορίζεται ως εξής:

$$x_{(k)} = r_k \quad \text{και} \quad x_{u*(k)} = \begin{cases} r_k, & \text{αν } d(r_k, x_u) < 2^{-(|u|+1)} \\ x_u, & \text{αν } d(r_k, x_u) \geq 2^{-(|u|+1)} \end{cases}$$

Όπως έχουμε δει στην απόδειξη του Θεωρήματος 2.3.5 καθώς και στην επακόλουθη Παρατήρηση 2.3.6 η συνάρτηση

$$\pi : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{X} : \pi(\alpha) = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{\alpha|n}$$

είναι συνεχής επιμορφισμός και η συνάρτηση

$$\tau : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{N} : \tau(x)(n) = \text{ο ελάχιστος } k \text{ με } d(r_k, x) < 2^{-(n+2)}$$

είναι μονομορφισμός που ικανοποιεί

$$\pi(\tau(x)) = x, \quad x \in \mathcal{X} \quad \text{και} \quad \tau(\pi(\alpha)) = \alpha, \quad \alpha \in \tau[\mathcal{X}].$$

Δείχνουμε ότι η τ είναι καλός Borel μονομορφισμός. Αρχικά θεωρούμε την

$$\tau^{-1} : \tau[\mathcal{X}] \rightarrow \mathcal{X}$$

και παρατηρούμε ότι για κάθε $\alpha = \tau(x) \in \tau[\mathcal{X}]$ ισχύει $\tau^{-1}(\alpha) = x = \pi(\alpha)$, δηλαδή $\tau^{-1} = \pi|_{\tau[\mathcal{X}]}$. Αφού η π είναι συνεχής έπεται ότι και η τ^{-1} είναι συνεχής.

Στη συνέχεια δείχνουμε ότι η τ αντιστρέφει τα ανοικτά σύνολα του \mathcal{N} σε Σ_2^0 . Αφού τα Σ_2^0 σύνολα είναι Borel προκύπτει από αυτό ότι η τ είναι Borel-μετρήσιμη. Για κάθε $u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ έχουμε

$$\begin{aligned} \tau(x) \in \mathcal{N}_u &\iff u \sqsubseteq \tau(x) \\ &\iff \forall n < |u| \quad u(n) = \tau(x)(n) \\ &\iff \forall n < |u| \quad u(n) = \text{ο ελάχιστος } k \text{ με } d(r_k, x) < 2^{-(n+2)} \\ &\iff \forall n < |u| \quad (d(r_{u(n)}, x) < 2^{-(n+2)} \ \& \ \forall t < u(n) \quad d(r_t, x) \geq 2^{-(n+2)}). \end{aligned}$$

Προκύπτει ότι το σύνολο $\tau^{-1}[\mathcal{N}_u]$ είναι Δ_2^0 επομένως και Σ_2^0 υποσύνολο του \mathcal{X} . Επειδή κάθε ανοικτό υποσύνολο του \mathcal{N} είναι ένωση συνόλων της μορφής \mathcal{N}_u για κάποια $u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$, έχουμε από την κλειστότητα της Σ_2^0 ως προς τον τελεστή της αριθμήσιμης ένωσης ότι η τ αντιστρέφει ανοικτά σύνολα σε Σ_2^0 .

Τέλος αναγνωρίζουμε το σύνολο $\tau[\mathcal{X}]$. Όπως είδαμε πιο πάνω, το $\pi(\alpha)$ είναι το μοναδικό $x \in \mathcal{X}$ με $\alpha = \tau(x)$ για κάθε $\alpha \in \tau[\mathcal{X}]$. Συνεπώς

$$\begin{aligned} \alpha \in \tau[\mathcal{X}] &\iff \alpha = \tau(\pi(\alpha)) \\ &\iff \forall n \quad \alpha(n) = \tau(\pi(\alpha))(n) \\ &\iff \forall n \quad \alpha(n) = \text{ο ελάχιστος } k \text{ με } d(r_k, \pi(\alpha)) < 2^{-(n+2)} \\ &\iff \forall n \quad (d(\pi(\alpha), r_{\alpha(n)}) < 2^{-(n+2)} \ \& \ \forall t < \alpha(n) \quad d(\pi(\alpha), r_t) \geq 2^{-(n+2)}). \end{aligned}$$

Το πιο πάνω δείχνει ότι το $\tau[\mathcal{X}]$ είναι Π_2^0 υποσύνολο του \mathcal{N} . □

Θεώρημα 4.2.10 (Schröder-Bernstein για καλούς Borel μονομορφισμούς). *Για κάθε δύο Πολωνικούς χώρους \mathcal{X} και \mathcal{Y} αν υπάρχουν καλοί Borel μονομορφισμοί*

$$f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y} \quad g : \mathcal{Y} \rightarrow \mathcal{X}$$

τότε υπάρχει Borel ισομορφισμός $h : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$.

Απόδειξη. (Α. Τσαρπαλιάς) Εργασία. □

Θεώρημα 4.2.11. Κάθε υπεραριθμήσιμος Πολωνικός χώρος είναι Borel-ισομορφικός με τον χώρο του Baire.

Απόδειξη. Θεωρούμε ένα υπεραριθμήσιμο Πολωνικό χώρο \mathcal{X} . Από τα Λήμματα 4.2.9 και 4.2.9 υπάρχουν καλοί Borel μονομορφισμοί $f : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{X}$ και $\tau : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{N}$. Επομένως από το Θεώρημα 4.2.10 υπάρχει Borel ισομορφισμός $h : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{X}$. \square

Πόρισμα 4.2.12. Κάθε δύο υπεραριθμήσιμοι Πολωνικοί χώροι είναι Borel ισομορφικοί.

Απόδειξη. Αν \mathcal{X}, \mathcal{Y} είναι υπεραριθμήσιμοι Πολωνικοί χώροι τότε από το Θεώρημα 4.2.11 υπάρχουν Borel ισομορφισμοί

$$f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{N} \quad \text{και} \quad g : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{Y}.$$

Είναι άμεσο από την Άσκηση 4.2.16 ότι η σύνθεση $g \circ f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$ είναι Borel ισομορφισμός. \square

Άσκησης

Η έννοια της σ -άλγεβρας επιδέχεται διάφορους χαρακτηρισμούς. Δίνουμε έναν από τους πιο χρήσιμους.

Άσκηση 4.2.13. Για κάθε μετρικό χώρο X και κάθε οικογένεια \mathcal{A} υποσυνόλων του X τα ακόλουθα είναι ισοδύναμα.

- (1) Η \mathcal{A} είναι σ -άλγεβρα.
- (2) Η \mathcal{A} περιέχει τα σύνολα \emptyset, X , είναι κλειστή ως προς το συμπλήρωμα και ως προς τις αριθμήσιμες τομές.

Άσκηση 4.2.14 (Χαρακτηρισμοί οικογένειας Borel συνόλων). Για κάθε μετρικό χώρο X και κάθε οικογένεια \mathcal{A} από υποσύνολα του X τα ακόλουθα είναι ισοδύναμα.

- (1) Η \mathcal{A} είναι η οικογένεια των Borel υποσυνόλων του X .
- (2) Η \mathcal{A} είναι η ελάχιστη σ -άλγεβρα στο X που περιέχει τα κλειστά υποσύνολα του X .
- (3) Η \mathcal{A} είναι η ελάχιστη οικογένεια από υποσύνολα του X που περιέχει τα ανοικτά υποσύνολα του X και είναι κλειστή ως προς τις αριθμήσιμες ενώσεις καθώς και τις αριθμήσιμες τομές.
- (4) Η \mathcal{A} είναι η ελάχιστη οικογένεια από υποσύνολα του X που περιέχει τα κλειστά υποσύνολα του X και είναι κλειστή ως προς τις αριθμήσιμες ενώσεις καθώς και τις αριθμήσιμες τομές.

Άσκηση 4.2.15. Θεωρούμε μετρικούς χώρους X, Y , Borel-μετρήσιμες συναρτήσεις $f_1, f_2 : X \rightarrow Y$ και ένα Borel σύνολο $B \subseteq X$. Τότε η συνάρτηση $f : X \rightarrow Y$ με

$$\begin{cases} f_1(x), & x \in B, \\ f_2(x), & x \notin B, \end{cases}$$

είναι Borel-μετρήσιμη.

Άσκηση 4.2.16. Η σύνθεση Borel-μετρήσιμων συναρτήσεων είναι Borel-μετρήσιμη συνάρτηση. Ειδικότερα η σύνθεση μιας Borel-μετρήσιμης συνάρτησης με μία συνεχή είναι Borel-μετρήσιμη συνάρτηση.

Άσκηση 4.2.17. Για κάθε ακολουθία $((X_n, d_n))_{n \in \mathbb{N}}$ από μετρικούς χώρους και κάθε ακολουθία $(B_n)_{n \in \mathbb{N}}$ με $B_n \in \mathcal{B}|X_n$, το γινόμενο $\prod_{n \in \mathbb{N}} B_n$ είναι Borel υποσύνολο του $\prod_{n \in \mathbb{N}} X_n$.

Όμοια για κάθε $n \in \mathbb{N}$ και κάθε B_0, \dots, B_n με $B_i \in \mathcal{B}|X_i$ για $i = 0, \dots, n$ το γινόμενο $B_0 \times \dots \times B_n$ είναι Borel υποσύνολο του $X_0 \times \dots \times X_n$.

Άσκηση 4.2.18. Θεωρούμε μετρικούς χώρους (X, d) , (Y_n, ρ_n) , $n \in \mathbb{N}$. Τότε για κάθε συνάρτηση

$$f : X \rightarrow \prod_{n \in \mathbb{N}} Y_n : f(x) = (f_n(x))_{n \in \mathbb{N}}$$

η f είναι Borel-μετρήσιμη αν και μόνο αν κάθε συνάρτηση f_n είναι Borel-μετρήσιμη.

Όμοια για κάθε $n \in \mathbb{N}$ και κάθε συνάρτηση

$$f : X \rightarrow Y_0 \times \cdots \times Y_n : f(x) = (f_0(x), \dots, f_n(x))$$

η f είναι Borel-μετρήσιμη αν και μόνο αν οι f_0, \dots, f_n είναι Borel-μετρήσιμες.

Άσκηση 4.2.19. Για κάθε μετρικό χώρο X και κάθε Borel-μετρήσιμες συναρτήσεις $f, g : X \rightarrow \mathbb{R}$, οι συναρτήσεις

$$f + g, f \cdot g, |f|, \lambda \cdot f, (\lambda \in \mathbb{R}), \max\{f + g\}, \min\{f + g\},$$

είναι Borel-μετρήσιμες.

4.3. Ο χώρος Effros-Borel

4.4. Οι κλάσεις Borel συνόλων υπεπεπερασμένης τάξης

Ασκήσεις

Αναλυτικά σύνολα

5.1. Ιδιότητες και χαρακτηρισμοί

Υπειθυμίζουμε ότι ένα σύνολο $P \subseteq \mathcal{X}$ είναι **αναλυτικό (analytic)** αν είναι Σ_1^1 δηλαδή υπάρχει ένα κλειστό σύνολο $F \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{N}$ έτσι ώστε για κάθε $x \in \mathcal{X}$,

$$x \in P \iff \exists \alpha (x, \alpha) \in F.$$

Πρόταση 5.1.1 (Θεμελιώδεις ιδιότητες της κλάσης των αναλυτικών συνόλων). *Η κλάση Σ_1^1 των αναλυτικών συνόλων περιέχει τα Borel σύνολα και είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση, τον τελεστή της προβολής $\exists^{\mathcal{Y}}$, τις συνεχείς εικόνες, τους τελεστές $\exists^{\mathbb{N}}$, $\forall^{\mathbb{N}}$, \vee , $\&$, όπως επίσης τον τελεστή της αριθμήσιμης διάζευξης $\bigvee_{\mathbb{N}}$ και τον τελεστή της αριθμήσιμης σύζευξης $\bigwedge_{\mathbb{N}}$.*

Απόδειξη. Οι ιδιότητες κλειστότητας είναι άμεσες από το Θεώρημα 3.3.4 και την Άσκηση 3.3.8 (κλειστότητα ως προς συνεχείς εικόνες).

Για να δείξουμε ότι κάθε Borel σύνολο είναι αναλυτικό θεωρούμε έναν Πολωνικό χώρο \mathcal{X} και την οικογένεια συνόλων

$$\mathcal{A} = \{B \subseteq \mathcal{X} \mid \text{τα σύνολα } B \text{ και } \mathcal{X} \setminus B \text{ είναι αναλυτικά}\}.$$

Δείχνουμε ότι η \mathcal{A} είναι σ -άλγεβρα που περιέχει τα ανοικτά υποσύνολα του \mathcal{X} . Από αυτό προκύπτει ότι κάθε Borel σύνολο περιέχεται στην \mathcal{A} και ειδικότερα κάθε Borel σύνολο είναι αναλυτικό.

Προφανώς η \mathcal{A} είναι κλειστή ως προς τον τελεστή του συμπληρώματος μέσα στον \mathcal{X} . Αν $B_n \in \mathcal{A}$, $n \in \mathbb{N}$, τότε τα σύνολα B_n είναι αναλυτικά και λόγω της κλειστότητας ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$ το σύνολο είναι $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} B_n$ είναι αναλυτικό. Επιπλέον

$$\mathcal{X} \setminus \bigcup_{n \in \mathbb{N}} B_n = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} (\mathcal{X} \setminus B_n) \in \mathcal{A}$$

επειδή $B_n \in \mathcal{A}$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$ και λόγω της κλειστότητας της κλάσης των αναλυτικών συνόλων ως προς $\bigwedge_{\mathbb{N}}$.

Ο ισχυρισμός ότι η \mathcal{A} περιέχει όλα τα ανοικτά υποσύνολα του \mathcal{X} είναι άμεσος από την Άσκηση 3.3.7, παραθέτουμε όμως το επιχείρημα χάριν πληρότητας της απόδειξης. Θεωρούμε αρχικά ένα κλειστό $C \subseteq \mathcal{X}$. Το σύνολο $F = C \times \{\mathbf{0}\}$, όπου $\mathbf{0}$ είναι η σταθερή ακολουθία $(0, 0, \dots, 0, \dots) \in \mathcal{N}$, είναι κλειστό υποσύνολο του $\mathcal{X} \times \mathcal{N}$ και προφανώς

$$x \in C \iff \exists \alpha (x, \alpha) \in F$$

για κάθε $x \in \mathcal{X}$. Συνεπώς το $C = \exists^{\mathcal{N}} F$ είναι αναλυτικό υποσύνολο του \mathcal{X} .

Κάθε ανοικτό $V \subseteq \mathcal{X}$ είναι αριθμήσιμη ένωση κλειστών υποσυνόλων του \mathcal{X} , και από τα πιο πάνω το V είναι αριθμήσιμη ένωση αναλυτικών συνόλων, επομένως αναλυτικό σύνολο.

Δείξαμε λοιπόν ότι κάθε ανοικτό και κάθε κλειστό υποσύνολο του \mathcal{X} είναι αναλυτικό, ισοδύναμα η \mathcal{A} περιέχει όλα τα ανοικτά υποσύνολα του \mathcal{X} . \square

Όπως θα δούμε στη συνέχεια (Θεώρημα του Suslin 5.2.3) η σ -άλγεβρα \mathcal{A} της πιο πάνω απόδειξης αποτελείται ακριβώς από τα Borel σύνολα, με άλλα λόγια τα Borel υποσύνολα του \mathcal{X} είναι ακριβώς τα αναλυτικά σύνολα με αναλυτικό συμπλήρωμα.

Προχωράμε στους βασικότερους χαρακτηρισμούς της κλάσης των αναλυτικών συνόλων.

Πρόταση 5.1.2. Έστω \mathcal{X} ένας Πολωνικός χώρος και $P \subseteq \mathcal{X}$. Τα ακόλουθα είναι ισοδύναμα:

- (i) Το P είναι αναλυτικό.
- (ii) Υπάρχει Πολωνικός χώρος \mathcal{Y} και $F \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{Y}$ κλειστό με $P = \exists^{\mathcal{Y}} F$.
- (iii) Υπάρχει Πολωνικός χώρος \mathcal{Y} και $B \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{Y}$ Borel με $P = \exists^{\mathcal{Y}} B$.

Απόδειξη. Οι συνεπαγωγές (i) \implies (ii) \implies (iii) είναι άμεσες θεωρώντας $\mathcal{Y} = \mathcal{N}$ και $B = F$. Η συνεπαγωγή (iii) \implies (i) είναι επίσης άμεση επειδή κάθε Borel σύνολο είναι αναλυτικό (Πρόταση 5.1.1) και η κλάση των αναλυτικών συνόλων είναι κλειστή ως προς τον τελεστή $\exists^{\mathcal{Y}}$ για κάθε Πολωνικό χώρο \mathcal{Y} . \square

Πρόταση 5.1.3 ([Mos09], [Kec95]). Έστω \mathcal{X} ένας Πολωνικός χώρος και $P \subseteq \mathcal{X}$. Τα ακόλουθα είναι ισοδύναμα:

- (i) Το P είναι αναλυτικό.
- (ii) Υπάρχει συνεχής συνάρτηση $f : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{X}$ με $P = f[\mathcal{N}]$.
- (iii) Υπάρχει συνεχής συνάρτηση $g : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{X}$ και Borel $B \subseteq \mathcal{N}$ με $P = g[B]$.
- (iv) Υπάρχει Borel-μετρήσιμη συνάρτηση $h : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{X}$ και Borel $B \subseteq \mathcal{N}$ με $P = h[B]$.

Απόδειξη. (i) \implies (ii). Υποθέτουμε ότι $P = \exists^{\mathcal{N}} F$ όπου $F \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{N}$ κλειστό. Το F με τον περιορισμό της τοπολογίας του $\mathcal{X} \times \mathcal{N}$ είναι Πολωνικός χώρος και επομένως από το Θεώρημα 2.3.5 υπάρχει συνεχής επιμορφισμός $\pi : \mathcal{N} \rightarrow F$. Τότε για κάθε $x \in \mathcal{X}$,

$$\begin{aligned} x \in P &\iff \exists \alpha (x, \alpha) \in F \\ &\iff \exists \beta (\pi(\beta) \in F \ \& \ (\text{pr}_1 \circ \pi)(\beta) = x) \\ &\iff \exists \beta (\text{pr}_1 \circ \pi)(\beta) = x. \end{aligned}$$

όπου στις πιο πάνω ισοδυναμίες χρησιμοποιήσαμε ότι η π είναι επί και ότι παίρνει τιμές στο σύνολο F . Με $\text{pr}_1 \equiv \text{pr}_1^{\mathcal{X}, \mathcal{N}} : \mathcal{X} \times \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{X}$ εννοούμε τη συνάρτηση προβολής στην πρώτη συντεταγμένη. Παίρνουμε τη συνάρτηση $f = \text{pr}_1 \circ \pi : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{X}$. Η f είναι συνεχής και είναι σαφές από τις πιο πάνω ισοδυναμίες ότι $P = f[\mathcal{N}]$.

Οι συνεπαγωγές (ii) \implies (iii) \implies (iv) είναι σαφείς παίρνοντας $h = g = f$ και $B = \mathcal{N}$.

(iv) \implies (i). Υποθέτουμε ότι $P = h[B]$, όπου η $h : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{X}$ είναι Borel-μετρήσιμη και $B \subseteq \mathcal{N}$ είναι Borel σύνολο. Θεωρούμε μια αριθμήσιμη βάση $(N_s)_{s \in \mathbb{N}}$ του \mathcal{X} . Τότε για κάθε $x \in \mathcal{X}$,

$$\begin{aligned} x \in P &\iff \exists \beta (\beta \in B \ \& \ x = h(\beta)) \\ &\iff \exists \beta (\beta \in B \ \& \ \forall s (x \in N_s \implies h(\beta) \in N_s)) \\ &\iff \exists \beta (\beta \in B \ \& \ \forall s (x \notin N_s \vee h(\beta) \in N_s)). \end{aligned}$$

Από την Πρόταση 5.1.1 το δεξιό σκέλος της τελευταίας ισοδυναμίας ορίζει ένα αναλυτικό υποσύνολο του \mathcal{X} (Άσκηση 5.1.6). \square

Πρόταση 5.1.4. Το σύνολο IF των μη θεμελιωμένων δένδρων είναι αναλυτικό υποσύνολο του Tr .

Απόδειξη. Για κάθε $T \in \text{Tr}$ έχουμε

$$\begin{aligned} T \in \text{IF} &\iff \exists \alpha \alpha \in [T] \\ &\iff \exists \alpha \forall t \alpha \upharpoonright t \in T. \end{aligned}$$

Το σύνολο $F = \{(T, \alpha) \in \text{Tr} \times \mathcal{N} \mid \forall t \alpha|t \in T\}$ είναι κλειστό υποσύνολο του $\text{Tr} \times \mathcal{N}$ και από τις πιο πάνω ισοδυναμίες $\text{IF} = \exists^{\mathcal{N}} F$. \square

Το IF θεωρείται το “πιο πρωτογενές” αναλυτικό σύνολο κυρίως λόγω του επόμενου αποτελέσματος.

Θεώρημα 5.1.5 (Το Βασικό Θεώρημα Αναπαράστασης των Αναλυτικών Συνόλων, *Lusin-Sierpinski*, [LS23]). *Για κάθε αναλυτικό υποσύνολο P ενός Πολωνικού χώρου \mathcal{X} υπάρχει μια Σ_2^0 -μετρήσιμη συνάρτηση $f : \mathcal{X} \rightarrow \text{Tr}$ με την ιδιότητα*

$$x \in P \iff f(x) \in \text{IF}$$

όπου $x \in \mathcal{X}$.

Μάλιστα αν ο \mathcal{X} είναι μηδενοδιάστατος τότε η f μπορεί να επιλεγεί ώστε να είναι συνεχής συνάρτηση και άρα το IF είναι Σ_1^1 -πλήρες αναλυτικό σύνολο.

Απόδειξη. Θεωρούμε ένα κλειστό σύνολο F με $P = \exists^{\mathcal{N}} F$. Από το Βασικό Λήμμα Αναπαράστασης Κλειστών Συνόλων 2.5.13 υπάρχει ένα κλειστό σύνολο $T \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ με

$$(x, \alpha) \in F \iff \alpha \in [T(x)]$$

για κάθε x, α , όπου το σύνολο $T(x) = \{u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}} \mid (x, u) \in T\}$ είναι δένδρο. Ορίζουμε

$$f : \mathcal{X} \rightarrow \text{Tr} : f(x) = T(x).$$

Από την Άσκηση 2.5.22 η f είναι Σ_2^0 -μετρήσιμη και αν ο \mathcal{X} είναι μηδενοδιάστατος η f είναι συνεχής. Τέλος για κάθε $x \in \mathcal{X}$ έχουμε,

$$\begin{aligned} x \in P &\iff \exists \alpha (x, \alpha) \in F \\ &\iff \exists \alpha (\alpha \in [T(x)]) \\ &\iff f(x) = T(x) \in \text{IF}. \end{aligned}$$

Αυτό ολοκληρώνει την απόδειξη. \square

Ασκήσεις

Άσκηση 5.1.6. Θεωρούμε έναν Πολωνικό χώρο \mathcal{X} , $h : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{X}$ μια Borel-μετρήσιμη συνάρτηση, και B Borel υποσύνολο του \mathcal{N} . Εξηγήστε γιατί το σύνολο $P \subseteq \mathcal{X}$ με

$$x \in P \iff \exists \beta (\beta \in B \ \& \ \forall s (x \notin N_s \vee h(\beta) \in N_s))$$

είναι αναλυτικό σύνολο.

5.2. Τα Θεωρήματα Διαχωρισμού των Lusin και Suslin

Ορισμός 5.2.1. Θεωρούμε σύνολα $A, B \subseteq X$ με $A \cap B = \emptyset$. Ένα σύνολο $C \subseteq X$ διαχωρίζει το A από το B αν $A \subseteq C$ και $C \cap B = \emptyset$.

Παρατηρούμε ότι αν το C διαχωρίζει το A από το B τότε το $X \setminus C$ διαχωρίζει το B από το A .

Θεώρημα 5.2.2 (Το Θεώρημα Διαχωρισμού του Lusin, [LS18], [LS23], [Lus72]). *Για κάθε δύο ξένα αναλυτικά υποσύνολα A, B ενός Πολωνικού χώρου \mathcal{X} υπάρχει ένα Borel σύνολο C που διαχωρίζει το A από το B .*

Απόδειξη. Δίνουμε την απόδειξη όπως στο [Kec95, 14.7]. Από την Πρόταση 5.1.3 υπάρχουν συνεχείς συναρτήσεις

$$f, g : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{X} \quad \text{με} \quad A = f[\mathcal{N}] \quad \text{και} \quad B = g[\mathcal{N}].$$

Για κάθε $u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ θέτουμε

$$A_u = f[\mathcal{N}_u] \quad \text{και} \quad B_u = g[\mathcal{N}_u].$$

Παρατηρούμε ότι $A_\Lambda = f[\mathcal{N}_\Lambda] = f[\mathcal{N}] = A$ και όμοια $B_\Lambda = B$. Ακόμα είναι ξεκάθαρο από τον ορισμό ότι $A_u \subseteq A$ και $B_w \subseteq B$. Αφού τα A και B είναι ξένα προκύπτει ότι $A_u \cap B_w = \emptyset$ για κάθε $u, w \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$. Επιπλέον έχουμε για κάθε $x \in \mathcal{X}$,

$$\begin{aligned} x \in A_u &\iff \exists \alpha \in \mathcal{N}_u \ x = f(\alpha) \\ &\iff \exists m \exists \alpha \in \mathcal{N}_{u^*(m)} \ x = f(\alpha) \\ &\iff \exists m \ x \in f[\mathcal{N}_{u^*(m)}] \\ &\iff \exists m \ x \in A_{u^*(m)}, \end{aligned}$$

όπου στη δεύτερη από τις πιο πάνω ισοδυναμίες παίρνουμε $m = \alpha(|u|)$. Επομένως

$$(5.1) \quad A_u = \bigcup_{m \in \mathbb{N}} A_{u^*(m)} \quad \text{και} \quad \text{όμοια} \quad B_w = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} B_{w^*(n)}$$

για κάθε $u, w \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$.

Ισχυρισμός. Δοσμένων $u, w \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$, αν για κάθε m, n υπάρχει Borel σύνολο $C_{m,n}^{u,w} \equiv C_{m,n}$ που διαχωρίζει το $A_{u^*(m)}$ από το $B_{w^*(n)}$ τότε υπάρχει Borel σύνολο C που διαχωρίζει το A από το B .

Απόδειξη ισχυρισμού. Θεωρούμε u, w και $C_{m,n}$ όπως στην εκφώνηση και ορίζουμε

$$C = \bigcup_{m \in \mathbb{N}} \bigcap_{n \in \mathbb{N}} C_{m,n}.$$

Προφανώς το C είναι Borel σύνολο. Δείχνουμε ότι $A_u \subseteq C$. Έστω $x \in A_u$, τότε από την (5.1) υπάρχει $m \in \mathbb{N}$ με $x \in A_{u^*(m)}$. Για κάθε $n \in \mathbb{N}$ ισχύει από την υπόθεση

$$(5.2) \quad A_{u^*(m)} \subseteq C_{m,n} \quad \text{και} \quad B_{w^*(n)} \cap C_{m,n} = \emptyset.$$

Άρα για κάθε $n \in \mathbb{N}$ ισχύει $x \in C_{m,n}$ δηλαδή $x \in \bigcap_{n \in \mathbb{N}} C_{m,n} \subseteq C$.

Έπειτα δείχνουμε ότι $C \cap B_w = \emptyset$. Έστω $x \in C$, τότε υπάρχει m έτσι ώστε $x \in \bigcap_{n \in \mathbb{N}} C_{m,n}$. Αν είχαμε $x \in B_w$ τότε από την (5.1) θα υπήρχε $n \in \mathbb{N}$ με $x \in B_{w^*(n)}$. Συνεπώς θα είχαμε $x \in C_{m,n} \cap B_{w^*(n)}$ που αντιβαίνει στην (5.2). Άρα $x \notin B_w$ και άρα ισχύει $C \cap B_w = \emptyset$. \square (ισχυρισμός)

Υποθέτουμε προς άτοπο ότι δεν υπάρχει Borel σύνολο που διαχωρίζει το $A = A_\Lambda$ από το $B = B_\Lambda$. Εφαρμόζουμε τον προηγούμενο ισχυρισμό με $u = w = \Lambda$ και καταλήγουμε ότι υπάρχουν $m_0, n_0 \in \mathbb{N}$ έτσι ώστε δεν υπάρχει Borel σύνολο που να διαχωρίζει το $A_{u^*(m_0)} = A_{(m_0)}$ από το $B_{w^*(n_0)} = B_{(n_0)}$.

Εφαρμόζουμε ξανά τον πιο πάνω ισχυρισμό με $u = (m_0)$ και $v = (n_0)$ και παίρνουμε $m_1, n_1 \in \mathbb{N}$ έτσι ώστε δεν υπάρχει Borel σύνολο που να διαχωρίζει το $A_{u^*(m_1)} = A_{(m_0, m_1)}$ από το $B_{w^*(n_1)} = B_{(n_0, n_1)}$. Συνεχίζουμε αναδρομικά και βρίσκουμε στοιχεία του χώρου του Baire,

$$\gamma = (m_0, m_1, \dots) \quad \delta = (n_0, n_1, \dots)$$

έτσι ώστε για κάθε $k \in \mathbb{N}$ δεν υπάρχει Borel σύνολο που να διαχωρίζει το $A_{(m_0, m_1, \dots, m_{k-1})}$ από το $B_{(n_0, n_1, \dots, n_{k-1})} = B_{\delta|k}$.

Αφού $A = f[\mathcal{N}]$ και $B = g[\mathcal{N}]$ έχουμε ειδικότερα ότι $f(\gamma) \in A$ και $g(\delta) \in B$. Επειδή τα A και B είναι ξένα σύνολα προκύπτει ότι $f(\gamma) \neq g(\delta)$. Θεωρούμε ανοικτές περιοχές $U, W \subseteq \mathcal{X}$ των $f(\gamma)$ και $g(\delta)$ αντίστοιχα με $U \cap W = \emptyset$.

Από τη συνέχεια των f και g υπάρχουν $u, w \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ με $\gamma \in \mathcal{N}_u$, $f[\mathcal{N}_u] \subseteq U$, $\delta \in \mathcal{N}_w$ και $g[\mathcal{N}_w] \subseteq W$. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι τα u, w έχουν το ίδιο μήκος. [Σε διαφορετική περίπτωση (ας πούμε $|u| < |w|$) προεκτείνουμε το u στο u' κατά μήκος του γ ώστε να έχουμε $|u'| = |w|$. Τότε ισχύει $\gamma \in \mathcal{N}_{u'}$ και $f[\mathcal{N}_{u'}] \subseteq f[\mathcal{N}_u] \subseteq U$.]

Εφόσον $u \sqsubseteq \gamma$, $w \sqsubseteq \delta$ και $|u| = |w|$ υπάρχει $k \in \mathbb{N}$ με $u = \gamma|k$ και $w = \delta|k$. Προκύπτει από τα προηγούμενα ότι

$$A_u = f[\mathcal{N}_u] \subseteq U \quad \text{και} \quad B_w \cap U = f[\mathcal{N}_w] \cap U \subseteq W \cap U = \emptyset.$$

Δηλαδή το ανοικτό σύνολο U διαχωρίζει το $A_u = A_{\gamma|k}$ από το $B_w = B_{\delta|k}$, το οποίο έρχεται σε αντίθεση με την επιλογή των γ και δ . Αυτό ολοκληρώνει την απόδειξη. \square

Πόρισμα 5.2.3 (Το Θεώρημα του Suslin, [Lus72]). Τα Borel σύνολα ενός Πολωνικού χώρου \mathcal{X} είναι ακριβώς τα αμφι-αναλυτικά υποσύνολα του \mathcal{X} , δηλαδή

$$\mathcal{B}|\mathcal{X} = \underline{\Delta}_1^1|\mathcal{X}.$$

Απόδειξη. Κάθε Borel σύνολο είναι $\underline{\Delta}_1^1$ από το Πόρισμα 4.1.6. Για τον αντίστροφο εγκλεισμό θεωρούμε ένα $\underline{\Delta}_1^1$ σύνολο $A \subseteq \mathcal{X}$ και θεωρούμε το $B = \mathcal{X} \setminus A$. Τότε τα A, B είναι ξένα αναλυτικά σύνολα και από το Θεώρημα Διαχωρισμού του Lusin (Θεώρημα 5.2.2) υπάρχει ένα Borel $C \subseteq \mathcal{X}$ με $A \subseteq C$ και $B \cap C = \emptyset$.

Εφόσον $B = \mathcal{X} \setminus A$ είναι άμεσο ότι $A = C$ και επομένως το A είναι Borel υποσύνολο του \mathcal{X} . \square

Πόρισμα 5.2.4 (Το γράφημα Borel-μετρήσιμης συνάρτησης). Για κάθε συνάρτηση $f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$ τα ακόλουθα είναι ισοδύναμα:

- (1) $H f$ είναι Borel-μετρήσιμη.
- (2) Το γράφημα $Graph(f)$ της f είναι Borel σύνολο.
- (3) Το γράφημα $Graph(f)$ της f είναι αναλυτικό σύνολο.

Απόδειξη. Για την κατεύθυνση (1) \implies (2) θεωρούμε μια αριθμήσιμη βάση $(V_s)_{s \in \mathbb{N}}$ του \mathcal{Y} και έχουμε

$$\begin{aligned} (x, y) \in Graph(f) &\iff \forall s (y \in V_s \implies f(x) \in V_s) \\ &\iff \forall s (y \notin V_s \vee f(x) \in V_s). \end{aligned}$$

Από τις ιδιότητες κλειστότητας της κλάσης των Borel συνόλων προκύπτει ότι το $Graph(f)$ είναι Borel υποσύνολο του $\mathcal{X} \times \mathcal{Y}$.

Η κατεύθυνση (2) \implies (3) είναι προφανής αφού κάθε Borel σύνολο είναι αναλυτικό.

Τέλος για την κατεύθυνση (3) \implies (1) θεωρούμε ένα ανοικτό $U \subseteq \mathcal{Y}$. Πρέπει να δείξουμε ότι το $f^{-1}[U]$ είναι Borel υποσύνολο του \mathcal{X} . Για κάθε $x \in \mathcal{X}$ έχουμε

$$\begin{aligned} x \in f^{-1}[U] &\iff f(x) \in U \\ &\iff \exists y ((x, y) \in Graph(f) \ \& \ y \in U). \end{aligned}$$

Επειδή η κλάση των αναλυτικών συνόλων είναι κλειστή ως προς τον τελεστή $\exists^{\mathcal{Y}}$ έχουμε από την πιο πάνω ισοδυναμία ότι το σύνολο $f^{-1}[U]$ είναι αναλυτικό. Επιπλέον για κάθε $x \in \mathcal{X}$ έχουμε

$$\begin{aligned} x \in f^{-1}[U] &\iff f(x) \in U \\ &\iff \forall y ((x, y) \in Graph(f) \implies y \in U) \\ &\iff \forall y ((x, y) \notin Graph(f) \vee y \in U). \end{aligned}$$

Προκύπτει από την τελευταία ισοδυναμία (και την κλειστότητα της κλάσης των συναναλυτικών συνόλων ως προς $\forall^{\mathcal{Y}}$) ότι το σύνολο $f^{-1}[U]$ είναι συναναλυτικό.

Από το Θεώρημα του Suslin (Πόρισμα 5.2.3) το σύνολο $f^{-1}[U]$ είναι Borel. \square

5.3. Το Θεώρημα Τέλειου Συνόλου

5.4. Το Θεώρημα Kunen-Martin

5.5. Μετρησιμότητα των Αναλυτικών Συνόλων

5.6. Αναλυτικά Σύνολα και Ομαλοποίηση

Λύσεις Ασκήσεων και Υποδείξεις

Κεφάλαιο 2

Άσκηση 2.1.9.

Άσκηση 2.1.10.

Άσκηση 2.1.11.

Άσκηση 2.1.12.

Άσκηση 2.1.13.

Άσκηση 2.1.14.

Άσκηση 2.1.15.

Άσκηση 2.1.16.

Άσκηση 2.1.17.

Άσκηση 2.2.1. Έστω $u = (u_0, \dots, u_{n-1})$ και $(v_0, \dots, v_{m-1}) \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ με

$$\langle u_0, \dots, u_{n-1} \rangle = \langle v_0, \dots, v_{m-1} \rangle.$$

Αν το u είναι η κενή ακολουθία τότε $\langle u_0, \dots, u_{n-1} \rangle = 1$. Επειδή η συνάρτηση $\langle \cdot \rangle$ λαμβάνει άρτιες τιμές στις μη κενές ακολουθίες έχουμε αναγκαστικά ότι και το v είναι η κενή ακολουθία, άρα $u = v$.

Αν $u \neq \Lambda$ τότε όπως πιο πάνω $v \neq \Lambda$. Άρα $n, m \geq 1$. Αν είχαμε $n \neq m$, ας πούμε $n < m$ τότε, εφόσον ο όρος $p_n^{v(n)+1} \neq 1$ είναι παράγοντας στον αριθμό $\langle v_0, \dots, v_{m-1} \rangle$, θα ήταν επίσης παράγοντας στον αριθμό $\langle u_0, \dots, u_{n-1} \rangle$. Από την άλλη εξ ορισμού ο τελευταίος αριθμός έχει για παράγοντες δυνάμεις των p_0, \dots, p_{n-1} και από τη μοναδικότητα του αναπτύγματος σε γινόμενο πρώτων αριθμών έχει μόνο αυτούς τους παράγοντες. Καταλήγουμε λοιπόν σε άτοπο. Επομένως $n = m$ και

$$p_0^{u_0+1} \cdot \dots \cdot p_{n-1}^{u_{n-1}+1} = p_0^{v_0+1} \cdot \dots \cdot p_{n-1}^{v_{n-1}+1}.$$

Πάλι από τη μοναδικότητα του αναπτύγματος σε γινόμενο πρώτων αριθμών έχουμε $u_i = v_i$ για κάθε $i < n$ και άρα $u = v$.

Άσκηση 2.2.2. Ο αριθμός $10 = 2 \cdot 5$ είναι ένας άρτιος αριθμός που δεν λαμβάνεται ως τιμή της $\langle \cdot \rangle$. Για να έχουμε το 5, που είναι ο τρίτος στη σειρά πρώτος αριθμός, ως παράγοντα στο $\langle u_0, \dots, u_{n-1} \rangle$ θα πρέπει το μήκος της ακολουθίας $u = (u_0, \dots, u_{n-1})$ να είναι τουλάχιστον 3, οπότε και ο αριθμός $p_1^{u_1+1} = 3^{u_1+1} = 3 \cdot 3^{u_1}$ θα είναι και αυτός παράγοντας του αριθμού $\langle u_0, \dots, u_{n-1} \rangle$. Δηλαδή το 3 θα πρέπει να διαιρεί τον $\langle u_0, \dots, u_{n-1} \rangle$. Αφού όμως το 3 δεν διαιρεί το 10 έχουμε $\langle u_0, \dots, u_{n-1} \rangle \neq 10 = 2 \cdot 5$ για κάθε $u = (u_0, \dots, u_{n-1}) \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$.

Άσκηση 2.2.3. Η δοσμένη πρόταση είναι ισοδύναμη με την

$$\forall n \exists s \forall i, j < 2n \left((n, \langle n, (s)_i \rangle) \in Q \ \& \ (i \neq j \rightarrow (s)_i \neq (s)_j) \right).$$

Άσκηση 2.3.12.

Άσκηση 2.3.13.

Άσκηση 2.4.5.

Άσκηση 2.4.6.

Άσκηση 2.4.7. Είναι προφανές ότι το σύνολο $\overline{V \cap P}$ είναι κλειστό. Δείχνουμε ότι δεν έχει μεμονωμένα σημεία. Έστω $y \in \overline{V \cap P}$ και $r > 0$. Θα βρούμε ένα στοιχείο y' του $\overline{V \cap P}$ με $y' \in B(y, r)$ και $y' \neq y$. Αφού $y \in \overline{V \cap P}$ έχουμε

$$B_d(y, r) \cap (V \cap P) = (B_d(y, r) \cap V) \cap P \neq \emptyset.$$

Επομένως υπάρχει $z \in P$ με $z \in U = B_d(y, r) \cap V$. Αφού το P είναι τέλει και το U είναι ανοικτό υπάρχει $w \in U \cap P$ με $w \neq z$. Τότε ένα από τα w, z είναι διάφορο του y . Το ζητούμενο y' είναι ένα από τα w, z ανάλογα με το ποιο είναι διάφορο του y .

Άσκηση 2.4.8. Έστω P και S ο τέλει πυρήνας και το διάσπαρτο μέρος του C αντίστοιχα. Για κάθε τέλει $P_0 \subseteq C$ το $P \cup P_0$ είναι εύκολα τέλει υποσύνολο του C . Προφανώς το σύνολο $S_0 = C \setminus (P \cup P_0) \subseteq C \setminus P = S$ είναι αριθμήσιμο. Από τη μοναδικότητα της διάσπασης έχουμε $P = P \cup P_0$ και άρα $P_0 \subseteq P$.

Άσκηση 2.4.9. Έστω G ένα G_δ υποσύνολο του Πολωνικού χώρου \mathcal{X} . Από το Θεώρημα 2.1.7 το G με τη σχετική τοπολογία είναι Πολωνικός χώρος. Αν το G είναι υπεραριθμήσιμο σύνολο έχουμε από το Πόρισμα 2.4.3 έναν συνεχή μοιμορφισμό $\tau : 2^{\mathbb{N}} \rightarrow G$. Επομένως

$$\mathbb{R} =_c 2^{\mathbb{N}} \leq_c G \leq_c \mathbb{R}$$

όπου στην τελευταία σχέση \leq_c χρησιμοποιήσαμε το Πόρισμα 2.3.7. Από το Θεώρημα Schröder-Bernstein έχουμε $G =_c \mathbb{R}$.

Άσκηση 2.5.14.

Άσκηση 2.5.15.

Άσκηση 2.5.16. Ορίζουμε $S = \{u \in T \mid [T_u] \neq \emptyset\}$. Προφανώς $\Lambda \in S \subseteq T$. Επιπλέον αν $u \in S$ και $w \sqsubseteq u$ τότε $\emptyset \neq [T_w] \subseteq [T_u]$ άρα $w \in S$. Επομένως το S είναι υποδένδρο του T .

Αν $u \in S$ τότε υπάρχει $f \in [T]$ με $u \sqsubseteq f$, ειδικότερα $v = u * f(|u|) \in T$. Είναι σαφές ότι $v \sqsubseteq f$ άρα $f \in [T_v]$. Προκύπτει ότι $v \in S$ και επομένως κάθε $u \in S$ έχει μια γνήσια επέκταση στο S , δηλαδή το S είναι κλαδεμένο.

Τέλος δείχνουμε ότι $[S_u] = [T_u]$ για κάθε $u \in T$. Σταθεροποιούμε ένα $u \in T$, είναι σαφές ότι $[S_u] \subseteq [T_u]$, επομένως θεωρούμε $f \in [T_u]$ και δείχνουμε ότι $f \in [S_u]$. Έστω $n \in \mathbb{N}$, τότε $f|n \in T_u$ και άρα $f|n \sqsubseteq u$. Επιπλέον $f \in [T_{f|n}]$, επομένως $f|n \in S$. Έχουμε λοιπόν $f|n \sqsubseteq u$ και $f|n \in S$, οπότε $f|n \in S_u$. Καταλήγουμε ότι $f \in [S_u]$.

Άσκηση 2.5.17.

Άσκηση 2.5.18.

Άσκηση 2.5.19. Δείχνουμε το ζητούμενο με επαγωγή στο n . Προφανώς το $F_0 = \{\Lambda\}$ είναι πεπερασμένο σύνολο. Είναι επίσης άμεσο ότι

$$F_{n+1} = \bigcup \{u * (x) \mid x \in X \ \& \ u * (x) \in T \ \& \ u \in F_n\}.$$

Άρα αν το F_n είναι πεπερασμένο, επειδή το T είναι πεπερασμένης διακλάδωσης το F_{n+1} είναι επίσης πεπερασμένο σύνολο.

Άσκηση 2.5.20. Από την Πρόταση 2.5.2 υπάρχουν δένδρα S και T με $[S] = H$ και $[T] = F$. Με εφαρμογή της Πρότασης 2.5.9 αρκεί να βρούμε μια κατάλληλη μονότονη $\varphi : S \rightarrow T$ με $\varphi^*(\alpha) = \alpha$ για κάθε $\alpha \in F$. (Παρατηρήστε ότι χρησιμοποιούμε την αντίστροφη κατεύθυνση της τελευταίας πρότασης, όπου το S δεν χρειάζεται να είναι κλαδεμένο.)

Μπορούμε να υποθέσουμε ότι $T \subseteq S$, αλλιώς αντικαθιστούμε το T με το $T \cap S \subseteq S$, τότε για κάθε $\alpha \in F = [T] \subseteq H = [S]$ και για κάθε n ισχύει $\alpha|n \in T \cap S$, άρα $F = [T] = [T \cap S]$.

Από την Άσκηση 2.5.16 μπορούμε επίσης να υποθέσουμε ότι το T είναι κλαδεμένο. (Το S θα μπορούσαμε να το αντικαταστήσουμε από την αρχή με ένα κλαδεμένο υποδένδρο του, αλλά όπως εξηγήσαμε πιο πάνω αυτό δεν είναι απαραίτητο.)

Ορίζουμε τη συνάρτηση $\varphi : S \rightarrow T$ με επαγωγή στο μήκος του $u \in S$. Αρχικά ορίζουμε $\varphi(\Lambda) = \Lambda$. Υποθέτουμε ότι για κάποιο $n \in \mathbb{N}$ και για κάθε $u \in S$ με $|u| = n$, το $\varphi(u)$ έχει οριστεί, ανήκει στο T και ισχύει $\varphi(u) = u$ όταν $u \in T$. Τότε για κάθε $i \in \mathbb{N}$ με $u * (i) \in S$ ορίζουμε

$$\varphi(u * (i)) = \begin{cases} u * (i), & \text{αν } u * (i) \in T, \\ \varphi(u) * (k), & \text{αν } u * (i) \notin T, \end{cases}$$

όπου k είναι ο ελάχιστος φυσικός αριθμός με $\varphi(u) * (k) \in T$. Πάντα υπάρχει ένα τέτοιο k γιατί $\varphi(u) \in T$ και το δένδρο T είναι κλαδεμένο.

Εύκολα βλέπουμε ότι $\varphi(u) \in T$ για κάθε $u \in S$, $\varphi(u) = u$ για κάθε $u \in T$, και για κάθε $u \sqsubset v$ ισχύει $\varphi(u) \sqsubset \varphi(v)$. Άρα η φ είναι κατάλληλη και μονότονη. Επιπλέον για κάθε $\alpha \in [T]$ έχουμε $\varphi(\alpha|n) = \varphi(\alpha|n)$ για κάθε n , επομένως $\varphi^*(\alpha) = \alpha$.

Άσκηση 2.5.21.

Άσκηση 2.5.22. Θεωρούμε μια ακολουθία $((x_i, u_i))_{i \in \mathbb{N}}$ στοιχείων του T και $(x, u) \in \mathcal{X} \times \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ με $(x_i, u_i) \rightarrow (x, u)$, δηλαδή $x_i \rightarrow x$ και $u_i \rightarrow u$. Επειδή στο $\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ έχουμε τη διακριτή μετρική έχουμε ότι $u_i = u$ τελικά για όλα τα $i \in \mathbb{N}$, οπότε χωρίς βλάβη της γενικότητας μπορούμε να υποθέσουμε ότι $(x_i, u) \in T$ για κάθε $i \in \mathbb{N}$.

Δείχνουμε ότι $(x, u) \in T$. Έστω $v \in J$ και $n \in I$ με $n \leq |u|$. Επειδή $(x_0, u) \in T$ έχουμε $v \not\sqsubseteq u$. Πρέπει να δείξουμε ότι $x \notin V_n$. Αφού $(x_i, u) \in T$ έχουμε $x \in \mathcal{X} \setminus V_n$ για κάθε $i \in \mathbb{N}$. Το σύνολο $\mathcal{X} \setminus V_n$ είναι κλειστό, και άρα $x = \lim_{i \rightarrow \infty} x_i \in \mathcal{X} \setminus V_n$.

Στη συνέχεια δείχνουμε ότι η

$$f : \mathcal{X} \rightarrow \text{Tr} : f(x) = T(x) = \{u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}} \mid (x, u) \in T\}$$

αντιστρέφει ανοικτά σύνολα σε F_σ .

Αρκεί να δείξουμε ότι για κάθε $u_0, \dots, u_m, w_0, \dots, w_k \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ η αντίστροφη εικόνα του συνόλου

$$B(u_0, \dots, u_m, w_0, \dots, w_k) = \{T \in \text{Tr} \mid \forall i \leq m \forall j \leq k (u_i \in T \ \& \ w_j \notin T)\}.$$

μέσω της f είναι F_σ υποσύνολο του \mathcal{X} , γιατί από την Άσκηση 2.5.21 τα πιο πάνω σύνολα αποτελούν βάση για την τοπολογία του Tr και η αριθμήσιμη ένωση F_σ συνόλων είναι επίσης F_σ σύνολο.

Θεωρούμε $u_0, \dots, u_m, w_0, \dots, w_k \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ και $B \equiv B(u_0, \dots, u_m, w_0, \dots, w_k)$ όπως πιο πάνω. Τότε για κάθε $x \in \mathcal{X}$,

$$f(x) \in B \iff \forall i \leq m \forall j \leq k (u_i \in T(x) \ \& \ w_j \notin T(x)).$$

Αν θέσουμε

$$P_u = \{x \in \mathcal{X} \mid u \in T(x)\} \quad \text{και} \quad Q_w = \{x \in \mathcal{X} \mid w \notin T(x)\}$$

όπου $u, w \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$, έχουμε από τα προηγούμενα ότι

$$f^{-1}[B] = \bigcap_{i \leq m, j \leq k} (P_{u_i} \cap Q_{w_j}).$$

Επειδή η πεπερασμένη τομή F_σ συνόλων είναι F_σ σύνολο, αρκεί να δείξουμε ότι για κάθε $u, w \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ τα σύνολα P_u, Q_w είναι F_σ .

Για την ακρίβεια κάθε σύνολο P_u είναι κλειστό γιατί το T είναι κλειστό σύνολο: αν $(x_i)_{i \in \mathbb{N}}$ είναι ακολουθία στο P_u και $x_i \rightarrow x$ τότε $(x_i, u) \in T$ για κάθε $i \in \mathbb{N}$ και $(x_i, u) \rightarrow (x, u)$. Άρα $(x, u) \in T$ δηλαδή $x \in P_u$. Παρατηρούμε ότι $Q_w = \mathcal{X} \setminus P_w$ και άρα το Q_w είναι ανοικτό.

Προφανώς κάθε κλειστό σύνολο είναι F_σ και από την Πρόταση 2.1.6 κάθε ανοικτό σύνολο είναι επίσης F_σ . Έτσι έχουμε το ζητούμενο.

Τέλος δείχνουμε ότι αν τα V_n είναι κλειστά-ανοικτά σύνολα, τότε τα πιο πάνω σύνολα P_u είναι ανοικτά. Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι η αντίστροφη εικόνα των βασικών συνόλων $B(u_0, \dots, u_m, w_0, \dots, w_k)$ είναι πεπερασμένη τομή ανοικτών συνόλων και είναι συνεπώς ανοικτό σύνολο. Επομένως σε αυτή την περίπτωση η f είναι συνεχής.

Θεωρούμε λοιπόν ότι κάθε V_n είναι κλειστό-ανοικτό και $x \in P_u$ για κάποιο $u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$. Αν δεν υπάρχει $n \in I$ με $n < |u|$ τότε $P_u = \mathcal{X}$ (καθολικός ποσοδείκτης υπεράνω του κενού συνόλου) και άρα το P_u είναι ανοικτό σύνολο. Αν υπάρχει $n \in I$ με $n < |u|$ τότε για κάθε τέτοιο n (υπάρχουν πεπερασμένα τέτοια) ισχύει $x \in \mathcal{X} \setminus V_n$. Τα συμπληρώματα $\mathcal{X} \setminus V_n$ είναι ανοικτά σύνολα και συνεπώς υπάρχει ένα ανοικτό σύνολο G με

$$x \in G \subseteq \bigcap_{n \in I, n < |u|} (\mathcal{X} \setminus V_n).$$

Εφόσον $x \in P_u$ έχουμε ότι για κάθε $v \in J$ ισχύει $v \not\sqsubseteq u$. Προκύπτει ότι $x \in G \subseteq P_u$ και το P_u είναι ανοικτό.

Άσκηση 2.5.23.

Άσκηση 2.5.24. Η ευθεία κατεύθυνση είναι άμεση από την απόδειξη της Πρότασης 2.5.6 όπου έχουμε χρησιμοποιήσει το Λήμμα του König για να δείξουμε ότι το σώμα κάθε δένδρου πεπερασμένης διακλάδωσης είναι συμπαγές.

Αντίστροφα θεωρούμε $X \neq \emptyset$ και T ένα άπειρο δένδρο στο X που πεπερασμένης διακλάδωσης. Θα δείξουμε ότι $[T] \neq \emptyset$. Αφού το T είναι άπειρο προκύπτει από την Άσκηση 2.5.19 ότι για κάθε $n \in \mathbb{N}$ υπάρχει $u \in T$ με $n < |u|$, και περιορίζοντας το u κατάλληλα, μπορούμε να υποθέσουμε ότι $n = |u|$.

Από το $AC_{\mathbb{N}}$ υπάρχει μια ακολουθία $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ στοιχείων του T με $|u_n| = n$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$. Παίρνουμε ένα $x_0 \in X$ και ορίζουμε

$$f_n : \mathbb{N} \rightarrow X : f_n = u_n * (x_0, x_0, \dots).$$

Δείχνουμε ότι τα f_n είναι στοιχεία ενός δένδρου πεπερασμένης διακλάδωσης. Ορίζουμε $S \subseteq X^{<\mathbb{N}}$ ως εξής:

$$w \in S \iff w \in T \vee \exists u \in T w = u * (x_0, \dots, x_0).$$

Μπορεί κανείς να δει εύκολα ότι το S είναι δένδρο στο X πεπερασμένης διακλάδωσης. Προφανώς $f_n \in [S]$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$. Από την υπόθεσή μας το $[S]$ είναι συμπαγές και άρα η $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ έχει μια υπακολουθία $(f_{s_n})_{n \in \mathbb{N}}$ που συγκλίνει σε κάποιο $f \in [S]$.

Τέλος δείχνουμε ότι $f \in [T]$. Έστω $m \in \mathbb{N}$, τότε υπάρχει $n > m$ έτσι ώστε για κάθε $k \leq m$ ισχύει $f_{s_n}(k) = f(k)$. Ισχύει $m < |u_{s_n}|$ γιατί $|u_{s_n}| = s_n \geq n > m$. Επιπλέον $f_{s_n} = u_{s_n} * (x_0, x_0, \dots)$ και για κάθε $k \leq m < |u_{s_n}|$,

$$f(k) = f_{s_n}(k) = u_{s_n}(k).$$

Επομένως

$$(f(0), \dots, f(m)) = (u_{s_n}(0), \dots, u_{s_n}(m)) \sqsubseteq u_{s_n} \in T$$

και άρα $(f(0), \dots, f(m)) \in T$ για κάθε m , δηλαδή $f \in [T]$.

Άσκηση 3.1.13. Αν έχουμε έναν Πολωνικό χώρο \mathcal{X} και $P \in \Gamma|(\mathcal{X} \times \mathbb{N})$ τότε $P = \{(x_0, n_0)\}$ για κάποια $x_0 \in \mathcal{X}$ και $n_0 \in \mathbb{N}$. Επομένως $\exists^{\mathbb{N}}P = \{x_0\} \in \Gamma|\mathcal{X}$ και η Γ είναι κλειστή ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$.

Από την άλλη είναι σαφές ότι η κλάση Γ δεν είναι κλειστή ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$ γιατί η άπειρη ένωση μονοσυνόλων προφανώς μπορεί να περιέχει τουλάχιστον δύο στοιχεία.

Άσκηση 3.1.14. Αν έχουμε έναν Πολωνικό χώρο \mathcal{X} και $(P_n)_{n \in \mathbb{N}}$ μια ακολουθία υποσυνόλων του \mathcal{X} που ανήκουν στη Γ τότε το P_0 και συνεπώς η ένωση $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} P_n$ περιέχουν τουλάχιστον δύο στοιχεία. Δηλαδή $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} P_n \in \Gamma|\mathcal{X}$ και η Γ είναι κλειστή ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$.

Στη συνέχεια παίρνουμε $\mathcal{X} = \mathbb{R}$ και $P = \{\sqrt{2}\} \times \mathbb{N} \subseteq \mathbb{R} \times \mathbb{N}$. Τότε το P έχει τουλάχιστον δύο στοιχεία και συνεπώς $P \in \Gamma|(\mathbb{R} \times \mathbb{N})$. Από την άλλη

$$x \in \exists^{\mathbb{N}}P \iff x = \sqrt{2}.$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι το $\exists^{\mathbb{N}}P$ αποτελείται από ακριβώς ένα στοιχείο και επομένως δεν ανήκει στην $\Gamma|\mathbb{R}$. Άρα η Γ δεν είναι κλειστή ως προς $\exists^{\mathbb{N}}$.

Άσκηση 3.1.15. Θεωρούμε τα σύνολα $A_n \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{N}$ και $B_m \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}$, $n, m \in \mathbb{N}$ με

$$\begin{aligned} (x, \alpha) \in A_n &\iff x = f_n(\alpha) \\ (x, \alpha) \in B_m &\iff g_m(x, \alpha) = 0. \end{aligned}$$

Παρατηρούμε ότι το A_n είναι το γράφημα της f_n και το B_m είναι το σύνολο $g_m^{-1}\{0\}$. Άρα τα A_n και B_m είναι κλειστά σύνολα. Επιπλέον για κάθε $x \in \mathcal{X}$ και $n \in \mathbb{N}$,

$$\begin{aligned} \forall m (x = f_n(\alpha) \vee g_m(x, \alpha) = 0) &\iff \forall m ((x, \alpha) \in A_n \vee (x, \alpha) \in B_m) \\ &\iff \forall m (x, \alpha) \in A_n \cup B_m. \end{aligned}$$

Επομένως ορίζουμε για κάθε $n \in \mathbb{N}$ το σύνολο

$$C_n = \bigcap_{m \in \mathbb{N}} (A_n \cup B_m)$$

έτσι που

$$\forall m (x = f_n(\alpha) \vee g_m(x, \alpha) = 0) \iff (x, \alpha) \in C_n.$$

Προφανώς τα σύνολα C_n είναι κλειστά. Έπειτα θεωρούμε τη συνάρτηση της προβολής $\text{pr} : \mathcal{X} \times \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{X} : \text{pr}(x, \alpha) = x$ και έχουμε

$$\exists \alpha (x, \alpha) \in C_n \iff x \in \text{pr}[C_n].$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε

$$\begin{aligned} x \in P &\iff \forall n \exists \alpha \forall m (x = f_n(\alpha) \vee g_m(x, \alpha) = 0) \\ &\iff \forall n \exists \alpha (x, \alpha) \in C_n \\ &\iff \forall n x \in \text{pr}[C_n] \\ &\iff x \in \bigcap_{n \in \mathbb{N}} \text{pr}[C_n]. \end{aligned}$$

Με άλλα λόγια

$$P = \bigcap_{n \in \mathbb{N}} \text{pr}[C_n]$$

δηλαδή το P είναι αριθμήσιμη τομή συνόλων που είναι προβολές κλειστών συνόλων.

Άσκηση 3.1.16. Για κάθε $x \in \mathcal{X}$ έχουμε

$$\begin{aligned} x \in A_u &\iff \forall n \exists w (|w| \geq n \ \& \ w \in T(x)) \\ &\iff \forall n \exists w (|w| \geq n \ \& \ (x, w) \in T). \end{aligned}$$

Επειδή το σύνολο $\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ είναι αριθμήσιμο μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το “ $\exists w$ ” παραπέμπει στον τελεστή $\exists^{\mathbb{N}}$. Για την ακρίβεια θεωρούμε τη φυσική απαρίθμηση $(u_s)_{s \in \mathbb{N}}$ του $\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$. Τότε σύμφωνα με τα ποιο πάνω έχουμε

$$x \in A_u \iff \forall n \exists s (|u_s| \geq n \ \& \ (x, u_s) \in T).$$

Στη συνέχεια παρατηρούμε ότι οι συναρτήσεις $f = ((x, n, s) \mapsto |u_s| - n)$ και $g = ((x, n, s) \mapsto (x, u_s))$ είναι συνεχείς. Επομένως το σύνολο

$$C = \{(x, n, s) \in \mathcal{X} \times \mathbb{N}^2 \mid |u_s| > n\} = \{(x, n, s) \in \mathcal{X} \times \mathbb{N}^2 \mid f(x, n, s) \geq 0\}$$

είναι κλειστό.

Ομοια το σύνολο

$$L = \{(x, n, s) \in \mathcal{X} \times \mathbb{N}^2 \mid g(x, n, s) \in T\}$$

είναι κλειστό.

Συμβολίζουμε με Γ την κλάση των κλειστών συνόλων, η οποία είναι κλειστή ως προς $\&$. Εκτιμούμε την πολυπλοκότητα του A_u διαγραμματικά με βάση τα προηγούμενα,

$$x \in A_u \iff \forall n \exists s \underbrace{(|u_s| \geq n \ \& \ (x, u_s) \in T)}_{\substack{\text{κλειστό} = \Gamma \\ \Gamma \\ \exists^{\mathbb{N}} \Gamma \\ \forall^{\mathbb{N}} \exists^{\mathbb{N}} \Gamma}}$$

Άρα το A_u ανήκει στη $\forall^{\mathbb{N}} \exists^{\mathbb{N}} \Gamma$.

Άσκηση 3.1.17. Θεωρούμε τη φυσική απαρίθμηση $(u_s)_{s \in \mathbb{N}}$ του $\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$. Τότε έχουμε

$$\begin{aligned} (x, u) \in T &\iff \forall v \in J \forall n \in I \text{ με } n \leq |u| \ (x \notin V_n \ \& \ v \not\sqsubseteq u) \\ &\iff \forall v \forall n \leq |u| \ (v \notin J \ \vee \ n \notin I \ \vee \ (x \notin V_n \ \& \ v \not\sqsubseteq u)) \\ &\iff \forall s \forall n \leq f(n) \ (u_s \notin J \ \vee \ (x \notin V_n \ \& \ u_s \not\sqsubseteq u)) \end{aligned}$$

όπου $f : \mathbb{N}^{<\mathbb{N}} \rightarrow \mathbb{N} : f(u) = |u|$. Αφού οι χώροι $\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ και \mathbb{N} είναι διακριτοί η f είναι συνεχής.

Συμβολίζουμε με Γ_0 και Γ_1 τις κλάσεις των κλειστών και F_σ συνόλων αντίστοιχα. Αφού η αντίστροφη εικόνα κλειστού συνόλου μέσω συνεχούς συνάρτησης είναι κλειστό σύνολο, έχουμε ότι η Γ_0 είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση. Με χρήση της Παρατήρησης 3.1.5 υπολογίζουμε διαγραμματικά

$$(x, u) \in T \iff \forall s \forall n \leq f(u) \underbrace{(u_s \notin J \ \vee \ (x \notin V_n \ \& \ u_s \not\sqsubseteq u))}_{\substack{\Gamma_0 \\ \forall^{\leq} \Gamma_0 \subseteq \Gamma_0 \\ \forall^{\mathbb{N}} \Gamma_0 \subseteq \Gamma_0}}$$

Άρα το T ανήκει στην κλάση Γ_0 δηλαδή είναι κλειστό. Για τα σύνολα $P_{u,w}$ έχουμε

$$\begin{aligned} x \in P_{u,w} &\iff u \in f(x) \ \& \ w \notin f(x) \\ &\iff \underbrace{(x, u) \in T}_{\text{κλειστό} = \Gamma_0 \subseteq \Gamma_1} \ \& \ \underbrace{(x, w) \notin T}_{\text{ανοικτό} = F_\sigma = \Gamma_1}, \\ &\qquad \qquad \qquad \Gamma_1 \end{aligned}$$

όπου πιο πάνω χρησιμοποιήσαμε ότι η τομή δύο F_σ συνόλων είναι F_σ σύνολο.

Τέλος θεωρούμε ότι τα V_n είναι κλειστά-ανοικτά και δείχνουμε ότι κάθε $P_{u,w}$ είναι ανοικτό σύνολο. Από τον πιο πάνω υπολογισμό αρκεί να δείξουμε ότι για κάθε $u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ το σύνολο

$$G_u = \{x \in \mathcal{X} \mid (x, u) \in T\}$$

είναι ανοικτό.

Ο ποσοδείκτης $\forall v \in J$ στον ορισμό του T είναι προβληματικός όσον αφορά το να δείξουμε πως το G_u είναι ανοικτό σύνολο. Από την άλλη όμως παρατηρούμε ότι οι

μεταβλητές x και v εμπλέκονται σε διαφορετικά σημεία της σύζευξης στον ορισμό του T . Από αυτό προκύπτει ότι

$$(x, u) \in T \iff \forall v \in J v \not\sqsubseteq u \quad \& \quad \forall n \in I \text{ με } n \leq |u| \quad x \notin V_n.$$

Άρα για σταθερό $u \in \mathbb{N}^{<\mathbb{N}}$ είτε η συνθήκη $\forall v \in J v \not\sqsubseteq u$ δεν ικανοποιείται και άρα $G_u = \emptyset$ που είναι ανοικτό σύνολο, είτε η προηγούμενη συνθήκη ικανοποιείται οπότε

$$\begin{aligned} x \in G_u &\iff \forall n \in I \text{ με } n \leq |u| \quad x \notin V_n \\ &\iff \forall n \leq f(n) \quad (n \notin I \vee x \in \mathcal{X} \setminus V_n). \end{aligned}$$

Αφού το $\mathcal{X} \setminus V_n$ είναι ανοικτό σύνολο προκύπτει από την τελευταία ισοδυναμία ότι το G_u είναι ανοικτό.

Κεφάλαιο 3

Άσκηση 3.2.10.

Άσκηση 3.2.11.

Άσκηση 3.2.12.

Άσκηση 3.2.13. Όπως έχουμε δει στη λύση της Άσκησης 3.1.16 ισχύει

$$x \in A_u \iff \forall n \exists w (|w| \geq n \ \& \ (x, w) \in T).$$

Η σχέση μέσα στις παρενθέσεις ορίζει ένα Π_1^0 σύνολο, συνεπώς το A_u ανήκει στην κλάση

$$\forall^{\mathbb{N}} \exists^{\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}} \Pi_1^0 \subseteq \forall^{\mathbb{N}} \exists^{\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}} \Sigma_2^0 = \forall^{\mathbb{N}} \Sigma_2^0 = \Pi_3^0,$$

όπου πιο πάνω χρησιμοποιήσαμε την κλειστότητα της κλάσης Σ_2^0 ως προς $\exists^{\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}}$.

Άσκηση 3.2.14. Έχουμε ότι ένα δένδρο $T \in \text{Tr}$ είναι πεπερασμένης διακλάδωσης αν και μόνο αν

$$\begin{aligned} &\forall u \in T \exists n_0, \dots, n_{k-1} \forall v \in T [(u \sqsubseteq v \ \& \ |v| = |u| + 1) \iff \exists i < k \ v = u * (n_i)] \\ \iff &\forall u \exists n_0, \dots, n_{k-1} \forall v [u \notin T \vee v \notin T \\ &\quad \vee (u \sqsubseteq v \ \& \ |v| = |u| + 1) \iff \exists i < k \ v = u * (n_i)] \\ \iff &\forall u \exists w \forall v [u \notin T \vee v \notin T \\ &\quad \vee (u \sqsubseteq v \ \& \ |v| = |u| + 1) \iff \exists i < |w| \ v = u * (w(i))]. \end{aligned}$$

Είναι εύκολο να δει κανείς ότι η σχέση μέσα στις αγκύλες ορίζει ένα κλειστό σύνολο. Συνεπώς το σύνολο όλων των δένδρων πεπερασμένης διακλάδωσης ανήκει στην κλάση

$$\forall^{\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}} \exists^{\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}} \forall^{\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}} \Pi_1^0 = \forall^{\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}} \exists^{\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}} \Pi_1^0 \subseteq \forall^{\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}} \exists^{\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}} \Sigma_2^0 = \forall^{\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}} \Sigma_2^0 \subseteq \forall^{\mathbb{N}^{<\mathbb{N}}} \Pi_3^0 = \Pi_3^0.$$

Άσκηση 3.2.15. Για κάθε Σ_n^0 σύνολο $Q \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}$ έχουμε

$$\begin{aligned} x \in \exists^{\mathbb{N}} Q &\iff \exists i (x, i) \in Q \\ &\iff \exists i x \in Q_i \end{aligned}$$

όπου $Q_i = \{x \in \mathcal{X} \mid (x, i) \in Q\} \in \Sigma_n^0 | \mathcal{X}$ από την Παρατήρηση 3.2.5. Άρα $P = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} Q_i \in \Sigma_n^0 | \mathcal{X}$ από την κλειστότητα της Σ_n^0 ως προς $\bigvee_{\mathbb{N}}$.

Άσκηση 3.2.16. Θεωρούμε $P \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}$ που ανήκει στην κλάση Σ_n^0 και για κάθε $i \in \mathbb{N}$ ορίζουμε τα σύνολα $P_i, Q_i, R_i \subseteq \mathcal{X}$ με

$$\begin{aligned} P_i &= \{x \in \mathcal{X} \mid (x, i) \in P\} \\ Q_i &= \bigcup_{j \leq i} P_j \\ R_i &= \bigcap_{j \leq i} P_j. \end{aligned}$$

Από την Παρατήρηση 3.2.5 κάθε P_i ανήκει στη Σ_n^0 . Από την κλειστότητα της κλάσης Σ_n^0 ως προς πεπερασμένη ένωση και πεπερασμένη τομή έχουμε ότι τα σύνολα Q_i, R_i ανήκουν επίσης στη Σ_n^0 . Από το Λήμμα 3.2.6 τα σύνολα $Q, R \subseteq \mathcal{X} \times \mathbb{N}$ με

$$(x, i) \in Q \iff x \in Q_i \quad \text{και} \quad (x, i) \in R \iff x \in R_i$$

ανήκουν στην κλάση Σ_n^0 . Επιπλέον

$$\begin{aligned} (x, i) \in \exists^{\leq} P &\iff \exists j \leq i (x, j) \in P \\ &\iff \exists j \leq i x \in P_j \\ &\iff x \in Q_i \\ &\iff (x, i) \in Q. \end{aligned}$$

Άρα $\exists^{\leq} P = Q \in \Sigma_n^0 | (\mathcal{X} \times \mathbb{N})$ και όμοια $\forall^{\leq} P = R \in \Sigma_n^0 | (\mathcal{X} \times \mathbb{N})$.

Άσκηση 3.2.17. Για κάθε $y \in [0, 1]$ ορίζουμε το σύνολο

$$V_y = \begin{cases} \mathcal{X}, & \text{αν } y \leq 2^{-1}, \\ \emptyset, & \text{αλλιώς.} \end{cases}$$

Είναι σαφές ότι κάθε V_y είναι ανοικτό υποσύνολο του \mathcal{X} . Από την άλλη αν πάρουμε το σύνολο

$$(x, y) \in V \iff x \in V_y$$

τότε

$$V = \mathcal{X} \times [0, 2^{-1}]$$

που δεν είναι ανοικτό υποσύνολο του $\mathcal{X} \times [0, 1]$.

Άσκηση 3.2.18. Για κάθε $(x_i)_{i \in \mathbb{N}} \in \mathcal{X} = \prod_{i \in \mathbb{N}} \mathcal{X}_i$,

$$\begin{aligned} (x_i)_{i \in \mathbb{N}} \in \prod_{i \in \mathbb{N}} A_i &\iff \forall i x_i \in A_i \\ &\iff \forall i \text{pr}_i((x_k)_{k \in \mathbb{N}}) \in A_i, \end{aligned}$$

όπου $\text{pr}_i : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{X}_i$ είναι η συνάρτηση της προβολής στην i -συντεταγμένη. Αφού κάθε A_i είναι Σ_n^0 σύνολο προκύπτει από την τελευταία ισοδυναμία ότι το σύνολο $\prod_{i \in \mathbb{N}} A_i$ ανήκει στην κλάση $\forall^{\mathbb{N}} \Sigma_n^0 = \Pi_{n+1}^0$.

Από την άλλη αν κάθε A_i είναι Π_n^0 σύνολο τότε από την τελευταία ισοδυναμία το $\prod_{i \in \mathbb{N}} A_i$ ανήκει στην κλάση $\forall^{\mathbb{N}} \Pi_n^0 = \Pi_n^0$.

Για την περίπτωση του πεπερασμένου γινομένου έχουμε όπως πριν

$$(x_0, \dots, x_m) \in A_0 \times \dots \times A_m \iff \forall i \leq m \text{pr}_i(x_0, \dots, x_m) \in A_i.$$

Οπότε αν κάθε A_i είναι Σ_n^0 σύνολο το πεπερασμένο γινόμενο $A_0 \times \dots \times A_m$ είναι επίσης Σ_n^0 λόγω της κλειστότητας της Σ_n^0 ως προς τον φραγμένο καθολικό ποσοδείκτη. Εδώ κάνουμε χρήση της Παρατήρησης 3.1.5 με $f(x_0, \dots, x_m) = m$ (σταθερή συνάρτηση). Όμοια αν κάθε A_i είναι Π_n^0 σύνολο τότε το $A_0 \times \dots \times A_m$ είναι επίσης Π_n^0 .

Άσκηση 3.3.7.

Άσκηση 3.3.8.

Άσκηση 3.3.9. Οι ισοδυναμίες μεταξύ των τελεστών κλειστότητας είναι άμεσες από το Πρόσχημα 3.1.9 και την Πρόταση 3.1.10. Ο ισχυρισμός για τα σύνολα R και R_s είναι επίσης άμεσος από την Πρόταση 3.1.6. Σε όλα αυτά χρησιμοποιούμε την κλειστότητα των κλάσεων ως προς συνεχή αντικατάσταση.

Απομένει να δειχθεί ο πρώτος ισχυρισμός. Δείχνουμε το ζητούμενο με επαγωγή στο $n \geq 1$. Για $n = 1$ θεωρούμε έναν Πολωνικό χώρο \mathcal{X} , μια ακολουθία $(P_s)_{s \in \mathbb{N}}$ από Σ_1^1 υποσύνολα του \mathcal{X} και μια ακολουθία $(Q_s)_{s \in \mathbb{N}}$ κλειστών υποσυνόλων του $\mathcal{X} \times \mathcal{N}$ με $P_s = \exists^{\mathcal{N}} Q_s$ για κάθε $s \in \mathbb{N}$. Θεωρούμε επίσης το σύνολο P της εκφώνησης.

Από το Λήμμα 3.2.6 το

$$Q = \{(x, \alpha, s) \in \mathcal{X} \times \mathbb{N} \mid (x, \alpha) \in Q_s\}$$

είναι κλειστό σύνολο. Επιπλέον για κάθε x, s ,

$$\begin{aligned} (x, s) \in P &\iff x \in P_s \\ &\iff \exists \alpha (x, \alpha) \in Q_s \\ &\iff \exists \alpha \in (x, \alpha, s) \in Q. \end{aligned}$$

Άρα το P είναι Σ_1^1 σύνολο.

Υποθέτουμε ότι για κάποιο $n \geq 1$ έχουμε ότι για κάθε Πολωνικό χώρο \mathcal{X} και κάθε ακολουθία $(P_s)_{s \in \mathbb{N}}$ από Σ_n^1 υποσύνολα του \mathcal{X} το σύνολο P της εκφώνησης ανήκει στην κλάση Σ_n^1 . Δείχνουμε το ίδιο για το $n + 1$.

Έστω \mathcal{X} Πολωνικός χώρος και $(P_s)_{s \in \mathbb{N}}$ μια ακολουθία από Σ_{n+1}^1 υποσύνολα του \mathcal{X} . Παίρνουμε μια ακολουθία $(Q_s)_{s \in \mathbb{N}}$ από Π_n^1 υποσύνολα $\mathcal{X} \times \mathcal{N}$ με $P_s = \exists^{\mathcal{N}} Q_s$ για κάθε $s \in \mathbb{N}$.

Από την Επαγωγική Υπόθεση εφαρμοσμένη στον Πολωνικό χώρο $\mathcal{X} \times \mathcal{N}$ και στην ακολουθία Σ_n^1 συνόλων $((\mathcal{X} \times \mathcal{N}) \setminus Q_s)_{s \in \mathbb{N}}$ το σύνολο $Q \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{N} \times \mathbb{N}$ με

$$(x, \alpha, s) \in Q \iff (x, \alpha) \in Q_s$$

είναι Π_n^1 . Όπως πιο πάνω για κάθε x, s έχουμε

$$\begin{aligned} (x, s) \in P &\iff x \in P_s \\ &\iff \exists \alpha (x, \alpha) \in Q_s \\ &\iff \exists \alpha \in (x, \alpha, s) \in Q. \end{aligned}$$

Άρα το P είναι Σ_{n+1}^1 σύνολο.

Άσκηση 3.3.10. Η κατεύθυνση (iii) \implies (i) είναι σαφής αφού οι προβολές είναι συνεχείς συναρτήσεις και άρα αν μια κλάση είναι κλειστή ως προς συνεχείς εικόνες είναι τότε κλειστή και ως προς τον τελεστή $\exists^{\mathcal{N}}$.

Για την κατεύθυνση (i) \implies (ii) θεωρούμε έναν Πολωνικό χώρο \mathcal{Y} και έναν συνεχή επιμορφισμό $\pi : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{Y}$. Τότε για κάθε $P \subseteq \mathcal{X} \times \mathcal{Y}$ που ανήκει στη Γ , (όπου \mathcal{X} Πολωνικός χώρος), και κάθε $x \in \mathcal{X}$ έχουμε

$$\begin{aligned} x \in \exists^{\mathcal{Y}} P &\iff \exists y (x, y) \in P \\ &\iff \exists \alpha (x, \pi(\alpha)) \in P, \end{aligned}$$

όπου στην τελευταία ισοδυναμία χρησιμοποιήσαμε ότι η π είναι επιμορφισμός.

Αφού η Γ είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση προκύπτει από τις πιο πάνω ισοδυναμίες ότι το σύνολο $\exists^{\mathcal{Y}} P$ ανήκει στην κλάση $\exists^{\mathcal{N}} \Gamma \subseteq \Gamma$.

Έπειτα ασχολούμαστε με την κατεύθυνση (ii) \implies (iii). Θεωρούμε Πολωνικούς χώρους \mathcal{X}, \mathcal{Y} , μια συνεχή συνάρτηση $f : \mathcal{Y} \rightarrow \mathcal{X}$ και ένα σύνολο $P \in \Gamma|\mathcal{Y}$. Τότε για κάθε $x \in \mathcal{X}$ έχουμε

$$\begin{aligned} x \in f[P] &\iff \exists y \in P f(y) = x \\ &\iff \exists y (y \in P \ \& \ (y, x) \in \text{Graph}(f)). \end{aligned}$$

Το P ανήκει στη Γ από την υπόθεση και το γράφημα $Graph(f)$ της f είναι κλειστό σύνολο αφού η f είναι συνεχής. Από τις ιδιότητες κλειστότητας της Γ το σύνολο Q με

$$(y, x) \in Q \iff y \in P \ \& \ (y, x) \in Graph(f)$$

ανήκει στη Γ και το σύνολο $f[P] = \exists^y Q$ ανήκει στη $\exists^y \Gamma \subseteq \Gamma$.

Ο ισχυρισμός σχετικά με την Σ_n^1 είναι άμεσος από τα πιο πάνω αφού η Σ_n^1 περιέχει τα κλειστά σύνολα, και είναι κλειστή ως προς συνεχή αντικατάσταση και $\&$, όπου $n \geq 1$.

Άσκηση 4.2.13. Πρέπει να δείξουμε ότι η κλειστότητα ως προς την αριθμήσιμη ένωση υποσυνόλων του X είναι ισοδύναμη με την κλειστότητα ως προς την αριθμήσιμη τομή (υποσυνόλων του X) παρουσία των άλλων δύο ιδιοτήτων της σ -άλγεβρας.

Θεωρούμε ότι η \mathcal{A} είναι σ -άλγεβρα και παίρνουμε μια ακολουθία $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ από υποσύνολα του X που ανήκουν στην \mathcal{A} . Τότε

$$X \setminus \bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} X \setminus A_n.$$

Αφού $A_n \in \mathcal{A}$ έχουμε ότι $X \setminus A_n \in \mathcal{A}$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$, και από την κλειστότητα ως προς αριθμήσιμη ένωση έχουμε ότι $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} X \setminus A_n \in \mathcal{A}$. Προκύπτει ότι $X \setminus \bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{A}$ και άρα $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{A}$. Καταλήγουμε ότι η \mathcal{A} είναι κλειστή ως προς των αριθμήσιμη τομή υποσυνόλων του X .

Η αντίστροφη κατεύθυνση αποδεικνύεται όμοια.

Άσκηση 4.2.14. Ορίζουμε τις οικογένειες $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \mathcal{F}_3, \mathcal{F}_4$ ως εξής

$$\mathcal{F}_1 = \{A \subseteq \mathcal{P}(X) \mid \eta \ \mathcal{A} \ \epsilon\text{ί}\nu\alpha\ \sigma\text{-}\alpha\lambda\gamma\epsilon\beta\rho\alpha \ \text{π}\omega\upsilon \ \text{π}\epsilon\rho\iota\epsilon\chi\epsilon\ \tau\alpha \ \alpha\upsilon\omicron\iota\kappa\acute{\alpha} \ \text{υ}\rho\omicron\sigma\upsilon\eta\omicron\lambda\alpha \ \text{τ}\omega\upsilon \ X\}$$

$$\mathcal{F}_2 = \{A \subseteq \mathcal{P}(X) \mid \eta \ \mathcal{A} \ \epsilon\text{ί}\nu\alpha\ \sigma\text{-}\alpha\lambda\gamma\epsilon\beta\rho\alpha \ \text{π}\omega\upsilon \ \text{π}\epsilon\rho\iota\epsilon\chi\epsilon\ \tau\alpha \ \kappa\lambda\epsilon\iota\sigma\acute{\alpha} \ \text{υ}\rho\omicron\sigma\upsilon\eta\omicron\lambda\alpha \ \text{τ}\omega\upsilon \ X\}$$

$$\mathcal{F}_3 = \{A \subseteq \mathcal{P}(X) \mid \eta \ \mathcal{A} \ \epsilon\text{ί}\nu\alpha\ \kappa\lambda\epsilon\iota\sigma\acute{\tau}\eta \ \omega\varsigma \ \text{π}\rho\omicron\varsigma \ \alpha\rho\iota\theta\acute{\mu}\eta\sigma\iota\mu\epsilon\varsigma \ \epsilon\upsilon\acute{\omega}\sigma\epsilon\iota\varsigma/\tau\omicron\mu\acute{\epsilon}\varsigma \ \kappa\alpha\iota \ \text{π}\epsilon\rho\iota\epsilon\chi\epsilon\ \tau\alpha \ \alpha\upsilon\omicron\iota\kappa\acute{\alpha} \ \text{υ}\rho\omicron\sigma\upsilon\eta\omicron\lambda\alpha \ \text{τ}\omega\upsilon \ X\}$$

$$\mathcal{F}_4 = \{A \subseteq \mathcal{P}(X) \mid \eta \ \mathcal{A} \ \epsilon\text{ί}\nu\alpha\ \kappa\lambda\epsilon\iota\sigma\acute{\tau}\eta \ \omega\varsigma \ \text{π}\rho\omicron\varsigma \ \alpha\rho\iota\theta\acute{\mu}\eta\sigma\iota\mu\epsilon\varsigma \ \epsilon\upsilon\acute{\omega}\sigma\epsilon\iota\varsigma/\tau\omicron\mu\acute{\epsilon}\varsigma \ \kappa\alpha\iota \ \text{π}\epsilon\rho\iota\epsilon\chi\epsilon\ \tau\alpha \ \kappa\lambda\epsilon\iota\sigma\acute{\alpha} \ \text{υ}\rho\omicron\sigma\upsilon\eta\omicron\lambda\alpha \ \text{τ}\omega\upsilon \ X\}.$$

Πρέπει να δείξουμε ότι $\bigcap \mathcal{F}_1 = \bigcap \mathcal{F}_2 = \bigcap \mathcal{F}_3 = \bigcap \mathcal{F}_4$. Είναι εύκολο να δει κανείς ότι η τομή κάθε μίας από αυτές τις οικογένειες ικανοποιεί την αντίστοιχη ιδιότητα της οικογένειας, δηλαδή ισχύει $\bigcap \mathcal{F}_i \in \mathcal{F}_i$ για κάθε $i = 1, 2, 3, 4$.

Κάθε σ -άλγεβρα \mathcal{A} στο X που περιέχει τα ανοικτά σύνολα περιέχει επίσης και τα κλειστά. Αυτό συμβαίνει γιατί κάθε κλειστό σύνολο είναι G_δ και ειδικότερα είναι αριθμήσιμη τομή στοιχείων της \mathcal{A} . Η \mathcal{A} ως σ -άλγεβρα είναι κλειστή ως προς τις αριθμήσιμες τομές (Άσκηση 4.2.13).

Επομένως κάθε στοιχείο της \mathcal{F}_1 είναι και στοιχείο της \mathcal{F}_2 . Αντίστροφα αν η \mathcal{A} είναι σ -άλγεβρα που περιέχει τα κλειστά σύνολα, τότε περιέχει και τα ανοικτά, γιατί κάθε ανοικτό σύνολο είναι F_σ και άρα αριθμήσιμη ένωση στοιχείων της \mathcal{A} . Προκύπτει ότι $\mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_2$ και άρα $\bigcap \mathcal{F}_1 = \bigcap \mathcal{F}_2$.

Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο δείχνει κανείς ότι $\mathcal{F}_3 = \mathcal{F}_4$ και επομένως $\bigcap \mathcal{F}_3 = \bigcap \mathcal{F}_4$.

Απομένει να δείξουμε ότι $\bigcap \mathcal{F}_1 = \bigcap \mathcal{F}_3$. Από την Άσκηση 4.2.13 κάθε σ -άλγεβρα είναι κλειστή ως προς αριθμήσιμες ενώσεις και αριθμήσιμες τομές, άρα $\mathcal{F}_1 \subseteq \mathcal{F}_3$ και επομένως $\bigcap \mathcal{F}_3 \subseteq \bigcap \mathcal{F}_1 = \mathcal{B}|X$. Για την αντίστροφη συμπερίληψη θεωρούμε την οικογένεια

$$\mathcal{A}_0 = \bigcap \mathcal{F}_3 \cap \{A \subseteq X \mid X \setminus A \in \mathcal{F}_3\}$$

και δείχνουμε ότι η \mathcal{A}_0 είναι σ -άλγεβρα που περιέχει τα ανοικτά σύνολα. Από αυτό προκύπτει ότι $\mathcal{B}|X \subseteq \mathcal{A}_0$ και άρα

$$\bigcap \mathcal{F}_1 = \mathcal{B}|X \subseteq \mathcal{A}_0 \subseteq \bigcap \mathcal{F}_3.$$

Αν το V είναι ανοικτό υποσύνολο του X τότε προφανώς ανήκει στην $\bigcap \mathcal{F}_3$. Επιπλέον το $C = X \setminus V$ είναι κλειστό σύνολο και άρα G_δ , δηλαδή αριθμήσιμη τομή ανοικτών συνόλων. Ειδικότερα το C είναι αριθμήσιμη τομή στοιχείων της $\bigcap \mathcal{F}_3$ και αφού $\bigcap \mathcal{F}_3 \in \mathcal{F}_3$ (ειδικότερα η $\bigcap \mathcal{F}_3$ είναι κλειστή ως προς αριθμήσιμες τομές) έχουμε ότι $C = X \setminus V \in \bigcap \mathcal{F}_3$. Συνεπώς $V \in \mathcal{A}_0$.

Είναι σαφές ότι η \mathcal{A}_0 είναι κλειστή ως προς το συμπλήρωμα και ότι τα σύνολα \emptyset, X (ως ανοικτά) ανήκουν στην \mathcal{A}_0 . Θεωρούμε μια ακολουθία $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ στοιχείων της \mathcal{A}_0 . Πρέπει να δείξουμε ότι $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{A}_0$.

Έχουμε $A_n \in \bigcap \mathcal{F}_3$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$ και εφόσον η τελευταία οικογένεια είναι κλειστή ως προς αριθμήσιμες ενώσεις έχουμε $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \bigcap \mathcal{F}_3$. Επιπλέον $X \setminus A_n \in \bigcap \mathcal{F}_3$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$ και εφόσον η τελευταία οικογένεια είναι κλειστή ως προς αριθμήσιμες τομές έχουμε

$$\bigcap_{n \in \mathbb{N}} X \setminus A_n = X \setminus \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \bigcap \mathcal{F}_3.$$

Αφού $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \bigcap \mathcal{F}_3$ και $X \setminus \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \bigcap \mathcal{F}_3$ έχουμε $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{A}_0$. Καταλήγουμε ότι η \mathcal{A}_0 είναι σ -άλγεβρα που περιέχει τα ανοικτά υποσύνολα του X .

Άσκηση 4.2.15. Για κάθε σύνολο $U \subseteq Y$ έχουμε

$$f^{-1}[U] = (f_1^{-1}[U] \cap B) \cup (f_2^{-1}[U] \cap (X \setminus B)).$$

Αν το U είναι ανοικτό τότε τα σύνολα $f_1^{-1}[U], f_2^{-1}[U]$ είναι Borel υποσύνολα του X . Επιπλέον εφόσον το B είναι Borel και η $\mathcal{B}|X$ είναι σ -άλγεβρα έχουμε ότι τα σύνολα

$$\begin{aligned} X \setminus B, \quad f_1^{-1}[U] \cap B, \quad f_2^{-1}[U] \cap (X \setminus B), \\ (f_1^{-1}[U] \cap B) \cup (f_2^{-1}[U] \cap (X \setminus B)) = f^{-1}[U] \end{aligned}$$

είναι Borel.

Άσκηση 4.2.16. Θεωρούμε μετρικούς χώρους X, Y, Z και Borel-μετρήσιμες συναρτήσεις

$$f : X \rightarrow Y, \quad g : Y \rightarrow Z.$$

Τότε για κάθε ανοικτό $U \subseteq Z$ το σύνολο $g^{-1}[U]$ είναι Borel υποσύνολο του Y και από την Πρόταση 4.2.2 η αντίστροφη εικόνα

$$f^{-1}[g^{-1}[U]] = (g \circ f)^{-1}[U]$$

είναι Borel υποσύνολο του X .

Άσκηση 4.2.17. Για κάθε $(x_i)_{i \in \mathbb{N}} \in \prod_{i \in \mathbb{N}} X_i$ έχουμε

$$(x_i)_{i \in \mathbb{N}} \in \prod_{i \in \mathbb{N}} B_i \iff \forall n \ x_n \in B_n \iff \forall n \ \text{pr}_n((x_i)_{i \in \mathbb{N}}) \in B_n$$

όπου $\text{pr}_n : \prod_{i \in \mathbb{N}} X_i \rightarrow X_n$ είναι η προβολή $(x_i)_{i \in \mathbb{N}} \mapsto x_n$, η οποία είναι προφανώς συνεχής.

Από την κλειστότητα της κλάσης των Borel συνόλων ως προς συνεχή αντικατάσταση και τον τελεστή $\forall^{\mathbb{N}}$ προκύπτει το ζητούμενο.

Η απόδειξη του ισχυρισμού για πεπερασμένα το πλήθος Borel σύνολα B_0, \dots, B_n είναι όμοια.

Άσκηση 4.2.18. Θεωρούμε τις προβολές

$$\text{pr}_n : \prod_{i \in \mathbb{N}} Y_i \rightarrow Y_n : (y_i)_{i \in \mathbb{N}} \mapsto y_n$$

όπου $n \in \mathbb{N}$ έτσι που για κάθε συνάρτηση

$$f : X \rightarrow \prod_{n \in \mathbb{N}} Y_n : f = (f_n)_{n \in \mathbb{N}}$$

έχουμε $f_n = \text{pr}_n \circ f$ για κάθε n .

Αν η f είναι Borel-μετρήσιμη τότε από την Άσκηση 4.2.16 κάθε σύνθεση $pr_n \circ f = f_n$ είναι Borel-μετρήσιμη.

Αντίστροφα υποθέτουμε ότι κάθε f_n είναι Borel-μετρήσιμη συνάρτηση. Θεωρούμε ένα βασικό ανοικτό $W \subseteq \prod_{n \in \mathbb{N}} Y_n$. Εφόσον το U είναι ανοικτό, υπάρχουν ανοικτά σύνολα $U_i \subseteq Y_i, i = \dots, n$ (για κάποιο $n \in \mathbb{N}$) ώστε

$$W = U_0 \times \dots \times U_n \times Y_{n+1} \times Y_{n+2} \times \dots$$

Τότε για κάθε $x \in X$ έχουμε

$$\begin{aligned} x \in f^{-1}[W] &\iff (f_n(x))_{n \in \mathbb{N}} \in W \\ &\iff \forall k \leq n \ f_k(x) \in U_k \\ &\iff x \in \bigcap_{k \leq n} f_k^{-1}[U_k]. \end{aligned}$$

Εφόσον κάθε f_k είναι Borel-μετρήσιμη το σύνολα $f_0^{-1}[U_0], \dots, f_n^{-1}[U_n]$ είναι Borel. Προκύπτει από τα προηγούμενα ότι το $f^{-1}[W]$ είναι επίσης Borel.

Αν τώρα το W είναι τυχαίο ανοικτό υποσύνολο του $\prod_{n \in \mathbb{N}} Y_n$ τότε είναι αριθμήσιμη ένωση βασικών ανοικτών συνόλων $W_i, i \in \mathbb{N}$. Επομένως το σύνολο

$$f^{-1}[W] = f^{-1}[\bigcup_{i \in \mathbb{N}} W_i] = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} f^{-1}[W_i]$$

είναι Borel.

Η απόδειξη του ισχυρισμού για συναρτήσεις της μορφής $f = (f_0, \dots, f_n)$ είναι όμοια.

Άσκηση 4.2.19.

Αν οι $f, g : X \rightarrow \mathbb{R}$ είναι Borel-μετρήσιμες τότε από την Άσκηση 4.2.18 η συνάρτηση

$$H : X \rightarrow \mathbb{R}^2 : H(x) = (f(x), g(x))$$

είναι επίσης Borel-μετρήσιμη.

Επειδή η συνάρτηση της πρόσθεσης $+$: $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ είναι συνεχής, πάλι από την Άσκηση 4.2.18 έχουμε ότι η σύνθεση

$$+ \circ H : X \rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto f(x) + g(x),$$

δηλαδή η συνάρτηση $f + g$, είναι Borel-μετρήσιμη. Ο ισχυρισμός για τη μετρησιμότητα των υπόλοιπων συναρτήσεων αποδεικνύεται όμοια. Υπενθυμίζεται ότι

$$\max\{f, g\} = \frac{f + g + |f - g|}{2}, \quad \min\{f, g\} = \frac{f + g - |f - g|}{2}.$$

Άσκηση 5.1.6.

Άσκηση ??.

Άσκηση ??.

Άσκηση ??.

Άσκηση ??.

Άσκηση ??.

Άσκηση ??.

Άσκηση ??.

Κεφάλαιο 4

Άσκηση ??.

Κεφάλαιο 5

Άσκηση ??.

Κεφάλαιο ??

Άσκηση ??.

Κεφάλαιο ??

Άσκηση ??.

Κεφάλαιο ??

Άσκηση ??.

Βιβλιογραφία

- [Kec95] Alexander S. Kechris, *Classical descriptive set theory*, Graduate Texts in Mathematics, vol. 156, Springer-Verlag, 1995.
- [Kle43] S. C. Kleene, *Recursive predicates and quantifiers*, Trans. Amer. Math. Soc. **53** (1943), 41–73.
- [Kre62] G. Kreisel, *The axiom of choice and the class of hyperarithmetic functions*, Nederl. Akad. Wetensch. Proc. Ser. A 65 = Indag. Math. **24** (1962), 307–319. MR 0140418
- [Kur66] K. Kuratowski, *Topology. Vol. I*, Academic Press, New York-London; Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warsaw, 1966, New edition, revised and augmented, Translated from the French by J. Jaworowski. MR 0217751
- [Leb05] H. Lebesgue, *Sur les fonctions représentables analytiquement*, Journal de Mathématiques 6^e serie **1** (1905), 139–216.
- [LS18] N. Lusin and W. Sierpinski, *Sur quelques propriétés des ensembles (A)*, Bull. Int. Acad. Sci. Cracovie Série A: Sciences Mathématiques (1918), 35–48.
- [LS23] ———, *Sur un ensemble non mesurable B*, Journal de Mathématiques 9 e serie **2** (1923), 53–72.
- [Lus25a] N. Lusin, *Les propriétés des ensembles projectifs*, Comptes Rendus Acad. Sci. Paris **180** (1925), 1817–1819.
- [Lus25b] ———, *Sur les ensembles projectifs de M. Henri Lebesgue*, Comptes Rendus Acad. Sci. Paris **180** (1925), 1572–1574.
- [Lus25c] ———, *Sur un problème de M. Emile Borel et les ensembles projectifs de M. Henri Lebesgue: les ensembles analytiques*, Comptes Rendus Acad. Sci. Paris **180** (1925), 1318–1320.
- [Lus72] Nicolas Lusin, *Leçons sur les ensembles analytiques et leurs applications*, Chelsea Publishing Co., New York, 1972, Avec une note de W. Sierpiński, Preface de Henri Lebesgue, Réimpression de l'édition de 1930. MR 0392465
- [Mos47] A. Mostowski, *On definable sets of positive integers*, Fund. Math. **34** (1947), 81–112. MR 21923
- [Mos09] Y.N. Moschovakis, *Descriptive set theory, second edition*, Mathematical Surveys and Monographs., vol. 155, American Mathematical Society, 2009.
- [Sie25] W. Sierpinski, *Sur une classe d'ensembles*, Fundamenta Mathematicae **7** (1925), 237–243.
- [Sie28] ———, *Sur les produits des images continue des ensembles C(A)*, Fundamenta Mathematicae **11** (1928), 123–126.