



Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Τμήμα Μαθηματικών

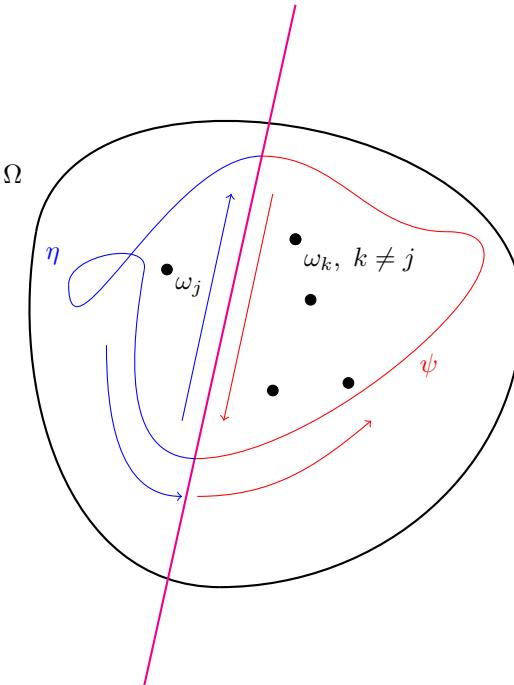
Φεβρουάριος 2022

Μιγαδική Ανάλυση I

Πρόχειρες Σημειώσεις

Επηρεασμένες από το μάθημα 701. Μιγαδική Ανάλυση I, όπως το δίδαξε ο κ. Χατζηαφράτης Τ.

Επιμέλεια: Φράγκος Αναστάσιος



$$\int_{\gamma} f(z) \, dz = 2\pi i \cdot \sum_{k \in [n+1]} \text{Res}(f, \omega_k) \delta_{\gamma}(\omega_k)$$

Πρόλογος

Οι σημειώσεις αυτές είναι επιτρεασμένες από το μάθημα 701. Μηχανική Ανάλυση I, όπως αυτό διδάχθηκε το χειμερινό εξάμηνο του 2021-22 από τον κ. Χατζηαφράτη Τηλέμαχο. Μια πρώτη μορφή του παρόντος κειμένου είχε ανέβει στην η-τάξη των διακτυλογραφημένων σημειώσεων τον Φεβρουάριο του 2022, ήταν όμως αρκετά συνοπτική και με κάποιες αβλεψίες.

Η παρούσα «έκδοση» (ευελπιστώ) είναι αρκετά περισσότερο επεξηγηματική και με λιγότερα Λάθη. Επίσης έχουν υπάρξει μερικές προσθήκες που (νομίζω) αναδεικνύουν μια άλλη πτυχή της Μηχανικής Ανάλυσης, μέσω της Αναλυτικής Θεωρίας Αριθμών. Ευελπιστώ κάποια στιγμή να καταφέρω

να προσθέσω θέματα πολυμεταβλητής μηχανικής ανάλυσης.

Κανείς βέβαια δεν θα πρέπει να αρκεστεί σ' αυτές τις σημειώσεις - το πεδίο της Μηχανικής Ανάλυσης είναι ευρύ και οι έννοιες κάπως θεμελιώδης για αρκετούς κλάδους των μαθηματικών και της φυσικής. Για μια ενδελεχότερη ανάλυση, παραπέμπεστε στη βιβλιογραφία.

Φυσικά, θα είμαι ευγνώμων σε όποιον με ενημερώσει για τυχόντα λάθη παντός φύσεως, στη διεύθυνση:

afragos@email.com

Συμβολισμοί

- $\mathbb{N}_0 := \{0, 1, 2, 3, \dots\}$
- $\mathbb{N} := \{1, 2, 3, 4, \dots\}$
- \mathbb{Q} είναι το σύνολο των ρητών.
- \mathbb{R} είναι το σύνολο των πραγματικών.
- \mathbb{C} είναι το σύνολο των μηχανικών.
- $\mathbb{C}^* := \mathbb{C} \setminus \{0\}$
- $\mathbb{C}^+ := \{z \in \mathbb{C} \mid \Im z \geq 0\}$
- $[n] := \{1, 2, 3, \dots, n\}$
- \subseteq είναι η σχέση του υποσυνόλου.
- \subset είναι η σχέση του γνήσιου υποσυνόλου.
- $\#A$ είναι ο πληθάριθμος του συνόλου A .
- ∂A είναι το (τοπολογικό) σύνορο του A
- $\not\approx$ είναι η ευθεία που διέρχεται από τα z, w .
- $\not\approx$ είναι η (ικλειστή) ημιευθεία με αρχή το z , που διέρχεται από το w .
- $\angle(z, w)$ είναι η (ανοικτή) γωνία με πλευρές \overrightarrow{Oz} και \overrightarrow{Ow} .
- $S(z, r) := \{\zeta \in \mathbb{C} \mid |\zeta - z| < r\}$
- $B(z, r) := \{\zeta \in \mathbb{C} \mid |\zeta - z| \leq r\}$



Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή στους Μιγαδικούς Αριθμούς	5
1.1 Ιστορικά στοιχεία	5
1.2 Βασικοί ορισμοί	6
1.3 Η γεωμετρία των μιγαδικών αριθμών	9
1.4 Πολυωνυμικές εξισώσεις	11
1.5 Βασικές συναρτήσεις στο μιγαδικό επίπεδο	15
1.5.1 Η n -οστή ρίζα	15
1.5.2 Η εκθετική συνάρτηση	16
1.5.3 Ο λογάριθμος	18
1.5.4 Η εκθετική με γενική βάση	19
1.6 Παράρτημα: Τα σύνολα Julia και το σύνολο του Mandelbrot	20
2 Ολόμορφες συναρτήσεις	23
2.1 Διαφορισμότητα	23
2.2 Ολομορφία	24
2.2.1 Εξισώσεις Cauchy - Riemann	27
2.3 Δυναμοσειρές	29
2.3.1 Σύγκλιση δυναμοσειρών	29
2.3.2 Παραγώγιση δυναμοσειρών	34
3 Ολοκληρωτικός λογισμός	39
3.1 Γενικοί ορισμοί	39
3.2 Επικαμπύλια ολοκληρώματα	40
3.3 Θεωρήματα για τα επικαμπύλια ολοκληρώματα	42
3.4 Ο ολοκληρωτικός τύπος του Cauchy	44
3.4.1 Το λήμμα του Goursat	44
3.4.2 Ο δείκτης στροφής	50
3.4.3 Ο ολοκληρωτικός τύπος του Cauchy	52
3.5 Συσχέτιση αναλυτικών και ολομόρφων συναρτήσεων	53
3.6 Παράγουσες μιγαδικών συναρτήσεων	54
3.7 Ακεραίες συναρτήσεις και το θεμελιώδες θεώρημα της άλγεβρας	56
4 Ανωμαλίες και ρίζες	57
5 Υπό προετοιμασία...	59
5.1 Υπό προετοιμασία...	59
6 Βιβλιογραφία	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή στους Μιγαδικούς Αριθμούς

1.1 Ιστορικά στοιχεία

Οι μιγαδικοί αριθμοί, όπως ενδεχομένως είναι γνωστό, προέκυψαν μέσω μιας ανάγκης για εφαρμογή τύπων επίλυσης τριτοβάθμιων πολυωνυμικών εξισώσεων. Η μελέτη των τριτοβάθμιων εξισώσεων είχε απασχολήσει τους μαθηματικούς ήδη από το 780-850 μ.Χ. (Al-Khwarzimi), χωρίς να υπήρχε αντίστοιχη γνωστή διαδικασία (τύπος) για την επίλυση τυχούσας τριτοβάθμιας εξισώσης. Για δευτεροβάθμιες εξισώσεις ήταν γνωστές μέθοδοι επίλυσης (και αποδεικνύονταν μάλλον με γεωμετρικό τρόπο).

Τον 14^ο αιώνα σε δύο ανώνυμα γραπτά (Φλορεντία) εμφανίστηκε για πρώτη φορά ο λεγόμενος μετασχηματισμός του Tschirnhaus, οποίος μπορούσε να απλοποιήσει κάθε δεδομένη τριτοβάθμια πολυωνυμική εξισώση $x^3 + ax^2 + bx + c = 0$. Παρατηρήθηκε ότι αν θέσουμε $y = x - a/3$, η πολυωνυμική εξισώση παίρνει την απλούστερη μορφή:

$$y^3 + py + q = 0, \text{ για κάποια } p, q$$

Αυτή η μορφή, η οποία ονομάζεται και συνεπυγμένη κυβική μορφή, χρησιμοποιήθηκε μετέπειτα για την επίλυση τυχούσας τριτοβάθμιας πολυωνυμικής εξισώσης. Εξάλλου αν βρεθεί τρόπος να επιλύονται εξισώσεις σε συνεπυγμένη κυβική μορφή, μπορούν να προσδιοριστούν τα y για τα οποία $y^3 + py + q = 0$ - οπότε εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό του Tschirnhaus αντίστροφα, τα x για τα οποία $x^3 + ax^2 + bx + c = 0$ μπορούν επίσης να βρεθούν.

Λέγεται ότι το 1526 ο Scipione del Ferro, λίγο πριν πεθάνει, έδωσε έναν τύπο επίλυσης εξισώσεων σε συνεπυγμένη κυβική μορφή στον μαθητή του Antonio Maria Fiore. Ο τελευταίος κάλεσε τον Tartaglia σε «μαθηματική μονομαχία», στην οποία ζήτησε από τον Tartaglia να επιλύσει τριτοβάθμιες εξισώσεις. Προς κακή τύχη του Fiore, ο Tartaglia ανακάλυψε εκ νέου τον τύπο και κέρδισε την μονομαχία.

Ο Tartaglia εκμυστηρεύτηκε στον Cardano τον τύπο που ανακάλυψε, εφόσον ο δεύτερος έδωσε όρκο να μην τον διαρρεύσει. Εδώ να σημειωθεί ότι οι μαθηματικοί της εποχής δεν ήταν πολύ ανοικτοί με τις μαθηματικές τους ανακαλύψεις, διότι οι «μαθηματικές μονομαχίες» ήταν ένας τρόπος να δείξουν την αξία τους και (ενδεχομένως) να προσληφθούν απ' όποιον τους χρειαζόταν.

Ο Cardano βέβαια δεν ήταν μαθηματικός, ήταν έμπορος, και δεν κράτησε τον όρκο του. Δημοσίευσε την μέθοδο γράφοντας τους del Ferro και Tartaglia ως συγγραφείς, το 1545. Μια λύση εξισώσης σε συνεπυγμένη κυβική μορφή δίνεται από τη σχέση:

$$y = \sqrt[3]{\frac{q}{2} + \sqrt{D}} + \sqrt[3]{\frac{q}{2} - \sqrt{D}}, \text{ όπου } D = \left(\frac{q}{2}\right)^2 - \left(\frac{p}{3}\right)^3$$

Αργότερα ο Rafael Bombelli παρατήρησε ότι η εξισώση σε συνεπυγμένη κυβική μορφή:

$$y^3 - 15y - 4 = 0$$

δίνει $D = -121 < 0$. Παρόλα αυτά, εάν θεωρήσουμε ότι ο $\sqrt{-1}$ είναι ένας περίεργος, φανταστικός αριθμός, οι τύποι του Cardano εφαρμόζουν και δίνουν σωστό αποτέλεσμα. Ο Bombelli έδωσε έναν συμβολισμό στον αριθμό $\sqrt{-1}$, όχι όμως το γνωστό i . Οι μαθηματικοί της εποχής δεν έμεναν και πολύ ικανοποιημένοι με αυτήν την «αυθαίρετη» ύπαρξη του αριθμού $\sqrt{-1}$. Εξάλλου, τι ερμηνεία θα είχε ένας

τέτοιος αριθμός:

Ο John Wallis σημείωσε ότι, όπως οι αρνητικοί αριθμοί έχουν μια φυσική ερμηνεία (ανάκλαση των θετικών ως προς το 0 στην πραγματική ευθεία), έτσι και ο $\sqrt{-1}$ έχει γεωμετρική ερμηνεία (την οποία ανέπτυξε σε έναν βαθμό).

Η γεωμετρία του $\sqrt{-1}$ εξερευνήθηκε περισσότερο από τον Abraham de Moivre. Εάν οι διάφοροι αριθμοί $a + b\sqrt{-1}$ ταυτιστούν με τα σημεία (a, b) του επιπέδου, μπορεί να ληφθεί ο τύπος:

$$(\rho \cos \theta + \rho(\sqrt{-1}) \sin \theta)^n = \rho^n (\cos(n\theta) + (\sqrt{-1}) \sin(n\theta)), \quad n \in \mathbb{N}$$

όπου (ρ, θ) είναι οι πολικές συνταγμένες του (a, b) . Αυτό δείχνει ότι κανείς μπορεί να φαντάζεται τις n -οστές μιγαδικές ρίζες ως κορυφές n -γώνων, πράγμα που είχε παρατηρήσει και ο Euler.

Ο Euler ήταν ο πρώτος που εισήγαγε τον γνωστό συμβολισμό $i = \sqrt{-1}$. Επίσης, ορίζοντας κατάλληλα τη συνάρτηση $e^{i\theta}$ απέδειξε ότι $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$. (Or) Θα δούμε ότι ο ορισμός του $e^{i\theta}$ δεν είναι εντελώς αυθαίρετος και έχει γεωμετρική / φυσική σημασία.

Αυτά καλύπτουν κάπως και πολύ περιληπτικά τις απαρχές της Μιγαδικής Ανάλυσης. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε περισσότερο αυστηρά σ' αυτή τη θεωρία, με τον «σύγχρονο» μαθηματικό τρόπο.

1.2 Βασικοί ορισμοί

Πριν ορίσουμε τους μιγαδικούς αριθμούς, ας παρατηρήσουμε κάποιες σημαντικές ιδιότητές τους που θα οδηγήσουν στον ορισμό μας.

- Γενικά, εάν υποθέσουμε ότι ένας αριθμός i (με τις ιδιότητες του $\sqrt{-1}$) υπάρχει, μπορούμε να ορίσουμε τα πολλαπλάσια αυτού bi , $b \in \mathbb{R}$. Φυσικά, προσθέτοντας $a \in \mathbb{R}$, μας επιτρέπεται να γράψουμε αριθμούς της μορφής $a + bi$. Οι αριθμοί $a + bi$ ονομάζονται **μιγαδικοί** γιατί «μπλέκουν / αναμειγνύουν» το φανταστικό μέρος bi με το πραγματικό a . Το γιατί δεν ταυτίζουμε το i με το $\sqrt{-1}$ (όπως έκανε ο Euler) θα το δούμε αργότερα.
- Είναι δυναντόν να προσθέσουμε δύο μιγαδικούς αριθμούς $a + bi$, $c + di$ ως εξής:

$$(a + bi) + (c + di) = (a + c) + (b + d)i$$

- Εφόσον το i έχει ιδιότητες ανάλογες του $\sqrt{-1}$, αναμένουμε $i^2 = -1$. Οπότε, αν πολλαπλασιάσουμε δύο μιγαδικούς αριθμούς $a + bi$, $c + di$ θα έχουμε:

$$(a + bi) \cdot (c + di) = (ac - bd) + (ad + bc)i$$

- Ένας τρόπος να αναπαρασταθούν οι μη αρνητικοί πραγματικοί αριθμοί μπορεί να επιτευχθεί μετρώντας αποστάσεις σε μια ημιευθεία. (Fr), σελ. 32-33 Για να επεκταθεί το σύνολο των αριθμών (ώστε να περιέχει και τους αρνητικούς) εισάγεται και η αντικείμενη ημιευθεία. Αναμένουμε ότι για να γεωμετρικοποιήσουμε τους μιγαδικούς αριθμούς ενδεχομένως θα χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί ακόμη μια διάσταση, οπότε ένα υποσύνολο του επιπέδου (αφού εισάγεται ακόμη μία «πληροφορία», το μιγαδικό μέρος). Μάλιστα, επειδή ένας μιγαδικός αριθμός περιέχει δύο ειδών «πληροφορίες» (το πραγματικό και το φανταστικό μέρος), εκ των οποίων καθένα μπορεί να λάβει οποιαδήποτε πραγματική τιμή, αναμένουμε ότι το υποσύνολο που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι όλο το επίπεδο.

Ορισμός 1.1: (Το σύνολο των μιγαδικών). Θεωρούμε το αλγεβρικό σώμα $(\mathbb{C}, \oplus, \odot)$, το οποίο έχει τις εξής ιδιότητες:

- $\mathbb{C} = \mathbb{R}^2$
- Υπάρχουν δύο πράξεις (\oplus, \odot) , πρόσθεσης και πολλαπλασιασμού, οι οποίες καθιστούν τη δομή $(\mathbb{C}, \oplus, \odot)$ ένα αλγεβρικό σώμα, και ορίζονται με τον εξής τρόπο:
 - ◊ $(a, b) \oplus (c, d) = (a + c, b + d)$
 - ◊ $(a, b) \odot (c, d) = (ac - bd, ad + bc)$
 - ◊ $1_{\mathbb{C}} = (1, 0)$

Είναι επίσης δυνατός ο \mathbb{R} -βαθμωτός πολλαπλασιασμός.

Είναι υπόθεση ρουτίνας κανείς να δείξει ότι η αλγεβρική δομή του **Ορισμός 1.1** είναι πράγματι αλγεβρικό σώμα. Υπενθυμίζουμε μόνο (για χάρη πληρότητας) τον ορισμό του αλγεβρικού σώματος.

Ορισμός 1.2: (Αλγεβρικό σώμα). Ένα αλγεβρικό σώμα είναι μια δομή (F, \oplus, \odot) , με πράξεις \oplus, \odot πρόσθεσης και πολλαπλασιασμού, τέτοια ώστε:

- Η δομή (F, \oplus, \odot) να μεταθετικός δακτύλιος, δηλαδή:
 - ◊ $F \neq \emptyset$
 - ◊ Η πράξη \oplus είναι καλά ορισμένη, αντιμεταθετική, προσαιτεριστική.
 - ◊ Υπάρχει ουδέτερο στοιχείο $(\mathbf{0}_F)$ της \oplus .
 - ◊ Υπάρχει για κάθε $f \in F$ το αντίθετό του $(-f)$, ως προς την \oplus .
 - ◊ Η \odot είναι καλά ορισμένη, αντιμεταθετική, προσαιτεριστική.
 - ◊ Η πράξη \odot είναι επιμεριστική ως προς \oplus .
- Υπάρχει ουδέτερο στοιχείο $(\mathbf{1}_F)$ της \odot .
- Υπάρχει για κάθε $f \in F \setminus \{\mathbf{0}_F\}$ το αντίθετό του (f^{-1}) , ως προς την \odot .
- Το σύνολο F δεν ταυτίζεται με το $\{\mathbf{0}_F\}$.

Το σώμα των μιγαδικών που ορίσαμε έχει πράγματι τις επιθυμητές ιδιότητες που διερευνήσαμε. Μάλιστα, το στοιχείο που παίζει τον ρόλο του $\sqrt{-1}$ είναι το $(0, 1)$. Πράγματι, από τον τρόπο με τον οποίο ο πολλαπλασιασμός ορίστηκε:

$$(0, 1) \odot (0, 1) = (0 \cdot 0 - 1 \cdot 1, 0 \cdot 1 + 1 \cdot 0) = (-1, 0) = -1 \cdot (1, 0) = -1 \cdot \mathbf{1}_{\mathbb{C}}$$

Ορισμός 1.3: (Μιγαδική μονάδα). Ο αριθμός $(0, 1)$ θα καλείται μιγαδική μονάδα και θα συμβολίζεται με i .

Υπάρχει λόγος που δεν ταυτίσαμε εξαρχής $i = \sqrt{-1}$. Η ύπαρξη της ρίζας στο $\sqrt{-1}$ μπορεί να οδηγήσει σε κάποιου είδους αντιφάσεις, τις οποίες δεν επιθημούμε κατά την ανάπτυξη της θεωρίας. Η σημαντικότερη είναι η ακόλουθη: Από τις ιδιότητες της ρίζας:

$$\sqrt{-1} \cdot \sqrt{-1} = \sqrt{(-1) \cdot (-1)} = \sqrt{1} = 1 \neq -1$$

το οποίο δεν είναι επιθυμητό, αφού θέλουμε $i^2 = -1$.

Παρατήρηση 1.1: Κάθε αριθμός του \mathbb{C} μπορεί να γραφεί ως $(a, 0) \oplus [(b, 0) \odot (0, 1)]$, οπότε $(a, b) = (a, 0) \oplus [(b, 0) \odot i]$.

Απόδειξη: Πράγματι, αρκεί να παρατηρήσουμε ότι:

$$(a, b) = (a, 0) \oplus (0, b) = (a, 0) \oplus [(b, 0) \odot (0, 1)]$$

□

Μερικές φορές παραποτόμεις την παραπάνω μορφή και γράφουμε $a + bi$ αντί $(a, 0) \oplus [(b, 0) \odot i]$. Παρατηρήστε ότι κανονικά οι πραγματικοί αριθμοί δεν είναι υποσύνολο των μιγαδικών αριθμών - οι αντίστοιχοι πραγματικοί αριθμοί στο επίπεδο είναι οι $(x, 0) \in \mathbb{R} \times \{0\}$. Κάνοντας όμως την ταύτηση $x \equiv (x, 0)$ είναι δυνατόν να γράψουμε $a + [b \odot i]$ για τον μιγαδικό αριθμό (a, b) , κι απλοποιώντας ακόμη περισσότερο, να γράψουμε $a + bi$. Επιπλέον καταφέρνουμε τον «εγκλεισμό» $\mathbb{R} \subset \mathbb{C}$ (αφού $a + 0i = a \in \mathbb{R}$) το οποίο δικαιολογεί το ότι συχνά θεωρούμε τους μιγαδικούς ως επεκταση των πραγματικών.

Φυσικά αυτή η ταύτιση δικαιολογείται αυστηρότερα λόγω του ότι η απεικόνιση $(a, 0) \mapsto a$ είναι ένας ισομορφισμός σωμάτων.

Παρατήρηση 1.2: Η απεικόνιση $\varphi : \mathbb{R} \times \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$ με $(a, 0) \mapsto a$ είναι ισομορφισμός σωμάτων. Παρατηρήστε ότι το $\mathbb{R} \times \{0\}$ είναι υπόσωμα του \mathbb{C} , κληρονομώντας τις πράξεις του \mathbb{C} .

Απόδειξη: Πράγματι, εξ ορισμού των πράξεων, οι σχέσεις:

$$\varphi((a, 0) + (b, 0)) = \varphi((a + b, 0)) = a + b = \varphi((a, 0)) + \varphi((b, 0))$$

και

$$\varphi((a, 0) \cdot (b, 0)) = \varphi((ab, 0)) = ab = \varphi((a, 0)) \cdot \varphi((b, 0))$$

αληθεύουν. Η φ είναι προφανώς αμφιμονοσήμαντη.

□

Σε κάθε μιγαδικό $z = (a, b)$ αυτά τα a και b καλούνται πραγματικά και (αντίστοιχα) φανταστικά μέρη. Αυστηρότερα:

Ορισμός 1.4: (Πραγματικά και φανταστικά μέρη). Έστω $z \in \mathbb{C}$. Το z πάντοτε γράφεται στη μορφή $z = (a, 0) \oplus [(b, 0) \odot i]$, όπου $a, b \in \mathbb{R}$. Ορίζουμε πραγματικό μέρος του z τον αριθμό $\Re(z) := \|(a, 0)\| = a$, και ως φανταστικό μέρος του z τον αριθμό $\Im(z) := \|(0, b)\| = b$.

Φυσικά ο παραπάνω ορισμός είναι εφικτός επειδή ορίσαμε $\mathbb{C} = \mathbb{R}^2$, οπότε είναι δυνατόν να οριστούν αποστάσεις μέσω της νόρμας $\|\cdot\|$:

$$\|(a, b)\| = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Είναι επιπλέον δυνατόν να δώσουμε τον ακόλουθο ορισμό:

Ορισμός 1.5: (Μέτρο μιγαδικού αριθμού). Έστω $z \in \mathbb{C}$. Το z έχοντας μορφή διανύσματος, έχει ένα μέτρο $\|z\|$. Ορίζουμε λοιπόν ως μέτρο του μιγαδικού z τον θετικό πραγματικό αριθμό:

$$|z| := \|z\| = \sqrt{\Re(z)^2 + \Im(z)^2}$$

Πρόταση 1.1: Κάθε αριθμός $z = (a, b)$ του $\mathbb{C} \setminus \{0\} = \mathbb{C}^*$ έχει ως πολλαπλασιαστικό αντίστροφο τον αριθμό:

$$\frac{1}{z} := \frac{a}{a^2 + b^2} + \frac{-b}{a^2 + b^2} i$$

Απόδειξη: Πράγματι, εξ' ορισμού του πολλαπλασιασμού:

$$\left(\frac{a}{a^2 + b^2} + \frac{-b}{a^2 + b^2} i \right) \cdot (a + bi) = \left(\frac{a^2}{a^2 + b^2} + \frac{b^2}{a^2 + b^2} \right) + \left(\frac{-ab}{a^2 + b^2} + \frac{ba}{a^2 + b^2} \right) i = 1$$

Από τη μεταθετικότητα της «·» έπειται το ζητούμενο, αφού ισχύει και το ότι:

$$(a + bi) \cdot \left(\frac{a}{a^2 + b^2} + \frac{-b}{a^2 + b^2} i \right) = 1$$

□

Η ύπαρξη του πολλαπλασιαστικού αντιστρόφου στην επέκταση είναι πολύ ενδιαφέρουσα ιδιότητα. Όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο, η ύπαρξη του πολλαπλασιαστικού αντιστρόφου επιτρέπει έναν πιο «άμεσο» ορισμό παραγώγου στο $\mathbb{R}^2 = \mathbb{C}$. Σε μαθήματα πολυμεταβλητού απειροστικού λογισμού / γεωμετρικής ανάλυσης ορίζαμε την παράγωγο (γενικά) μέσω υπερεπιπέδων (του διαφορικού σ' ένα σημείο), μιας και δεν μπορούσαμε να διαιρέσουμε με διάνυσμα. Στους μιγαδικούς όμως η ποσότητα:

$$\frac{f(z + h) - f(z)}{h}, \quad z \in \mathbb{C}, \quad h \in \mathbb{C}^*$$

έχει νόημα.

Μια έννοια που θα εμφανίζεται συχνά στη μετέπειτα ανάλυσή μας είναι η έννοια των συζυγών μιγαδικών αριθμών, δηλαδή των μιγαδικών αριθμών που είναι ανάκλαση ενός μιγαδικού αριθμού ως προς την πραγματική ευθεία.

Ορισμός 1.6: (Συζυγής μιγαδικός αριθμός). Ορίζουμε ως συζυγή μιγαδικό αριθμό του z τον \bar{z} , ο οποίος είναι συμμετρικός του z ως προς την ευθεία $\underline{x}x'$. Ειδικότερα:

$$\bar{z} := \Re(z) - \Im(z)i$$

Μερικές χρήσιμες ιδιότητες που προκύπτουν με πράξεις και που θα χρησιμοποιούμε είναι οι ακόλουθες:

Παρατήρηση 1.3: (Ιδιότητες της συζυγίας). Για κάθε (ενδεχομένως μη μηδενικούς) μιγαδικούς αριθμούς z και w ισχύουν οι σχέσεις:

- $\overline{(\bar{z})} = z$
- $z \cdot \bar{z} = |z|^2$
- $\frac{1}{z} = \overline{\left(\frac{1}{\bar{z}}\right)}$
- $\overline{z^n} = \overline{z}^n, n \in \mathbb{N}$
- $\overline{z \cdot w} = \overline{z} \cdot \overline{w}$
- $\overline{z + w} = \overline{z} + \overline{w}$
- $\overline{\frac{z}{w}} = \overline{\left(\frac{\bar{z}}{w}\right)}$

1.3 Η γεωμετρία των μιγαδικών αριθμών

Σε αυτό το σημείο θα αναφέρουμε βασικές γεωμετρικές ιδιότητες των μιγαδικών αριθμών, που θα χρησιμεύσουν στο υπόλοιπο αυτών των σημειώσεων. Εξάλλου η γεωμετρικοποίηση των μιγαδικών αριθμών, όπως και των πραγματικών, θα διευκολύνει την κατανόησή μας και θα επιτρέψει την ανάπτυξη κάποιων αποτελεσμάτων κι εννοιών.

Οι μιγαδικοί αριθμοί $(a, b) = a + ib$ έχουν οριστεί ως σημεία του καρτεσιανού επιπέδου (με μια επιπλέον αλγεβρική δομή, που τους καθιστούν σώμα). Ο ορισμός λοιπόν επιτρέπει την έκφραση των μιγαδικών αριθμών μέσω πολικών συντεταγμένων, την οποία ονομάζουμε *τριγωνομετρική αναπαράσταση*. Έτσι, ένας μιγαδικός αριθμός z μπορεί να γραφεί:

$$z = \rho_z (\cos \theta_z + i \sin \theta_z)$$

για κάποια ακτίνα $\rho_z \geq 0$ και γωνία $\theta_z \in \mathbb{R}$. Είναι ίσως ήδη γνωστό ότι αυτή δεν είναι μια μονοσήμαντη γραφή, αφού οποιαδήποτε γωνία:

$$\theta_z \in \left\{ 2\kappa\pi + \arccos\left(\frac{\Re(z)}{|z|}\right) \mid \kappa \in \mathbb{Z} \right\}$$

(δοθέντως του ρ_z) εκφράζει τον ίδιο μιγαδικό αριθμό z . Αν αποσκοπούμε σε αυτό το μονοσήμαντο, είναι σκόπιμο να δώσουμε τον ακόλουθο ορισμό:

Ορισμός 1.7: (Όρισμα μιγαδικού αριθμού). Η γωνία θ_z του μιγαδικού αριθμού z δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένη. Ειδικότερα, κάθε πραγματικός αριθμός στο σύνολο:

$$\left\{ 2\kappa\pi + \arccos\left(\frac{\Re(z)}{|z|}\right) \mid \kappa \in \mathbb{Z} \right\}$$

μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην τριγωνομετρική αναπαράσταση του αριθμού.

Για να εξασφαλιστεί λοιπόν το μονοσήμαντο της γωνίας, ορίζουμε τη συνάρτηση:

$$\arg : \mathbb{C}^* \rightarrow (-\pi, \pi] \text{ με } z \mapsto \begin{cases} \arccos\left(\frac{\Re(z)}{|z|}\right), & \text{εάν } z \in \mathbb{C}_+^* \\ -\arg(\bar{z}), & \text{εάν } z \in \mathbb{C}^* \setminus \mathbb{C}^+ \end{cases}$$

(Ουσιαστικά χρησιμοποιούμε μόνο γωνίες με πλευρά Ox και μέτρο στο $(-\pi, \pi]$). Η τριγωνομετρική μορφή του z για $\theta_z = \arg(z)$ είναι μονοσήμαντη. Αυτή η ιδιότητα θα δειχθεί με την παρατήρηση που ακολουθεί.

Παρατήρηση 1.4: Η συνάρτηση $\arg : \mathbb{C}^* \rightarrow (-\pi, \pi]$ έχει αμφιμοσήμαντο περιορισμό $\arg|_{\partial S(0,1)}$, όπου $\partial S(0,1) = \{z \in \mathbb{R}^2 \mid ||z|| = 1\} = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| = 1\}$. Ως πόρισμα, κάθε αριθμός $z \in \mathbb{C}$ έχει μοναδική τριγωνομετρική αναπαράσταση με $\theta_z = \arg(z)$.

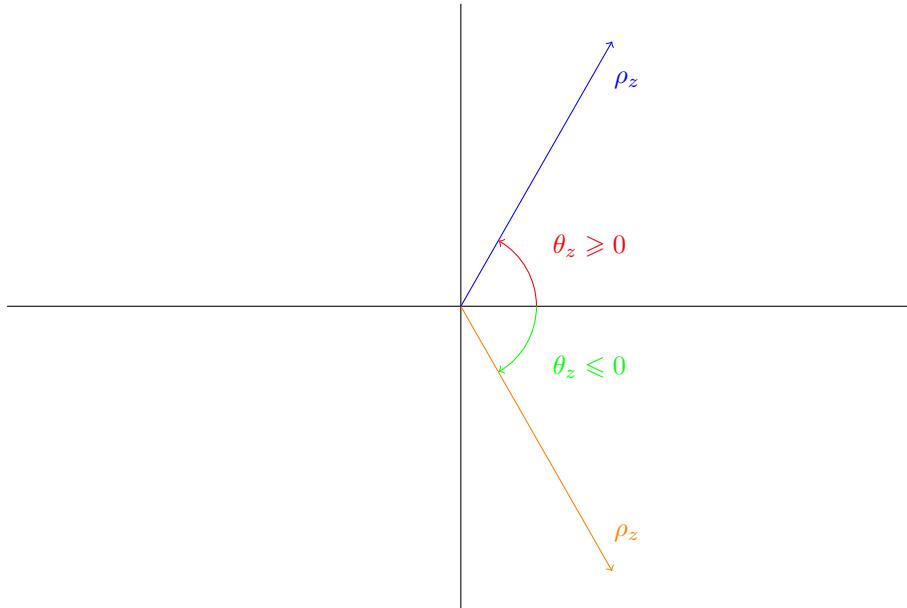
Απόδειξη: Για κάθε $\theta \in [0, \pi]$ επιλέγουμε σημείο $z \in \partial S(0,1) \cap \mathbb{C}^+$ τέτοιο ώστε $\angle((1,0), z) = \theta$. Αντίστοιχα, για κάθε $\theta \in (-\pi, 0)$ επιλέγουμε σημείο $z \in \partial S(0,1) \cap (\mathbb{C} \setminus \mathbb{C}^+)$ τέτοιο ώστε $\angle((1,0), z) = \theta$. Ορίζουμε τη συνάρτηση $\psi(\theta) = z$ και παρατηρούμε ότι αυτή αποτελεί αντίστροφη της \arg . Αυτό δείχνει το αμφιμοσήμαντο της $\arg|_{\partial S(0,1)}$.

Το πόρισμα είναι άμεση συνέπεια του γεγονότος ότι:

$$\forall z \in \mathbb{C}^*, z = |z| \cdot \frac{z}{|z|} \text{ και } \frac{z}{|z|} \in \partial S(0,1)$$

□

Πολλές φορές θα γράφουμε θ_z αντί $\arg(z)$, μιας και είναι ευκολότερο στη γραφή.



Αν θυμηθούμε την πρόσθεση διανυσμάτων από το σχολείο, είναι μάλλον σχετικά εύκολο να προδώσουμε μια γεωμετρική εποπτεία στην πρόσθεση μιγαδικών αριθμών (ως πρόσθεση διανυσμάτων). Τι γίνεται όμως με τον πολλαπλασιασμό;

Είδαμε ότι, με αυτήν την επιπρόσθετη δομή στο επίπεδο, κανείς είναι δυνατόν να πολλαπλασιάσει και να διαιρέσει «σημεία» του επιπέδου. Με καρτεσιανές συντεταγμένες, ο πολλαπλασιασμός δύο μιγαδικών αριθμών z και w είδαμε ότι ορίζεται ως εξής:

$$z \cdot w = (\Re(z) + i\Im(z)) \cdot (\Re(w) + i\Im(w)) = \Re(z) \cdot \Re(w) - \Im(z) \cdot \Im(w) + i(\Re(z) \cdot \Im(w) + \Re(w) \cdot \Im(z))$$

το οποίο, εκ πρώτης όψεως, δεν εμφανίζει κάποια γεωμετρική εποπτεία. «Μετασχηματίζοντας» τα z , w στην τριγωνομετρική τους μορφή, είναι δυνατόν να παρθεί ένας τύπος ο οποίος μπορεί να εκφραστεί γεωμετρικά.

Πρόταση 1.2: Έστω $z, w \in \mathbb{C}$ με τριγωνομετρικές αναπαραστάσεις:

$$z = \rho_z(\cos \theta_z + i \sin \theta_z) \text{ και } w = \rho_w(\cos \theta_w + i \sin \theta_w)$$

Τότε το γινόμενο $z \cdot w$ είναι:

$$z \cdot w = \rho_z \rho_w (\cos(\theta_z + \theta_w) + i \sin(\theta_z + \theta_w))$$

Δηλαδή, γεωμετρικά μιλώντας, ο πολλαπλασιασμός στρέφει τους μιγαδικούς αριθμούς και κάνει συστολοδιαστολή (rescaling).

Απόδειξη: Πράγματι, έχουμε ότι:

$$\begin{aligned} z \cdot w &= \rho_z \rho_w (\cos \theta_z + i \sin \theta_z) \cdot (\cos \theta_w + i \sin \theta_w) \\ &= \rho_z \rho_w (\cos \theta_z \cos \theta_w - \sin \theta_z \sin \theta_w + i(\cos \theta_z \sin \theta_w + \sin \theta_z \cos \theta_w)) \end{aligned}$$

και χρησιμοποιώντας τις γνωστές σχέσεις:

$$\cos(\theta_z + \theta_w) = \cos \theta_z \cos \theta_w - \sin \theta_z \sin \theta_w \text{ και } \sin(\theta_z + \theta_w) = \cos \theta_z \sin \theta_w + \sin \theta_z \cos \theta_w$$

παίρνουμε το ζητούμενο αποτέλεσμα:

$$z \cdot w = \rho_z \rho_w (\cos(\theta_z + \theta_w) + i \sin(\theta_z + \theta_w))$$

□

Ένα άμεσο αλλά πολύ σημαντικό πόρισμα του παραπάνω είναι το ακόλουθο θεώρημα, το οποίο συσχετίζει τις δυνάμεις των μιγαδικών αριθμών με τη μορφή των κανονικών πολυγώνων.

Θεώρημα 1.1: (**Τύπος του de Moivre**). Έστω $z \in \mathbb{C}$ ένας μιγαδικός αριθμός με τριγωνομετρική αναπαράσταση:

$$z = \rho_z (\cos \theta_z + i \sin \theta_z)$$

Τότε, για κάθε $n \in \mathbb{N}$:

$$z^n = \rho_z^n (\cos(n \cdot \theta_z) + i \sin(n \cdot \theta_z))$$

Απόδειξη: Από την **Πρόταση 1.2**, με επαγωγή.

□

Παρατήρηση 1.5: Ειδικά για τους αριθμούς $z = \cos(2\pi/n) + i \sin(2\pi/n) \in \partial S(0, 1)$, για τα διάφορα $n \in \mathbb{N}$ οι αριθμοί z^n είναι κορυφές n -γώνου στον κύκλο $\partial S(0, 1)$ (εκτός όταν $n = 1$ ή $n = 2$, όπου είναι σημείο και αντιδιαμετρικά σημεία αντίστοιχα).

Απόδειξη: Αυτό συμβαίνει διότι ο z έχει μέτρο 1 (άρα και όλες του οι δυνάμεις), κι επίσης τα ορίσματα των z^n είναι (διαδοχικά):

$$\frac{2\pi}{n}, 2 \cdot \frac{2\pi}{n}, 3 \cdot \frac{2\pi}{n}, \dots, n \cdot \frac{2\pi}{n} = 2\pi$$

□

Αυτό το αποτέλεσμα θα το χρησιμοποιήσουμε για να μελετήσουμε εξισώσεις της μορφής $z^n = w$ - θα δούμε ότι οι λύσεις τέτοιων εξισώσεων είναι κορυφές n -γώνου.

1.4 Πολυωνυμικές εξισώσεις

Θεώρημα 1.2: (**n -οστές μιγαδικές ρίζες**). Στο μιγαδικό επίπεδο \mathbb{C} κάθε εξισωση (ως προς z):

$$z^n = w \text{ (με } n \geq 2 \text{ και } w \in \mathbb{C}^*)$$

έχει ακριβώς n το πλήθος λύσεις, οι οποίες σχηματίζουν διάμετρο -όταν $n = 2$ - και n -γωνο -όταν $n > 2$ - στον κύκλο $\partial S(0, \sqrt[n]{|w|})$.

Απόδειξη: Θεωρούμε την ισοδύναμη εξισωση:

$$\left(\frac{z}{\sqrt[n]{|w|}} \right)^n = \frac{w}{|w|}$$

και χρησιμοποιούμε την **Παρατήρηση 1.5**. Τότε οι λύσεις της εν λόγω ισοδύναμης εξισωσης βρίσκονται σε διάμετρο ή είναι κορυφές n -γώνου στον κύκλο $\partial S(0, 1)$. Αν τώρα $z_0 / \sqrt[n]{|w|} \in \partial S(0, 1)$ είναι οποιαδήποτε λύση της ισοδύναμης εξισωσης, η $z_0 \in \partial(0, \sqrt[n]{|w|})$ είναι λύση της αρχικής εξισωσης, το οποίο αποδεικνύει ότι οι λύσεις z_0 βρίσκονται σε διάμετρο ή πολύγωνο στον κύκλο $\partial S(0, \sqrt[n]{|w|})$.

□

Προς το παρόν λοιπόν είμαστε σε θέση να λύσουμε εξισώσεις της μορφής $z^n = w$. Ειδικά για την περίπτωση $n = 2$, είναι σκόπιμο (για ιστορικούς και όχι λόγους) να δούμε και την «καρτεσιανή» προσέγγιση της λύσης $z^2 = w$, και στην συνέχεια τη λύση της $z^2 + c_1 z + c_2 = 0$ (που είναι μιγαδικό τριώνυμο). Θα συμπεράνουμε ότι στα μιγαδικά τριώνυμα (όπως και στα πραγματικά) υπάρχουν τύποι εύρεσης λύσεων, που συντίθενται με «απλές» συναρτήσεις (δυνάμεις, ρίζες, προσθέσεις).

Παρατήρηση 1.6: Οι δευτεροβάθμιες πολυωνυμικές εξισώσεις (ως προς z), $z^2 = a + ib$ ($a, b \in \mathbb{R}$), έχουν λύσεις:

$$z = \begin{cases} \pm \left[\sqrt{\frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{2}} + i \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{a^2 + b^2} - a}{2}} \right], & \text{εάν } b \geq 0 \\ \pm \left[\sqrt{\frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{2}} - i \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{a^2 + b^2} - a}{2}} \right], & \text{εάν } b < 0 \end{cases}$$

Απόδειξη: Θεωρούμε $z = x + iy$, $(x, y \in \mathbb{R})$ και αναπτύσσουμε την πολυωνυμική εξισωση σε:

$$x^2 - y^2 + 2xyi = a + bi \Rightarrow \begin{cases} x^2 - y^2 = a \\ 2xy = b \end{cases}$$

Εάν $b = 0$, η περίπτωση ανάγεται στους πραγματικούς αριθμούς. Εάν $b \neq 0$ τότε $x, y \neq 0$, οπότε η ποσότητα $y = b/2x$ έχει νόημα. Με αντικατάσταση στο προκύπτον σύστημα παίρνουμε την ακόλουθη δευτεροβάθμια εξίσωση (ως προς x^2):

$$x^4 - \frac{b^2}{4} = ax^2 \Rightarrow x^4 - ax^2 - b^2 = 0$$

η οποία έχει λύσεις:

$$x^2 = \frac{a \pm \sqrt{a^2 + b^2}}{2} \Rightarrow x = \pm \sqrt{\frac{a \pm \sqrt{a^2 + b^2}}{2}}$$

Για το y παρατηρούμε (κι αυτό για να αποφύγουμε τις πολλές πράξεις) ότι $x = b/2y$ κι επιπλέον ότι $y^2 - x^2 = -a$ (αυτό εμφανίζει κάποιου είδους συμμετρία με την προηγούμενη περίπτωση). Οπότε εφαρμόζουμε συμμετρικά τον τύπο του x για a το $-a$, και λαμβάνουμε τελικά ότι:

$$y = \pm \sqrt{\frac{\sqrt{a^2 + b^2} - a}{2}}$$

Έπειτα πλέον η γενική λύση της πολυωνυμικής εξίσωσης:

$$z = \begin{cases} \pm \left[\sqrt{\frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{2}} + i \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{a^2 + b^2} - a}{2}} \right], & \text{εάν } b \geq 0 \\ \pm \left[\sqrt{\frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{2}} - i \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{a^2 + b^2} - a}{2}} \right], & \text{εάν } b < 0 \end{cases}$$

η οποία -σημειωτέον- επαλυθεύεται και στην περίπτωση $b = 0$ (ακόμη κι αν τη βρήκαμε υποθέτοντας $b \neq 0$). □

Παρατήρηση 1.7: Οι δευτεροβάθμιες πολυωνυμικές εξισώσεις (ως προς z), $z^2 + c_1 z + c_2 = 0$ ($c_1, c_2 \in \mathbb{C}$), έχουν λύσεις:

$$z = -\frac{c_1}{2} + z_0$$

όπου z_0 είναι λύσεις της $z^2 = c_1^2/4 - c_2$.

Απόδειξη: Όπως και στην πραγματική περίπτωση, μπορούμε να γράψουμε:

$$z^2 + \frac{2c_1}{2} z + \frac{c_1^2}{4} - \frac{c_1^2}{4} + c_2 = 0 \Rightarrow \left(z + \frac{c_1}{2} \right)^2 = \frac{c_1^2}{4} - c_2$$

κι έπειτα να χρησιμοποιήσουμε την **Παρατήρηση 1.6**. □

Έτοι λοιπόν αποδεικνύεται η ύπαρξη κλειστού τύπου για την επίλυση δευτεροβάθμιων εξισώσεων. Είναι δυνατόν κανείς να βρει κλειστό τύπο και για τις τριτοβάθμιες εξισώσεις, πρώτα όμως χρειάζεται ένα λήμμα.

Λήμμα 1.1: Έστω $P(z) = z^3 + c_1 z^2 + c_2 z + c_3$ ($c_1, c_2, c_3 \in \mathbb{C}$) ένα τριτοβάθμιο πολυώνυμο. Με τον αμφιμονοσήμαντο μετασχηματισμό:

$$z \mapsto z - \frac{b}{3a}$$

το P αποκτά τη μορφή $P^*(z) = z^3 + c_2^* z + c_3^*$, ($c_2^*, c_3^* \in \mathbb{C}$). Το P^* ονομάζεται συνεπτυγμένη κυβική μορφή του P . ■

Επειδή ο μετασχηματισμός είναι αμφιμονοσήμαντος, οι λύσεις της $P^*(z) = 0$ δίνουν -μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού- τις λύσεις της $P(z) = 0$. ■

Θεώρημα 1.3: (Λύσεις τριτοβάθμιων εξισώσεων). Υπάρχει κλειστός τύπος που βρίσκει τις λύσεις κάθε τριτοβάθμιας πολυωνυμικής εξίσωσης:

$$P(z) = z^3 + c_1 z^2 + c_2 z + c_3 = 0$$

Μάλιστα, στους μιγαδικούς, κάθε τέτοια εξίσωση έχει τρεις πραγματικές λύσεις, ή μία πραγματική λύση και δύο μιγαδικές.

Απόδειξη: Δεδομένου του **Λήμματος 1.1**, μπορούμε να μετασχηματίσουμε την $P(z) = 0$ στην $P^*(z) = 0$ και να μελετήσουμε την τελευταία αντί της πρώτης. Τότε, λύσεις της $P(z) = 0$ θα είναι οι:

$$z = z_0 + \frac{b}{2a}, \text{ όπου } z_0 \text{ είναι λύση της } P^*(z) = 0$$

Έστω λοιπόν η πολυωνυμική εξίσωση $P^*(z) = z^3 + az + b = 0$. Θεωρούμε τον μετασχηματισμό $z = u + v$ με $uv = -a/3$ και η συνεπυγμένη μορφή $P^*(z) = 0$ γίνεται:

$$\begin{aligned} 0 &= P^*(u + v) \\ &= (u + v)^3 + a(u + v) + b \\ &= u^3 + 3u^2v + 3uv^2 + v^3 + a(u + v) + b \\ &= u^3 - a(u + v) + a(u + v) + v^3 + b \\ &= u^3 - \frac{a^3}{27} \cdot \frac{1}{u^3} + b \end{aligned}$$

Κατά συνέπεια:

$$u^6 + bu^3 - \frac{a^3}{27} = 0$$

το οποίο είναι τριώνυμο ως προς u^3 . Το τριώνυμο αυτό έχει λύσεις που προσδιορίζονται σε κλειστή μορφή, βάση της **Παρατήρηση 1.7**. Καθεμία από τις προηγούμενες λύσεις, εφόσον τα u, v είναι υψηλέντα εις την τρίτη, είναι εξίσωσεις, που έχουν (τουλάχιστον) μια λύση στους πραγματικούς. Μάλιστα οι:

$$\text{sign}(u^3) \cdot \sqrt[3]{|u^3|}, \text{ sign}(v^3) \cdot \sqrt[3]{|v^3|}$$

είναι λύσεις. Ας υποθέσουμε λοιπόν s την πραγματική ρίζα της u^3 και t την πραγματική ρίζα της v^3 . Σύμφωνα με το **Θεώρημα 1.2**, οι άλλες δύο μιγαδικές λύσεις των εξίσωσεων των u, v βρίσκονται στις δύο μιγαδικές κορυφές των ισοσκελών τριγώνων με κορυφές s και t αντίστοιχα, τα οποία είναι εγγεγραμμένα στους κύκλους $\partial S(O, |s|)$ και $\partial S(O, |t|)$. Συγκεκριμένα:

$$u = \begin{cases} \left(-\frac{1}{2} + \frac{i\sqrt{3}}{2} \right) \cdot s \dot{\mathbf{i}} \\ \left(-\frac{1}{2} - \frac{i\sqrt{3}}{2} \right) \cdot s \dot{\mathbf{i}} \end{cases}$$

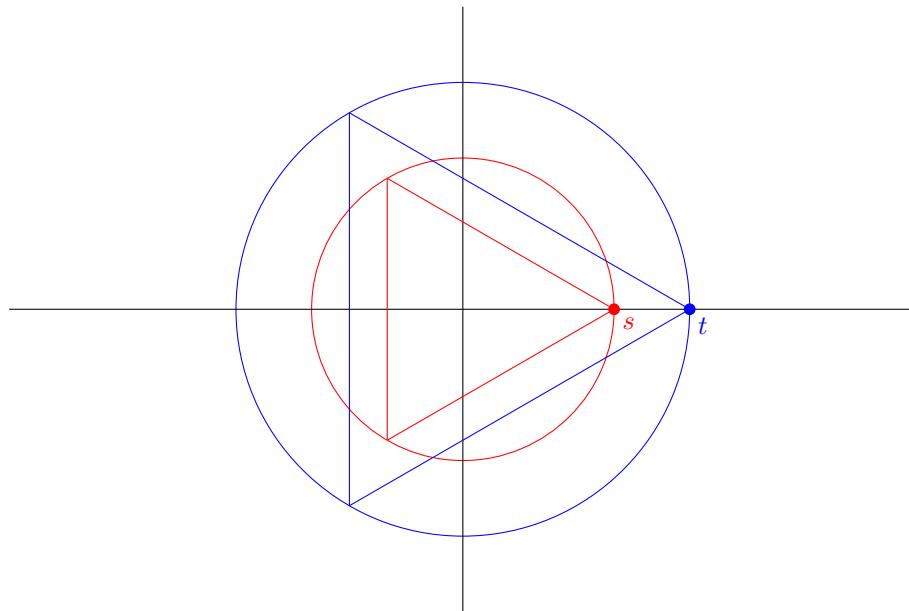
$$v = \begin{cases} \left(-\frac{1}{2} + \frac{i\sqrt{3}}{2} \right) \cdot t \dot{\mathbf{i}} \\ \left(-\frac{1}{2} - \frac{i\sqrt{3}}{2} \right) \cdot t \dot{\mathbf{i}} \end{cases}$$

(όπου ο πολλαπλασιασμός των s, t γίνεται ώστε να «στραφούν» οι λύσεις s και t στις άλλες κορυφές των ισοσκελών τριγώνων, σύμφωνα με την **Πρόταση 1.2**).

Σε αυτό το σημείο πρέπει να παρατηρηθεί ότι δεν δίνουν όλοι οι 9 συνδυασμοί των u, v λύσεις της εξίσωσης $z^3 + az + b = 0$ (δηλ. $u + v = z$, $uv = -a/3$). Συγκεκριμένα, μόνο οι ακόλουθες αποτελούν λύσεις της εν λόγω εξίσωσης:

$$\begin{aligned} z_0 &= s + t \\ z_1 &= \left(-\frac{1}{2} + \frac{i\sqrt{3}}{2} \right) \cdot s + \left(-\frac{1}{2} - \frac{i\sqrt{3}}{2} \right) \cdot t \\ z_2 &= \left(-\frac{1}{2} - \frac{i\sqrt{3}}{2} \right) \cdot s + \left(-\frac{1}{2} + \frac{i\sqrt{3}}{2} \right) \cdot t \end{aligned}$$

Μάλιστα, $z_0 \in \mathbb{R}$ και $z_1, z_2 \in \mathbb{C}$.



□

Είναι ενδιαφέρον -αν και κουραστικό- κανείς να μελετήσει πώς προσδιορίζονται οι λύσεις μίας τεταρτοβάθμιας εξίσωσης, σαν λογικό βήμα από τις τριτοβάθμιες. Ακόμη πιο ενδιαφέρον είναι ότι δεν υπάρχει κλειστός τύπος για την επίλυση πεμπτοβάθμιων ή μεγαλύτερου βαθμού εξίσωσεων. Εμείς δεν θα αναφερθούμε στο πώς αποδεικνύεται αυτή η μη ύπαρξη, καθώς μια τέτοια παρουσίαση θα απαιτούσε τεχνικές της Θεωρίας Galois. Παρόλα αυτά, παραπέμπουμε στο (Ma), σελ. 388-389.

Πάντως τουλάχιστον είναι δυνατόν να αποδειχθεί ότι κάθε n -οστού ($n \geq 1$) βαθμού πολυωνυμική εξίσωση έχει ακριβώς n (όχι κατ' ανάγκη διακεκριμένες) λύσεις.

Θεώρημα 1.4: (Θεμελιώδες Θεώρημα της άλγεβρας). Κάθε πολυωνυμική εξίσωση $P(z) = 0$ βαθμού $n \geq 1$ (με μιγαδικούς συντελεστές) έχει τουλάχιστον μία ρίζα στο \mathbb{C} .

Κατ' επέκταση, λειτουργώντας επαγγειλικά, η $P(z) = 0$ έχει ακριβώς n (όχι κατ' ανάγκη διακεκριμένες) λύσεις.

Απόδειξη: Έστω P ένα μιγαδικό πολυώνυμο, το οποίο γράφεται ως:

$$z^n + \sum_{k+1 \in [n]} c_k z^k, \text{ με } c_k \in \mathbb{C}$$

Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι η μελέτη αρκεί να περιοριστεί στα μονικά πολυώνυμα, αφού ο μη μηδενικός μεγιστοβάθμιος συντελεστής μπορεί να διαιρέσει τα δύο μέλη της πολυωνυμικής εξίσωσης και να προσδώσει εξίσωση με μονικό πολυώνυμο μόνο.

Εφόσον κάθε όρος του πολυωνύμου είναι ουσιαστικά ένα διάνυσμα στο \mathbb{R}^2 , μπορούμε εφαρμόζοντας την τριγωνική ανισότητα, να πάρουμε ότι:

$$|P(z)| \geq |z|^n - \sum_{k+1 \in [n]} c_k |z|^k = |z|^n \left[1 - \sum_{k+1 \in [n]} \frac{c_k}{|z|^{n-k}} \right]$$

Παρατηρούμε ότι καθώς $|z| \rightarrow \infty$, ισχύει $|P(z)| \rightarrow \infty$. Επομένως, θα υπάρχει ένας αριθμός $r_0 \in \mathbb{R}_+^*$ τέτοιος ώστε:

$$\forall z \in \mathbb{C}, |z| > r_0 : |P(z)| > |P(w)| > 0, \text{ όπου } w \in \mathbb{C} : P(w) \neq 0$$

Θεωρούμε τον πραγματικό αριθμό $\mu = \min |P|(B(O, r_0))$. Ο αριθμός μ υπάρχει, αφού το σύνολο $B(O, r_0)$ είναι συμπαγές στο $\mathbb{C} = \mathbb{R}^2$ και η διανυσματική συνάρτηση $|P| : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ είναι συνεχής.

Ένα γνωστό λοιπόν Θεώρημα δίνει, αξιοποιώντας τις δύο παρατηρήσεις, ότι υπάρχει ελάχιστο στοιχείο μ το συνόλου $|P|(B(O, r_0))$. Το γεγονός ότι $\forall z \in B(O, r_0)^c$ ισχύει $|P(z)| > |P(w)| \geq \mu$ εξασφαλίζει ότι κάθε άλλη τιμή της συνάρτησης εκτός του $B(O, r_0)$ δεν μπορεί να γίνεται μικρότερη του μ . Επομένως, το

μ είναι επίσης το ελάχιστο στοιχείο του συνόλου $|P|(\mathbb{C})$.

Εφόσον λοιπόν $\mu = \min |P|(\mathbb{C})$, υπάρχει αριθμός $z_0 \in \mathbb{C}$ τέτοιος ώστε $|P|(z_0) = \mu$. Ισχυριζόμαστε ότι $P(z_0) = 0$.

Προς άτοπο υποθέτουμε ότι $P(z_0) \neq 0$ και θεωρούμε τη συνάρτηση:

$$Q(z) = \frac{|P(z + z_0)|}{|P(z_0)|} = 1 + \sum_{k \in [n]} a_k z^k$$

Ο σταθερός όρος 1 προκύπτει από το γεγονός ότι $Q(0) = 1$. Για τη συνάρτηση Q ισχύει $Q(z) \geq 1$, αφού το $|P(z_0)|$ είναι ελάχιστο.

Θεωρούμε κ τον ελάχιστο φυσικό αριθμό για τον οποίο $a_\kappa \neq 0$. Εάν $\zeta \in \mathbb{C}$ είναι ένας αριθμός τέτοιος ώστε $\zeta^\kappa = -\frac{|a_\kappa|}{a_\kappa}$, τότε η τιμή του Q υπολογιζόμενη στον αριθμό $r\zeta$, όπου $r > 0$, δίνει:

$$\begin{aligned} |Q(r\zeta)| &= \left| 1 + \overbrace{a_\kappa r^\kappa \zeta^\kappa}^{-|a_\kappa|r^\kappa} + \sum_{\kappa < k \leq n} a_k r^k \zeta^k \right| \\ &\leq |1 - |a_\kappa|r^\kappa| + \sum_{\kappa < k \leq n} |a_k r^k \zeta^k| \end{aligned}$$

Διαλέγουμε ακτίνα $0 < r < r_1 \in \mathbb{R}_+^*$ αρκετά μικρή, τέτοια ώστε $1 - |a_\kappa|r^\kappa > 0$, και κατ' επέκταση $|1 - |a_\kappa|r^\kappa| = 1 - |a_\kappa|r^\kappa$.

$$\begin{aligned} |Q(r\zeta)| &\leq 1 - |a_\kappa|r^\kappa + \sum_{\kappa < k \leq n} |a_k r^k \zeta^k| \\ &= 1 - |a_\kappa|r^\kappa + \sum_{\kappa < k \leq n} |a_k r^k| \\ &= 1 - r^\kappa \left(|a_\kappa| - \sum_{\kappa < k \leq n} |a_k r^{k-\kappa}| \right) \end{aligned}$$

Και πάλι, μπορούμε να διαλέξουμε ακτίνα $0 < r < r_2 \leq r_1 \in \mathbb{R}_+^*$ τέτοια ώστε $|a_\kappa| - \sum_{\kappa < k \leq n} |a_k r^{k-\kappa}| = \theta > 0$. Κατ' επέκταση:

$$Q(r\zeta) \leq 1 - r^\kappa \theta < 1 \Rightarrow Q(r\zeta) < 1$$

Αυτό είναι προφανώς άτοπο, το οποίο σημαίνει ότι $P(z_0) = 0$. Το θεώρημα λοιπόν αποδεικνύεται. \square

Παρά το ότι ονομάζεται «Θεμελιώδες Θεώρημα της άλγεβρας» δεν χρησιμοποιείται και πολύ άλγεβρα στην αρόδειξή του. Ακόμη μία αναλυτική απόδειξη θα δόσουμε αργότερα, όταν θα έχουμε περισσότερα εργαλεία στη διάθεσή μας. Μια αλγεβρική απόδειξη (με Θεωρία Galois) μπορεί να βρεθεί στο (Ma), σελ. 404-405.

1.5 Βασικές συναρτήσεις στο μιγαδικό επίπεδο

1.5.1 Η n -οστή ρίζα

Στο **Θεώρημα 1.2** είδαμε ότι η εξίσωση (ως προς z), $z^n = w$ ($w \in \mathbb{C}^*$), έχει ακριβώς n διακεκριμένες λύσεις. Όπως και στους πραγματικούς αριθμούς (που η $x^n = y$ μπορεί να έχει θετική κι αρνητική λύση) δεν μπορούμε να ορίσουμε συνάρτηση ρίζας $\sqrt[n]{w} = \text{ρίζα της } z^n = w$. Γι' αυτό θα ορίζουμε ως n -οστή ρίζα του w την πρώτη (με αριστερόστροφο προσανατολισμό) ρίζα της $z^n = w$, ώστε να εξασφαλίζεται το «καλώς ορισμένο» της συνάρτησης.

Ορισμός 1.8: (n -οστή ρίζα). Έστω $n \geq 1$ και $w \in \mathbb{C}$. Ορίζουμε ως n -οστή ρίζα του w τον αριθμό:

$$\sqrt[n]{w} = \begin{cases} 0, & \text{εάν } w = 0 \\ \sqrt[n]{|w|} \left(\cos(\theta_w/n) + i \sin(\theta_w/n) \right), & \text{εάν } w \neq 0 \end{cases}$$

ο οποίος (όταν $w \neq 0$) είναι η πρώτη, με αριστερόστροφο προσανατολισμό, λύση της $z^n = w$.

Δοθέντος του προηγούμενου ορισμού, μπορούμε να δούμε την ακόλουθη γεωμετρική ιδιότητα της ρίζας.

Πρόταση 1.3: Η n -οστή ρίζα ως συνάρτηση είναι ένας $1 - 1$ και επί μετασχηματισμός του μιγαδικού επιπέδου \mathbb{C} , προς τη γωνία:

$$\angle(\lambda, \bar{\lambda}) \cup \underline{O\lambda}$$

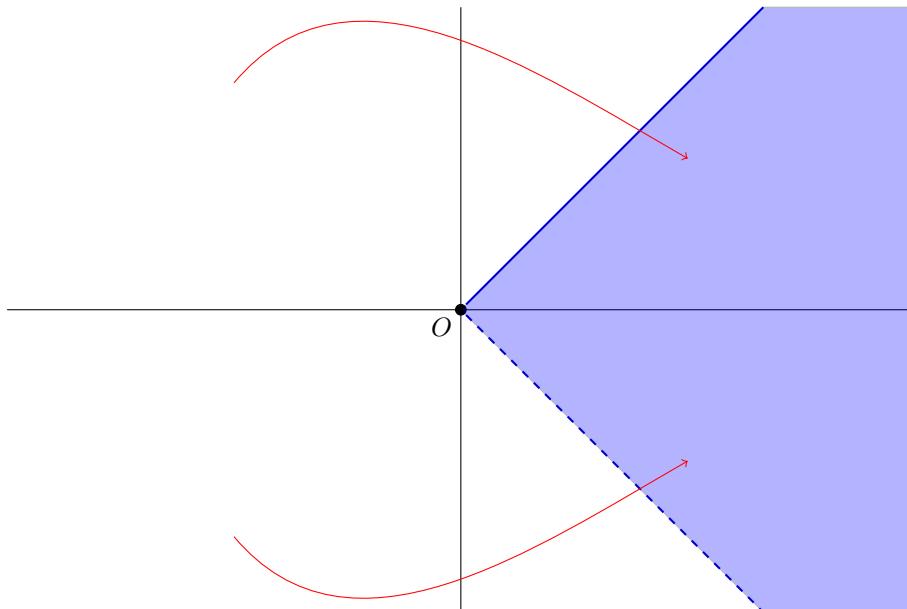
όπου $\lambda = \cos(\pi/n) + i \sin(\pi/n)$.

Απόδειξη: Πράγματι, ο τύπος του de Moivre μας εξασφαλίζει το επί της συνάρτησης:

$$\sqrt[n]{\cdot} : \mathbb{C} \rightarrow \angle(\lambda, \bar{\lambda}) \cup \underline{O\lambda}$$

μιας και αν $z = \rho_z(\cos \theta_z + i \sin \theta_z) \in \angle(\lambda, \bar{\lambda}) \cup \underline{O\lambda}$, τότε η τιμή $\sqrt[n]{z^n} = \sqrt[n]{\rho_z^n (\cos(n\theta_z) + i \sin(n\theta_z))}$ είναι z .

Όσον αφορά το $1 - 1$, εάν u, v είναι δύο μιγαδικοί που ικανοποιούν την εξίσωση (ως προς z), $z^n = w$, τότε αυτοί βρίσκονται στο ίδιο πολύγωνο (n -γωνο) λύσεων. Εξ' ορισμού της ρίζας, $u = v$.



□

Γενικά οι μιγαδικές συναρτήσεις ως μετασχηματισμοί του επιπέδου είναι κάτι που χρησιμοποιείται αρκετά. Μάλιστα μερικές απ' αυτές έχουν καλές ιδιότητες, όπως η διατήρηση των γωνιών.

1.5.2 Η εκθετική συνάρτηση

Εδώ θα κάνουμε περισσότερη ανάλυση με σκοπό να παρουσιάσουμε φυσιολογικά την επέκταση της εκθετικής συνάρτησης στο επίπεδο. Μάλιστα θα ξεκινήσουμε με έναν όχι μαθηματικό, αλλά φυσικό τρόπο προσέγγισης της εν λόγω έννοιας, που θα δικαιολογίσει (ευελπιστούμε) τον ορισμό που θα ακολουθήσει.

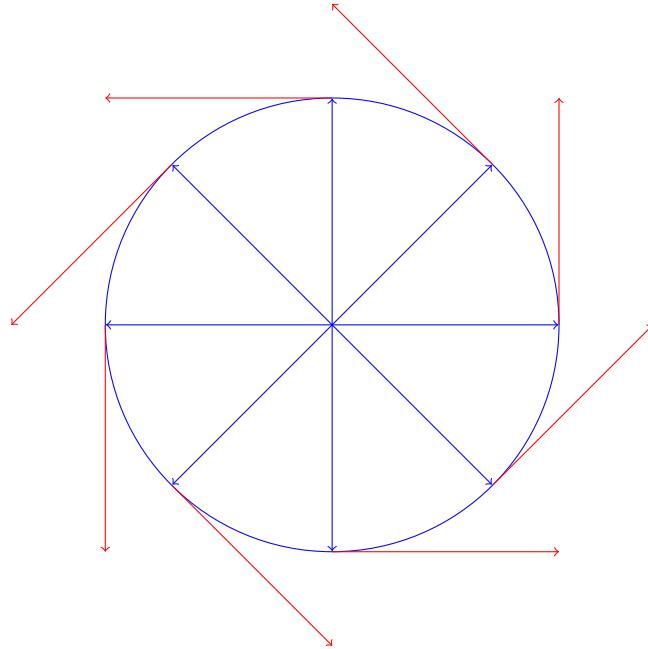
Εν τω μεταξύ εδώ αφήστε τη φαντασία σας κάπως ελεύθερη, και μην περιορίζεστε από το ότι δεν έχουμε ακόμη ορίσει παραγώγους ή ό,τι άλλο χρειαστεί. Εξάλλου, αυτό που θα ακολουθήσει είναι διαισθητικό και όχι μαθηματικό.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε καταφέρει να ορίσουμε με κάποιον τρόπο την e^{s+it} ($s, t \in \mathbb{R}$), ως μιγαδική επέκταση της αντίστοιχης πραγματικής. Τότε κατ' αρχάς $e^{s+it} = e^s \cdot e^{it}$, με το e^s να είναι ορισμένο (στους πραγματικούς), οπότε χρειάζεται η ποσότητα e^{it} να μελετηθεί. Αν παραγγίσουμε την e^{it} ως προς

t , τότε θα έχουμε:

$$\frac{de^{it}}{dt} = i \cdot e^{it}$$

το οποίο δείχνει, βάσει της **Πρότασης 1.2**, ότι η «ταχύτητα» ενός κινητού με «θέση» e^{it} είναι κάθε χρονική στιγμή t κάθετη στη «θέση». Παρατηρήστε ότι $i = \cos(\pi/2) + i \sin(\pi/2) = (0, 1)$, οπότε ο πολλαπλασιασμός με i στρέφει κατά $\pi/2$.



Επιπλέον, το μέτρο της ταχύτητας και της θέσης είναι σταθερά και ισούνται. Οπότε η τροχιά του κινούμενο σώματος θα είναι κύκλος, ο οποίος θα έχει ακτίνα 1 (αφού $e^{i0} = e^0 = 1$) και θα εκφράζεται μέσω μίας εξίσωσης:

$$e^{it} = \cos(at) + i \sin(at)$$

για κάποιο $a \in \mathbb{R}$. Επειδή θέλουμε τη χρονική στιγμή 0 η ταχύτητα να είναι 1 κατά μέτρο, έπειτα ότι $a = 1$ και κατ' επέκταση:

$$e^{it} = \cos t + i \sin t$$

Έχοντας αυτή τη διαισθητική παρατήρηση υπόψη, μπορούμε να προχωρίσουμε σε έναν ορισμό.

Ορισμός 1.9: (Εκθετική συνάρτηση). Ορίζουμε ως εκθετική συνάρτηση $e^{(\cdot)} : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ τη συνάρτηση με τύπο:

$$e^z = e^{\Re(z)} (\cos \Im(z) + i \sin \Im(z))$$

Μερικές φορές συμβολίζουμε $\exp = e^{(\cdot)}$.

Παρατήρηση 1.8: Η εκθετική συνάρτηση του **Ορισμού 1.9** έχει ιδιότητες ανάλογες της πραγματικής εκθετικής συνάρτησης. Συγκεκριμένα:

- i. Η συνάρτηση $e^{(\cdot)}|_{\mathbb{R}}$ είναι η πραγματική εκθετική.
- ii. Για κάθε $z, w \in \mathbb{C}$ έχουμε $e^{z+w} = e^z \cdot e^w$
- iii. Η $e^{(\cdot)}$ είναι επί του \mathbb{C}^* .

Απόδειξη: Με πράξεις.

□

Εν τω μεταξύ, με τον τρόπο που ορίσαμε την εκθετική συνάρτηση, η πολική αναπαράσταση ενός αριθμού μπορεί να πάρει μια νέα μορφή.

Παρατήρηση 1.9: Κάθε μιγαδικός αριθμός $z \in \mathbb{C}^*$ γράφεται στη μορφή:

$$z = \rho_z e^{i\theta_z} = |z| \cdot e^{i\theta_z}$$

Απόδειξη: Πράγματι, αυτό έπειται από τον ορισμό της εκθετικής συνάρτησης και του τύπου:

$$z = \rho_z(\cos \theta_z + i \sin \theta_z) = |z|(\cos \theta_z + i \sin \theta_z)$$

□

Πάντως, σε αντίθεση με την πραγματική εκθετική συνάρτηση, η μιγαδική συνάρτηση $e^{(\cdot)}$ δεν είναι επι. Αυτό έχει σχέση με αυτή τη γεωμετρική εποπτεία (κύκλος) που είδαμε.

Παρατήρηση 1.10: Η μιγαδική συνάρτηση $e^{(\cdot)}$ δεν είναι 1 – 1, καθώς για κάθε $k \in \mathbb{N}$:

$$e^z = e^{2ik\pi+z}$$

Η **Παρατήρηση 1.10** φαίνεται να αποτελεί «πρόβλημα», αφού ο λογάριθμος δεν θα μπορεί να οριστεί φυσιολογικά ως αντίστροφη της εκθετικής.

1.5.3 Ο λογάριθμος

Ο συνήθης λογάριθμος ως πραγματική συνάρτηση, ορίζεται ως αντίστροφη συνάρτηση της πραγματικής εκθετικής. Παρόμοια διαδικασία δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο μιγαδικό επίπεδο για τον ορισμό του λογαρίθμου, απλούστατα διότι η συνάρτηση $e^{(\cdot)}$ δεν είναι 1 – 1. Η εξίσωση λοιπόν ως προς z , για $w \in \mathbb{C}^*$:

$$e^z = w = |w|(\cos \theta_w + i \sin \theta_w)$$

αναμένεται να έχει παραπάνω από μία λύσεις. Ειδικότερα:

$$z \in \exp^{-1}(w) = \{ \log(|w|) + (2k\pi + \theta_w) \cdot i \mid k \in \mathbb{Z} \}$$

Θεωρούμε γι' αυτόν τον λόγο ως συνάρτηση - λογάριθμο $\log : \mathbb{C}^* \rightarrow \mathbb{C}$ στους μιγαδικούς, μόνο τον κλάδο:

$$\log w = \log(|w|) + i\theta_w$$

Οπότε, από εδώ και στο εξής, οι εξισώσεις της μορφής $e^z = w$ θα επιλύονται ως εξής:

$$e^z = w \Rightarrow z = \log w \mod (2\pi i)$$

Ορισμός 1.10: (Λογάριθμος). Ορίζουμε τη συνάρτηση λογάριθμο $\log : \mathbb{C}^* \rightarrow \mathbb{C}$ στους μιγαδικούς, μέσω του τύπου:

$$\log z = \log(|z|) + i\theta_z$$

Ο υπολογισμός της ποσότητας $\log(|z|)$ ουσιαστικά επαφίεται στην πραγματική περίπτωση, κι γι' αυτό δεν έχουμε πρόβλημα στον ορισμό.

Παρά το ότι ο λογάριθμος, στην περίπτωσή μας, δεν αποτελεί αντίστροφη συνάρτηση της εκθετικής, μπορούμε περιορίζοντας την εκθετική να πάρουμε αυτήν την έννοια αντιστρεψιμότητας.

Παρατήρηση 1.11: Έστω Λ να είναι το σύνολο $\Lambda = \{z \in \mathbb{C} \mid \Im(z) \in (-\pi, \pi]\}$. Η συνάρτηση $e^{(\cdot)}|_{\Lambda} : \Lambda \rightarrow \mathbb{C}^*$ είναι αμφιμονοσήμαντη, αφού υπάρχει η αντίστροφη συνάρτηση $\log : \mathbb{C}^* \rightarrow \Lambda$. Η ίδια παρατήρηση μας δίνει ότι η συνάρτηση του μιγαδικού λογαρίθμου είναι αμφιμονοσήμαντη.

Απόδειξη: Πράγματι, στο Λ δεν έχει νόημα να γράψουμε:

$$e^z = w \Rightarrow z = \log w \mod (2\pi i) = \log(|w|) + i\theta_w \mod (2\pi i)$$

αφού το z δεν μπορεί να είναι «πολύ μακριά», κατακόρυφα από το 0. Σ' αυτήν την περίπτωση:

$$e^z = w \Rightarrow z = \log w = \log(|w|) + i\theta_w$$

□

Παρατήρηση 1.12: Γενικά, υπάρχουν εν γένει περισσότεροι από έναν $z \in \mathbb{C}$ τέτοιοι ώστε η εξίσωση ως προς z :

$$\log(e^z) = w$$

να επιλύεται. Αυτό διότι η $e^{(\cdot)}$ δεν είναι 1 – 1, και ειδικότερα κάθε αριθμός z της μορφής $z = w \mod (2\pi i)$ ικανοποιεί την παραπάνω εξίσωση. Εν γένει λοιπόν, η σχέση:

$$\log(e^z) = w$$

δεν αληθέυει, παρά μόνο αν η $e^{(\cdot)}$ βρίσκεται σε χωρίο τέτοιο ώστε να αποτελεί αντίστροφο συνάρτηση της \log . Δηλαδή η σχέση αληθεύει μόνο στο χωρίο Λ , σύμφωνα με την **Παρατήρηση 1.11**.

Αντίθετα, η εξίσωση ως προς z :

$$e^{\log z} = w$$

έχει μοναδική λύση την $z = w$. Αυτό έπειτα από το $1 - 1$ της συνάρτησης του μιγαδικού λογαρίθμου.

Μπορεί κανείς να πει πολλά πράγματα για την εκθετική συνάρτηση και τον λογάριθμο. Εμείς αργότερα θα δούμε τη παραγωγισμό της αυτών των συναρτήσεων και την ανάλυσή τους σε δυναμοσειρές.

1.5.4 Η εκθετική με γενική βάση

Ορισμός 1.11: (**Εκθετική με γενική βάση**). Έστω $a \in \mathbb{C}$. Ορίζουμε τη συνάρτηση $a^{(\cdot)} : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ μέσω του τύπου:

$$a^z = e^{z \log a}$$

Αυτός ο ορισμός είναι φυσιολογικός, κατ' αναλογία με την πραγματική περίπτωση, και πράγματι πολλές ιδιότητες της εκθετικής μεταβιβάζονται στην μιγαδική περίπτωση. Παρόλα αυτά, με την παρακάτω πρόταση θα δείξουμε ότι μια βασική ιδιότητα δεν ισχύει.

Πρόταση 1.4: Η σχέση:

$$(\alpha^\beta)^\gamma = \alpha^{\beta\gamma}$$

δεν ισχύει για κάθε $\alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{C}$.

Απόδειξη: Μπορούμε να βρούμε ένα αντιπαράδειγμα, και συγκεκιμένα $(e^{2\pi i})^{1/2} = 1^{1/2} = 1$ αλλά $e^{2\pi i/2} = e^{\pi i} = -1$.

Πέρα όμως από το αντιπαράδειγμα, γενικά υπάρχει μια «μεγάλη» οικογένεια αριθμών που δεν ικανοποιεί τη σχέση $(\alpha^\beta)^\gamma = \alpha^{\beta\gamma}$.

Βήμα I: Υποθέτουμε προς άτοπο ότι η σχέση $(\alpha^\beta)^\gamma$ ισχύει για κάθε $\alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{C}$, και θεωρούμε (για λόγους που θα γίνουν σαφείς αργότερα) σταθεροποιημένα α, β ώστε $\alpha^\beta \neq 1 \Rightarrow \log(\alpha^\beta) \neq 0$.

Βήμα II: Έστω $\gamma \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}$ τέτοιο ώστε:

$$\gamma_1 = -\pi - \min\{0, \arg \log(\alpha^\beta)\} < \arg \gamma < \pi - \max\{0, \arg \log(\alpha^\beta)\} = \gamma_2 \quad (1.1)$$

δηλαδή $\gamma \in \angle(e^{i\gamma_1}, e^{i\gamma_2})$.

Βήμα III: Αν αληθεύει ότι $(\alpha^\beta)^\gamma = \alpha^{\beta\gamma}$, τότε:

$$\exp(\gamma \log(\alpha^\beta)) = \exp(\log(\alpha^{\beta\gamma})) \Rightarrow \gamma \log(\alpha^\beta) = \log(\alpha^{\beta\gamma}) + 2k\pi i, \text{ για κάποιο } k \in \mathbb{Z}$$

Επειδή $\Im(\log(\alpha^{\beta\gamma})) \in (-\pi, \pi]$, έπειτα ότι $\Im(\gamma \log(\alpha^\beta)) = \Im(\log(\alpha^\beta) + 2k\pi i) \in ((2k-1)\pi, (2k+1)\pi]$.

Βήμα IV: Εφόσον ισχύει η (1.1), η γωνία $\theta = \arg(\gamma \log(\alpha^\beta))$ είναι μεταξύ των $-\pi$ και π . Επιπλέον, θα επιλέξουμε γ τέτοιο ώστε $\arg \gamma \neq -\arg \log(\alpha^\beta)$ (ώστε $\theta \neq 0$). Επίσης, ορίζουμε $\varepsilon = \exp(-i\arg \log(\alpha^\beta))$ και την ημιευθεία $\underline{O_\xi}$ (που είναι η ημιευθεία των σημείων που δεν σχηματίζουν γωνία $-\arg \log(\alpha^\beta)$).

Βήμα V: Αν γράψουμε:

$$\Im(\gamma \log(\alpha^\beta)) = |\gamma \log(\alpha^\beta)| \sin \theta = |\gamma| \cdot |\log(\alpha^\beta)| \cdot \sin \theta \in ((2k-1)\pi, (2k+1)\pi]$$

τότε:

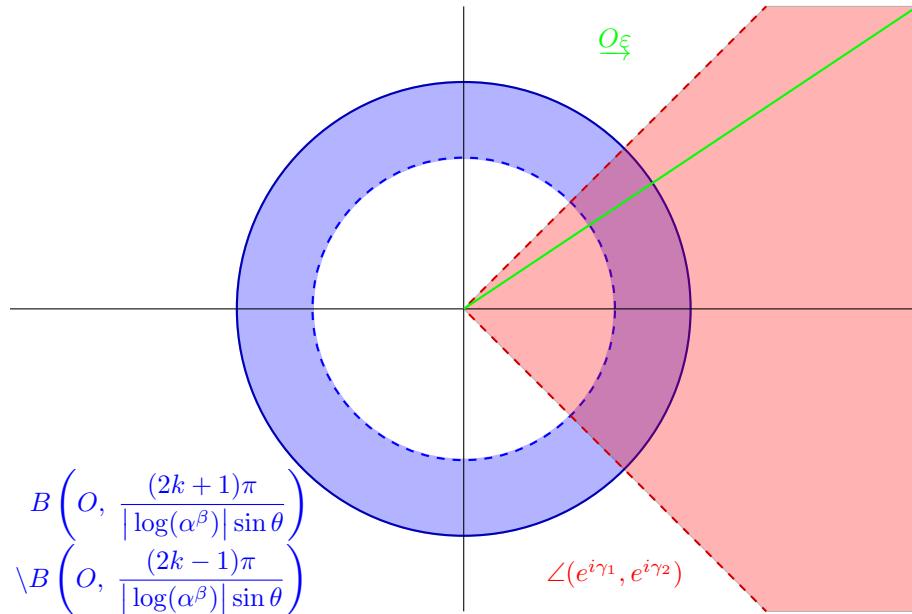
$$\frac{(2k-1)\pi}{|\log(\alpha^\beta)| \sin \theta} < |\gamma| \leqslant \frac{(2k+1)\pi}{|\log(\alpha^\beta)| \sin \theta}$$

και από τα προηγούμενα:

$$\gamma \in \angle(e^{i\gamma_1}, e^{i\gamma_2}) \cap B\left(O, \frac{(2k+1)\pi}{|\log(\alpha^\beta)| \sin \theta}\right) \setminus B\left(O, \frac{(2k-1)\pi}{|\log(\alpha^\beta)| \sin \theta}\right) \setminus \underline{O_\xi} \setminus \mathbb{R}$$

Αυτό είναι άτοπο, διότι αν η σχέση $(\alpha^\beta)^\gamma = \alpha^{\beta\gamma}$ ισχυε για όλα τα α, β, γ , τότε δεν θα έπρεπε να εμφανιστούν περισσότεροι περιορισμοί για το γ απ' όσους επιβάλλαμε. Θυμηθείτε ότι:

$$\gamma \in \angle(e^{i\gamma_1}, e^{i\gamma_2}) \setminus \underline{O\xi} \setminus \mathbb{R}$$



Στο σχήμα λοιπόν (για σταθεροποιημένα α, β) η σχέση $(\alpha^\beta)^\gamma = \alpha^{\beta\gamma}$ δεν αληθεύει όταν το γ βρίσκεται στην κόκκινη γωνία αλλά όχι στον μπλε δακτύλιο, την πράσινη ευθεία ή την οριζόντια μαύρη. \square

1.6 Παράρτημα: Τα σύνολα Julia και το σύνολο του Mandelbrot

Ένα παράδειγμα στο οποίο η γεωμετρία των μιγαδικών αριθμών αποκτά μία ιδιαίτερη μορφή, μπορεί να δοθεί μέσω των συνόλων Julia και του συνόλου του Mandelbrot.

Ορισμός 1.12: (Σύνολα αποδρότων $\text{Es}(f)$, σύνολα εγκλωβισμένων $\text{Pr}(f)$ και σύνολα Julia \mathcal{J}_c). Έστω $f : A \rightarrow \mathbb{C}$, $A \subseteq \mathbb{C}$ μία συνάρτηση.

- Ένα αποδρόμιο σημείο της f είναι ένα σημείο $a \in A$ για το οποίο:

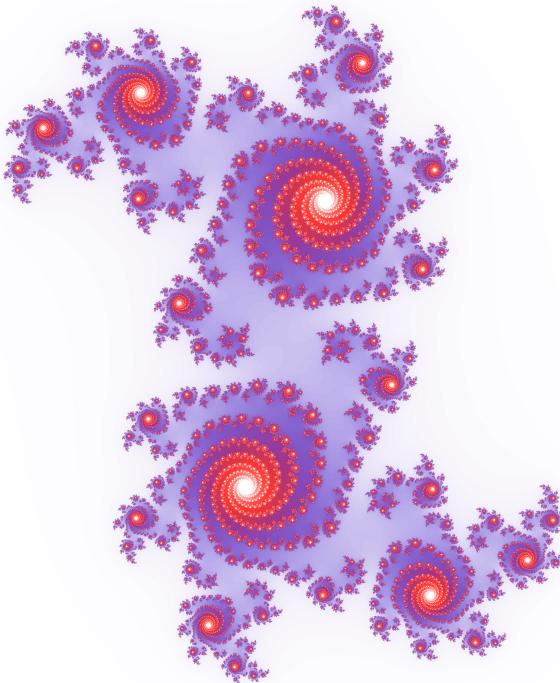
$$|f \circ \overbrace{\cdots \circ}^n f(a)| \rightarrow \infty$$

Το σύνολο αυτών των αποδρόντων σημείων το συμβολίζουμε με $E_S(f)$.

- Ένα εγκλωβισμένο σημείο της f είναι ένα σημείο $a \in A$ για το οποίο:

$|f \circ \dots \circ f(a)| < M < \infty$, για κάποιο $M > 0$ ανεξάρτητο των n

Το σύνολο αυτών των εγκλωβισμένων σημείων το συμβολίζουμε με $\text{Pr}(f)$.



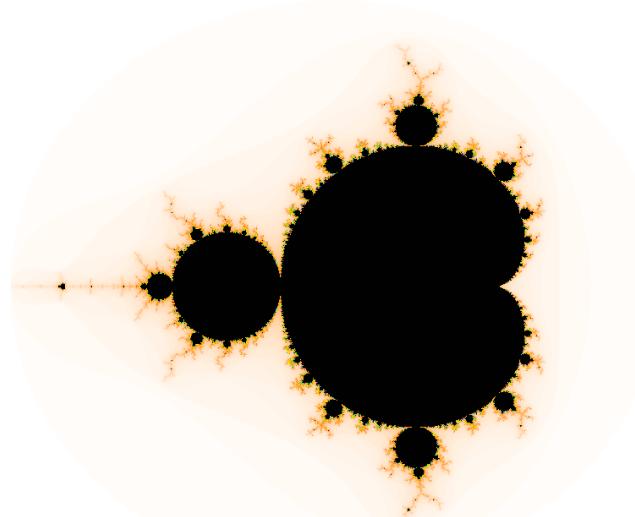
'Ένα σύνολο Julia

Στο παραπάνω σχήμα εικονίζεται ένα σύνολο Julia, το οποίο (τουλάχιστον εκ πρώτης όψεως) δεν φαίνεται καθόλου απλό. Μάλιστα η πλειοψηφία των συνόλων Julia αποτελούν μορφοκλάσματα (fractals), τα οποία είναι εξ' ορισμού σύνολα με μεγάλη πολυπλοκότητα. Αυτή η έννοια «πολυπλοκότητας» ορίζεται αυστηρά με διάφορους τρόπους (που ο καθένας έχει τη δική του αξία), εμείς όμως δεν θα αναφερθούμε σ' αυτό.

Γενικά τα σύνολα Julia μπορεί να είναι συνεκτικά ή μη κατά τόξα συνεκτικά, ακόμη και μη συνεκτικά. Το ενδιαφέρον βρίσκεται -το οποίο αποδείχθηκε ανεξάρτητα από τους Fatou και Julia- στην επόμενη πρόταση:

Πρόταση 1.5: Κάθε σύνολο Julia \mathcal{J}_c είναι είτε συνεκτικό είτε τελείως μη συνεκτικό. Δηλαδή είτε είναι συνεκτικό, είτε οποιαδήποτε δύο του σημεία δεν συνδέονται με καμπύλη.

Ένα ακόμη ενδιαφέρον σύνολο είναι αυτό του Mandelbrot, το οποίο συνδέεται πολύ στενά με τα σύνολα Julia.



Το σύνολο του Mandelbrot

Το σύνολο του Mandelbrot ορίζεται ως εξής:

Ορισμός 1.13: (Το σύνολο του Mandelbrot). Το σύνολο του Mandelbrot είναι το σύνολο:

$$\mathcal{M} = \{c \in \mathbb{C} \mid \text{Pr}(f_c) \text{ είναι συνεκτικό}\}$$

Γενικά το να κατανοήσει κανείς εάν ένα τυχόν σύνολο $\text{Pr}(f_c)$ είναι περίπλοκο, οπότε -για παράδειγμα- ο σχεδιασμός του συνόλου του Mandelbrot φαντάζει δύσκολο εγχείρημα. Ο Mandelbrot έκανε μία παρατήρηση που, τουλάχιστον υπολογιστικά, βοηθάει την περιγραφή του εν λόγω συνόλου.

Πρόταση 1.6: Το σύνολο του Mandelbrot παίρνει την ισοδύναμη μορφή:

$$\mathcal{M} = \left\{ c \in \mathbb{C} \mid \exists M > 0, \forall n \in \mathbb{N}, |f_c \overbrace{\circ \cdots \circ}^n f_c(0)| < M < \infty \right\}$$

δηλαδή είναι τα σημεία c για τα οποία οι «τροχιές» του 0, μέσω των f_c , παραμένουν φραγμένες.

Είναι λογικό κανείς να σκεφτεί τα σύνολα Julia και του Mandelbrot από τη σκοπιά της δυναμικής. Ένα σύνολο \mathcal{J}_c εξαρτάται ουσιαδώς από την «αρχική συνθήκη» c . Για παράδειγμα, ας δούμε το σύνολο του Mandelbrot. Επειδή αικριβώς, για να ελέγχουμε εάν $c \in \mathcal{M}$, χρειάζεται να μελετηθεί η ακολουθία:

$$c, c^2 + c, (c^2 + c)^2 + c, ((c^2 + c)^2 + c)^2 + c, \left(((c^2 + c)^2 + c)^2 + c \right)^2 + c, \dots$$

οποιαδήποτε -ακόμη και μικρή- μεταβολή στο c ενδέχεται να επηρεάσει τη σύγκλιση της εν λόγω ακολουθίας, και κατά συνέπεια αν το μεταβεβλημένο c ανήκει ή όχι στο σύνολο του Mandelbrot. Αυτού του είδους σύνολα μελετώνται ως χαοτικά συστήματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ολόμορφες συναρτήσεις

2.1 Διαφορισιμότητα

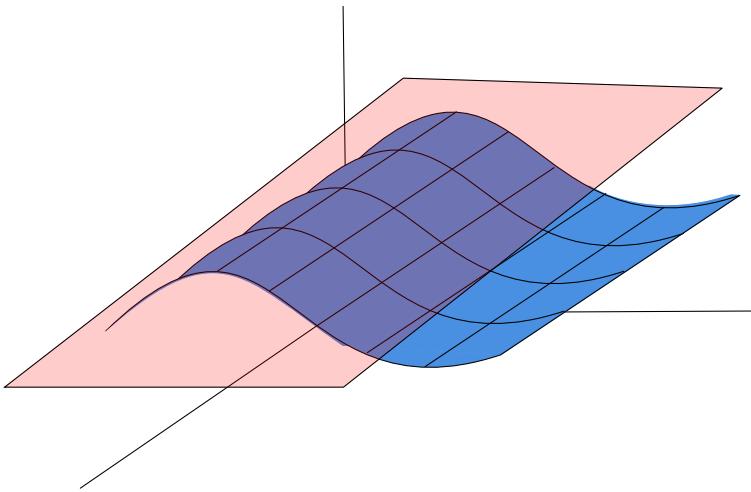
Σε μαθήματα απειροστικού λογισμού / γεωμετρικής ανάλυσης δεν υπάρχει η έννοια της διαιρέσης σε πολυδιάστατους χώρους. Γι' αυτόν τον λόγο γίνεται λόγος στη προσέγγιση μιας συνάρτησης (επιφάνειας λ.χ.) από υπερεπίπεδα, ή γενικότερα αφινικούς γραμμικούς χώρους.

Ορισμός 2.1: (Διαφορισιμότητα). Έστω $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^m$ μία συνάρτηση, $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$ ανοικτό και $z_0 \in \Omega$. Λέμε ότι η f είναι διαφορισιμή στο x_0 εάν υπάρχει γραμμική συνάρτηση M_{f,z_0} τέτοια ώστε:

$$\lim_{h \rightarrow 0_{\mathbb{R}^n}} \frac{|f(z_0 + h) - f(z_0) - M_{f,z_0}(h)|}{|h|} = 0$$

Εάν μαζέψουμε όλα τα z_0 στα οποία η f είναι διαφορισιμή, μπορούμε να φτιάξουμε μια συνάρτηση $(Df)(\cdot) = M_{f,(\cdot)}$, την οποία ονομάζουμε διαφορικό της f . Η τιμή $(Df)(z_0) = M_{f,z_0}$ λέγεται διαφορικό της f στο z_0 .

Ο παραπάνω ορισμός ουσιαστικά δείχνει ότι οι διαφορισιμες συναρτήσεις προσεγγίζονται από πολυδιάστατα επίπεδα, όπως οι παραγώσιμες προσεγγίζονται από εφαπτόμενες ευθείες. Εν τω μεταξύ αυτή η προσέγγιση είναι μοναδική (αν υπάρχει), αλλά δεν θα το αποδείξουμε (μπορείτε να το ελέγξετε).



Η περίπτωση μιας συνάρτησης $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$.

Ας θεωρήσουμε μία συνάρτηση $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ η οποία είναι διαφορισιμή σε ένα z_0 . Εάν θέλουμε ένα επίπεδο να εφάπτεται στην επιφάνεια (του γραφήματος) της f , αναμένουμε οι εφαπτόμενες των καμπυλών $f(\cdot, y)$, $f(x, \cdot)$ (όπου $z = (x, y)$) να περιέχονται στο εφαπτόμενο επίπεδο. Οπότε ίσως το διαφορικό μιας συνάρτησης να μπορεί να προσδιοριστεί από απλούστερες συναρτήσεις, δηλαδή από τις μερικές παραγώγους:

$$\frac{\partial f}{\partial x}(z) = \frac{df(\cdot, y)}{dx}(x) \text{ και } \frac{\partial f}{\partial y}(z) = \frac{df(x, \cdot)}{dy}(y)$$

Πρόταση 2.1: Έστω $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ με το $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$ να είναι ανοικτό. Εάν η f είναι διαφορίσιμη στο $z_0 = (x_{1,0}, x_{2,0}, \dots, x_{n,0})$, τότε:

$$(Df)(z_0) = (\nabla f)_{z_0}$$

όπου:

$$(\nabla f)_{z_0}(\cdot) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}(z_0), \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n}(z_0) \right) (\cdot)^T$$

(Είναι δηλαδή η γραμμική απεικόνιση με πίνακα το διάνυσμα των μερικών παραγώγων. Οι αναστροφές γίνονται απλά για να «φτιάξουμε» τα διανύσματα ώστε να είναι γραμμές ή στήλες όπου χρειάζεται).

Απόδειξη: Πράγματι, εάν η f είναι διαφορίσιμη, θα υπάρχουν $\mu_1, \dots, \mu_n \in \mathbb{R}$ ούτως ώστε, αν $h = (h_1, \dots, h_n)$:

$$\lim_{h \rightarrow 0_{\mathbb{R}^n}} \frac{|f(z_0 + h) - f(z_0) - \sum_{k=1}^n \mu_k h_k|}{|h|} = 0$$

Έτσι λοιπόν, θεωρώντας τα υπο-όρια όταν $h_\ell \rightarrow 0$, $h_k = 0$ ($k \neq \ell$):

$$\lim_{h_\ell \rightarrow 0} \frac{|f(z_0 + h_\ell e_\ell) - f(z_0) - \mu_\ell h_\ell|}{|h_\ell|} = 0$$

(όπου $e_\ell = (0, \dots, 0, \overset{\ell-\text{θέση}}{-1}, 0, \dots, 0)$). Αυτό δείχνει ότι $\mu_\ell = \partial f / \partial x_\ell(z_0)$ και κατ' επέκταση το ζητούμενο.

□

Έχοντας την **Πρόταση 2.1** υπόψη, μπορεί να δειχθεί κάτι γενικότερο.

Πρόταση 2.2: Έστω $f = (f_1, \dots, f_m) : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^m$ με το $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$ να είναι ανοικτό. Εάν η f είναι διαφορίσιμη στο $z_0 = (x_{1,0}, x_{2,0}, \dots, x_{n,0})$, τότε:

$$(Df)(z_0)(\cdot) = \left[\begin{pmatrix} (\nabla f_1)_{z_0}(\cdot)^T \\ \vdots \\ (\nabla f_m)_{z_0}(\cdot)^T \end{pmatrix} \right]^T = \left[\begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(z_0) & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(z_0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1}(z_0) & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n}(z_0) \end{pmatrix} (\cdot)^T \right]^T$$

(Είναι δηλαδή η γραμμική απεικόνιση με πίνακα των πίνακα των μερικών παραγώγων. Οι αναστροφές γίνονται απλά για να «φτιάξουμε» τα διανύσματα ώστε να είναι γραμμές ή στήλες όπου χρειάζεται).

Απόδειξη: Γράφουμε την f στη διανυσματική της μορφή $f = (f_1, \dots, f_m)$, κι έπειτα χρησιμοποιούμε την **Πρόταση 2.1**.

□

2.2 Ολομορφία

Στους μιγαδικούς υπάρχει η δυνατότητα εκτέλεσης διαίρεσης, οπότε ο ορισμός της μιγαδικής παραγώνου θα είναι ευκολότερος.

Ορισμός 2.2: (Ολομορφία). Έστω $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ και $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ένα ανοικτό σύνολο, $z_0 \in \Omega$. Λέμε ότι η f έχει μιγαδική παράγωγο στο z_0 αν το όριο:

$$\lim_{z \rightarrow z_0} \frac{f(z) - f(z_0)}{z - z_0}$$

υπάρχει (στο \mathbb{R}). Συμβολίζουμε με $f'(z_0)$ το όριο αυτό. Αν για κάθε $z_0 \in \Omega$ υπάρχει η μιγαδική παράγωγος, λέμε ότι η f είναι ολόμορφη στο Ω .

Οπότε μια μιγαδική συνάρτηση μπορεί να έχει δύο «ειδών» παραγώγους, το διαφορικό και τη μιγαδική παράγωγο. Έτσι όπως έχουμε παραθέσει τους ορισμούς δεν είναι σαφές αν οι δύο έννοιες ταυτίζονται, αργότερα θα δείξουμε ότι μια μιγαδική συνάρτηση που έχει μιγαδική παράγωγο σε ένα σημείο είναι διαφορίσιμη στο ίδιο σημείο. Κατά κάποιον τρόπο, ζητάμε παραπάνω πράγματα ώστε μία συνάρτηση να έχει μιγαδική παράγωγο.

Ορισμός 2.3: (Ολόμορφες συναρτήσεις). Έστω Ω ένα ανοικτό σύνολο. Συμβολίζουμε το σύνολο όλων των ολομόρφων συναρτήσεων $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ με $\mathcal{O}(\Omega)$.

■ **Παράδειγμα 2.1:**

- Η συνάρτηση $z \mapsto \bar{z}$ δεν είναι παραγωγίσιμη στο 0, αφού:

$$\lim_{z \rightarrow 0} \frac{\bar{z}}{z} = \lim_{z \rightarrow 0} \frac{\bar{z}^2}{|z|^2}$$

προσεγγίζοντας το 0 από δύο διαφορετικές ευθείες που διέρχονται από το 0 (και άρα που έχουν διαφορετικές κλίσεις), το όριο παίρνει διαφορετικές τιμές. Επομένως δεν ορίζεται.

- Η συνάρτηση $z \mapsto \bar{z}$ δεν είναι παραγωγίσιμη σε κανένα $z_0 \in \mathbb{C}$, αφού:

$$\lim_{z \rightarrow z_0} \frac{\bar{z} - \bar{z}_0}{z - z_0} = \lim_{z \rightarrow z_0} \frac{\overline{z - z_0}^2}{|z - z_0|^2}$$

- Η ταυτοική συνάρτηση είναι παραγωγίσιμη σε κάθε σημείο $z_0 \in \mathbb{C}$, αφού:

$$\lim_{z \rightarrow z_0} \frac{z - z_0}{z - z_0} = 1$$

- Κατ' επέκταση, για κάθε $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ανοικτό, το σύνολο $\mathcal{O}(\Omega)$ δεν είναι κενό και δεν ταυτίζεται με το σύνολο όλων των μιγαδικών συναρτήσεων.

Συνεχίζουμε αποδεικνύοντας μερικές σημαντικές ιδιότητες των μιγαδικών παραγώγων.

Πρόταση 2.3: Εάν μια συνάρτηση $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ (με το Ω να είναι ανοικτό) έχει μιγαδική παράγωγο στο $z_0 \in \Omega$, τότε είναι συνεχής στο z_0 .

Απόδειξη: Πράγματι:

$$\lim_{z \rightarrow z_0} [f(z) - f(z_0)] = \lim_{z \rightarrow z_0} \left[\frac{f(z) - f(z_0)}{z - z_0} \cdot (z - z_0) \right] = f'(z_0) \lim_{z \rightarrow z_0} (z - z_0) = 0$$

□

Πρόταση 2.4: (Παρατήρηση του Καραθεοδωρή). Έστω $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$, $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ανοικτό και $z_0 \in \Omega$. Η f έχει μιγαδική παράγωγο στο z_0 εάν και μόνο αν υπάρχει συνεχής συνάρτηση $\varepsilon_f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ με $f(z) = f(z_0) + \varepsilon_f(z)(z - z_0)$. Επιπλέον, $\varepsilon_f(z_0) = f'(z_0)$.

Απόδειξη: (\Rightarrow) Ορίζουμε:

$$\varepsilon_f(z) = \begin{cases} \frac{f(z) - f(z_0)}{z - z_0}, & \text{εάν } z \neq z_0 \\ f'(z_0), & \text{εάν } z = z_0 \end{cases}$$

και παρατηρούμε ότι η ε_f έχει τις ζητούμενες ιδιότητες.

(\Leftarrow) Εάν $f(z) = f(z_0) + \varepsilon_f(z)(z - z_0)$, τότε:

$$\varepsilon_f(z) = \frac{f(z) - f(z_0)}{z - z_0}, \quad \text{για } z \neq z_0$$

Λόγω της συνέχειας της ε_f έπειται κι αυτή η κατεύθυνση.

□

Πρόταση 2.5: Έστω $f, g : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ ($\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ανοικτό) οι οποίες είναι παραγωγίσιμες στο $z_0 \in \Omega$. Τότε:

- $(f + g)'(z_0) = f'(z_0) + g'(z_0)$
- $(f \cdot g)'(z_0) = f'(z_0) \cdot g(z_0) + f(z_0) \cdot g'(z_0)$

iii, Av $\lambda \in \mathbb{C}$, $(\lambda f)'(z_0) = \lambda f'(z_0)$

Απόδειξη: Για το i., το αποτέλεσμα έπειτα από τις ιδιότητες του ορίου.

$$\lim_{z \rightarrow z_0} \frac{(f+g)(z) - (f+g)(z_0)}{z - z_0} = \lim_{z \rightarrow z_0} \frac{f(z) - f(z_0)}{z - z_0} + \lim_{z \rightarrow z_0} \frac{g(z) - g(z_0)}{z - z_0}$$

Για το ii., χρησιμοποιούμε την **Πρόταση 2.4** και γράφουμε $f(z) = f(z_0) + \varepsilon_f(z)(z - z_0)$, $g(z) = g(z_0) + \varepsilon_g(z)(z - z_0)$. Παρατηρούμε (με πράξεις) ότι:

$$(f \cdot g)(z) = (f \cdot g)(z_0) + (\varepsilon_f(z)g(z_0) + \varepsilon_f(z)\varepsilon_g(z)(z - z_0) + \varepsilon_f(z_0)\varepsilon_g(z))(z - z_0)$$

οπότε αν ορίσουμε $\varepsilon_{f \cdot g} = \varepsilon_f(z)g(z_0) + \varepsilon_f(z)\varepsilon_g(z)(z - z_0) + \varepsilon_f(z_0)\varepsilon_g(z)$, θα παρατηρήσουμε ότι η $\varepsilon_{f \cdot g}$ είναι συνεχής και:

$$(f \cdot g)(z) = (f \cdot g)(z_0) + \varepsilon_{f \cdot g}(z)(z - z_0)$$

Δηλαδή, βάσει της **Πρότασης 2.4**, η $f \cdot g$ έχει μιγαδική παράγωγο στο z_0 . Μάλιστα:

$$(f \cdot g)'(z_0) = \varepsilon_{f \cdot g}(z_0) = f'(z_0) \cdot g(z_0) + f(z_0) \cdot g'(z_0)$$

To iii. είναι συνέπεια του ii..

□

Πρόταση 2.6: Έστω $f, g : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ ($\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ανοικτό) δύο συναρτήσεις, $z_0 \in \Omega$ και $g(z_0) \neq 0$. Εάν οι f, g είναι παραγωγίσιμες στο z_0 , τότε:

$$\left(\frac{f}{g}\right)'(z_0) = \frac{f'(z_0)g(z_0) - f(z_0)g'(z_0)}{g^2(z_0)}$$

Απόδειξη: Και πάλι θα γίνει χρήση της **Πρόταση 2.4**. Γράφουμε $f(z) = f(z_0) + \varepsilon_f(z)(z - z_0)$, $g(z) = g(z_0) + \varepsilon_g(z)(z - z_0)$ κι επίσης:

$$\frac{f(z)}{g(z)} - \frac{f(z_0)}{g(z_0)} = \frac{f(z_0) + \varepsilon_f(z)(z - z_0)}{g(z_0) + \varepsilon_g(z)(z - z_0)} - \frac{f(z_0)}{g(z_0)}$$

Με πράξεις στην παραπάνω σχέση καταλήγουμε στο ότι:

$$\frac{f(z)}{g(z)} = \frac{f(z_0)}{g(z_0)} + \frac{\varepsilon_f(z)g(z_0) - f(z_0)\varepsilon_g(z)}{g^2(z_0) + g(z_0)\varepsilon_g(z)(z - z_0)}(z - z_0)$$

το οποίο δίνει το ζητούμενο, χρησιμοποιώντας την **Πρόταση 2.4**.

□

Αυτά δείχνουν (δηλαδή οι προηγούμενες προτάσεις) ότι η μιγαδική παράγωγος, όπως και η πραγματική, συμπεριφέρεται αρκετά καλά στις πράξεις. Μία άμεση εφαρμογή (που μπορεί όμως να αποδειχθεί και κάπως «αυτόνομα») είναι το ακόλουθο παράδειγμα:

■ Παράδειγμα 2.2:

- Εφόσον η ταυτοτική συνάρτηση είναι παραγωγίσιμη (με τη μιγαδική έννοια), η $x \mapsto x^2$ θα είναι παραγωγίσιμη (**Πρόταση 2.5, ii.**). Επαγωγικά μάλιστα, για κάθε $n \in \mathbb{N}$, η $x \mapsto x^n$ είναι παραγωγίσιμη.
- Ως πόρισμα του προηγούμενου, κάθε πολυώνυμο έχει μιγαδική παράγωγο (**Πρόταση 2.5**).
- Είναι φανερό ότι $(x^2)' = 2x$. Επαγωγικά και χρησιμοποιώντας την **Πρόταση 2.5, ii.** κανείς μπορεί να δειξει ότι $(x^n)' = nx^{n-1}$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$.
- Κάθε ρητή συνάρτηση P/Q είναι παραγωγίσιμη (στα σημεία που ορίζεται), βάσει της **Πρότασης 2.6**.

■

Τέλος θα δείξουμε άλλο ένα αποτέλεσμα που «μεταβιβάζεται» στις μιγαδικές παραγώγους, τον κανόνα της αλυσίδας.

Πρόταση 2.7: (Κανόνας της αλυσίδας). Έστω $f : A \rightarrow B$, $g : B \rightarrow \mathbb{C}$ δύο συναρτήσεις και $A, B \subseteq \mathbb{C}$ ανοικτά. Ισχύει ότι:

$$(g \circ f)' = f' \cdot (g' \circ f)$$

Απόδειξη: Τις πλέον είναι φανερό πώς θα λειτουργήσουμε για την απόδειξη της πρότασης: Θα χρησιμοποιήσουμε γι' ακόμη μια φορά την **Πρόταση 2.4**.

Έστω $z_0 \in A$. Θεωρούμε (όπως στην **Πρόταση 2.4**) τις συνεχείς συναρτήσεις ε_f , ε_g , για τις οποίες:

$$f(z) = f(z_0) + \varepsilon_f(z)(z - z_0) \text{ και } g(w) = g(f(z_0)) + \varepsilon_g(w)(w - f(z_0))$$

Υπολογίζοντας λοιπόν τη δεύτερη στις εικόνες $w = f(z)$, έπειτα με πράξεις (και συνδυάζοντας την πρώτη σχέση) ότι:

$$g \circ f(z) = g(f(z_0)) + \varepsilon_g(f(z_0))(f(z) - f(z_0)) = \varepsilon_g(f(z_0))\varepsilon_f(z)(z - z_0)$$

και κατά συνέπεια το ζητούμενο.

□

2.2.1 Εξισώσεις Cauchy - Riemann

Προτύτερα είδαμε δύο «είδη» παραγώγων -όταν αναφερόμαστε σε μιγαδικές συναρτήσεις- αυτήν του διαφορικού και τις μιγαδικές παραγώγου. Αναφέραμε ότι κανείς ουσιαστικά ζητά περισσότερα αν αποσκοπεί μία συνάρτηση να έχει μιγαδική παράγωγο: αυτό θα προσπαθήσουμε να το αιτιολογίσουμε με το ακόλουθο σημαντικό θεώρημα.

Θεώρημα 2.1: (Εξισώσεις Cauchy - Riemann). Έστω $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ μία μιγαδική συνάρτηση, ορισμένη στο ανοικτό σύνολο $\Omega \subseteq \mathbb{C}$, και $z_0 = (x_0, y_0) \in \Omega$. Γράφουμε $f(z) = \Re f(z) + i \cdot \Im f(z)$ (δηλαδή την f «κατά συντεταγμένες») και έχουμε την ακόλουθη ισοδυναμία:

Η f έχει μιγαδική παράγωγο στο z_0

↔

$$\text{Οι } \Re f, \Im f \text{ είναι διαφορίσιμες στο } z_0 \text{ και} \begin{cases} \frac{\partial \Re f}{\partial x}(z_0) = \frac{\partial \Im f}{\partial y}(z_0) \\ \frac{\partial \Re f}{\partial y}(z_0) = -\frac{\partial \Im f}{\partial x}(z_0) \end{cases}$$

Απόδειξη: Στα παρακάτω θα γράφουμε $z = (x, y)$.

(\Rightarrow) Εάν η μιγαδική παράγωγος υπάρχει σε ένα σημείο $z_0 = (x_0, y_0) \in \mathbb{C}$, τότε το ακόλουθο όριο υπάρχει:

$$f'(z_0) = \lim_{z \rightarrow z_0} \frac{f(z) - f(z_0)}{z - z_0} \Leftrightarrow \lim_{z \rightarrow z_0} \frac{f(z) - f(z_0) - f'(z_0)(z - z_0)}{z - z_0} = 0$$

Ορίζουμε $\mathcal{E}(z) = f(z) - f(z_0) - f'(z_0)(z - z_0)$ και παρατηρούμε ότι:

$$\frac{\mathcal{E}(z)}{z - z_0} \xrightarrow{z \rightarrow z_0} 0 \Leftrightarrow \left| \frac{\mathcal{E}(z)}{z - z_0} \right| \xrightarrow{z \rightarrow z_0} 0 \Leftrightarrow \left| \frac{\mathcal{E}(z)}{|z - z_0|} \right| \xrightarrow{z \rightarrow z_0} 0 \Leftrightarrow \frac{\mathcal{E}(z)}{|z - z_0|} \xrightarrow{z \rightarrow z_0} 0$$

Επιπλέον, για $f'(z_0) = (A, B) \in \mathbb{C}$, παρατηρούμε ότι:

$$f(z) = f(z_0) + f'(z_0)(z - z_0) + \mathcal{E}(z) \Rightarrow \begin{cases} \Re f(x, y) = \Re(f(x_0, y_0)) + A(x - x_0) - B(y - y_0) + \Re(\mathcal{E}(x, y)) \\ \Im f(x, y) = \Im(f(x_0, y_0)) + B(x - x_0) + A(y - y_0) + \Im(\mathcal{E}(x, y)) \end{cases}$$

Επειδή $\mathcal{E}(z)/|z - z_0| \xrightarrow{z \rightarrow z_0} 0$, έπειτα ότι:

$$\frac{\Re(\mathcal{E}(z))}{|z - z_0|} \xrightarrow{z \rightarrow z_0} 0 \text{ και } \frac{\Im(\mathcal{E}(z))}{|z - z_0|} \xrightarrow{z \rightarrow z_0} 0$$

Δηλαδή οι συναρτήσεις $\Re f$, $\Im f$ είναι διαφορίσιμες στο z_0 . Μάλιστα:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Re f}{\partial x}(z_0) &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\Re f(x, y) - \Re f(x_0, y_0)}{|x - x_0|} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{A(x - x_0) - B(y_0 - y_0) + \Re(\mathcal{E}(x, y_0))}{|x - x_0|} = A \\ \frac{\partial \Re f}{\partial y}(z_0) &= \lim_{y \rightarrow y_0} \frac{\Re f(x, y) - \Re f(x_0, y_0)}{|y - y_0|} = \lim_{y \rightarrow y_0} \frac{A(x_0 - x_0) - B(y - y_0) + \Re(\mathcal{E}(x_0, y))}{|y - y_0|} = -B \\ \frac{\partial \Im f}{\partial x}(z_0) &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\Im f(x, y) - \Im f(x_0, y_0)}{|x - x_0|} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{B(x - x_0) + A(y_0 - y_0) + \Im(\mathcal{E}(x, y_0))}{|x - x_0|} = B \\ \frac{\partial \Im f}{\partial y}(z_0) &= \lim_{y \rightarrow y_0} \frac{\Im f(x, y) - \Im f(x_0, y_0)}{|y - y_0|} = \lim_{y \rightarrow y_0} \frac{B(x_0 - x_0) + A(y - y_0) + \Im(\mathcal{E}(x_0, y))}{|y - y_0|} = A\end{aligned}$$

(\Leftarrow) Εάν οι $\Re f$, $\Im f$ είναι διαφορίσιμες στο z_0 , τότε υπάρχουν συναρτήσεις δ και η αντίστοιχα, τέτοιες ώστε:

$$\begin{aligned}\Re f(x, y) &= \Re f(x_0, y_0) + A(x - x_0) - B(y - y_0) + \delta(x, y) \\ \Im f(x, y) &= \Im f(x_0, y_0) + B(x - x_0) + A(y - y_0) + \eta(x, y)\end{aligned}$$

και επιπλέον:

$$\frac{\delta(z)}{|z - z_0|} \xrightarrow{z \rightarrow z_0} 0 \text{ και } \frac{\eta(z)}{|z - z_0|} \xrightarrow{z \rightarrow z_0} 0$$

Τα A και B αντίστοιχα είναι οι τιμές $\partial \Re f / \partial x(z_0)$ και $\partial \Im f / \partial x(z_0)$. Εφόσον $f(z) = \Re f(z) + i \Im f(z)$, ο τύπος της f ισοδύναμα γίνεται:

$$f(z) = f(z_0) + (A + Bi)(z - z_0) + \delta(z) + i\eta(z)$$

Θέτοντας $\mathcal{E}(z) = \delta(z) + i\eta(z)$, έχουμε ότι $\mathcal{E}(z)/|z - z_0| \xrightarrow{z \rightarrow z_0} 0 \Leftrightarrow \mathcal{E}(z)/(z - z_0) \xrightarrow{z \rightarrow z_0} 0$ κι επιπλέον:

$$\lim_{z \rightarrow z_0} \frac{f(z) - f(z_0) - (A + Bi)(z - z_0) + \mathcal{E}(z)}{z - z_0} = 0 \Leftrightarrow \lim_{z \rightarrow z_0} \frac{f(z) - f(z_0)}{z - z_0} = A + Bi$$

Επομένως η μιγαδική παράγωγος στο z_0 υπάρχει και μάλιστα είναι η τιμή $f'(z_0) = A + Bi$.

□

Παρατήρηση 2.1: Από το **Θεώρημα 2.1** έπειται ότι αν η f έχει μιγαδική παράγωγο, τότε είναι διαφορίσιμη (για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας επίσης την απόδειξη της **Πρότασης 2.2**).

Οπότε εάν κανείς έχει μιγαδική παραγωγήσιμη συνάρτηση, μπορεί να εξασφαλίσει τη διαφορισιμότητα.

Ένα ακόμη πόρισμα του παραπάνω Θεωρήματος σχετίζεται με τη μορφή της μιγαδικής παραγώγου, σε σχέση με τις μερικές παραγώγους των συντεταγμένων.

Παρατήρηση 2.2: Από την απόδειξη του **Θεωρήματος 2.1** έπειται ότι, αν μία συνάρτηση $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ είναι παραγωγήσιμη στο z_0 , τότε:

$$f'(z_0) = \frac{\partial \Re f}{\partial x}(z_0) + i \cdot \frac{\partial \Im f}{\partial x}(z_0)$$

ή αλλιώς:

$$f'(z_0) = \frac{\partial \Im f}{\partial y}(z_0) - i \cdot \frac{\partial \Re f}{\partial y}(z_0)$$

Με τις εξισώσεις Cauchy - Riemann είναι δυνατόν να μελετήσουμε την παραγωγησιμότητα περισσότερο «περιύπλοκων» συναρτήσεων. Για παράδειγμα, η μιγαδική εκθετική και λογαριθμική (σε κατάλληλα πάντα σύνολα).

Πρόταση 2.8: Οι ακόλουθες συναρτήσεις είναι ολόμορφες, στα σύνολα που ορίζονται.

- i. $\exp : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$
- ii. $\log |_{\mathbb{C} \setminus O_x} : \mathbb{C} \setminus O_x \rightarrow \mathbb{C}$

Απόδειξη: Για το i.: Συμβολίζουμε $z = (x, y)$. Όσον αφορά την \exp , παρατηρούμε ότι ισχύει το **Θεώρημα 2.1**, αφού οι συντεταγμένες της είναι διαφορίσιμες και:

$$\begin{cases} \frac{\partial e^x \cos(y)}{\partial x}(z_0) = e^{x_0} \cos(y_0) = \frac{\partial e^x \sin(y)}{\partial y}(z_0) \\ \frac{\partial e^x \cos(y)}{\partial y}(z_0) = -e^{x_0} \sin(y_0) = -\frac{\partial e^x \sin(y)}{\partial x}(z_0) \end{cases}$$

για κάθε $z_0 = (x_0, y_0) \in \mathbb{C}$. Οπότε η \exp είναι παντού ολόμορφη. Μάλιστα, από την **Παρατήρηση 2.2**:

$$\exp' = \frac{\partial e^x \cos(y)}{\partial x} + i \frac{\partial e^x \sin(y)}{\partial x} = \exp$$

Για το ii.: 'Οσον αφορά τη συνάρτηση του λογαρίθμου, για κάθε $z_0 \in \mathbb{C} \setminus \underline{Ox}'$ ισχύει:

$$\lim_{z \rightarrow z_0} \frac{\log z - \log z_0}{z - z_0} = \lim_{z \rightarrow z_0} \left[1 \middle/ \frac{\exp(\log(z)) - \exp(\log(z_0))}{\log(z) - \log(z_0)} \right] = \frac{1}{\exp(\log(z_0))} = \frac{1}{z_0}$$

Οπότε η συνάρτηση \log είναι ολόμορφη στο $\mathbb{C} \setminus \underline{Ox}'$, με παράγωγο $1/(\cdot)$. Μάλιστα αυτό είναι το μεγαλύτερο σύνολο ως προς τη σχέση του υποσυνόλου, για το οποίο ο λογαρίθμος \log έχει μιγαδική παράγωγο, μιας και στο \underline{Ox}' δεν είναι συνεχής συνάρτηση.

2.3 Δυναμοσειρές

Η μελέτη των δυναμοσειρών σ' αυτό το σημείο είναι κρισιμής σημασίας για τη μελέτη της ολομορφίας. Ένα από τα σημαντικότερα απότελέσματα που θα δούμε είναι ότι κάθε δυναμοσειρά είναι ολόμορφη στον δίσκο σύγκλισής της. Επειτα, σε επόμενο κεφάλαιο, θα δούμε επίσης ότι κάθε ολόμορφη συνάρτηση έχει ανάλυση σε δυναμοσειρά.

Ορισμός 2.4: (Δυναμοσειρές). Ως μιγαδική δυναμοσειρά ορίζουμε κάθε εν γένει «απειρόθα-θμο» πολυώνυμο με μιγαδικούς συντελεστές. Δηλαδή κάθε συνάρτηση της μορφής:

$$P(z) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k z^k$$

όπου $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ είναι μία ακολουθία μιγαδικών αριθμών. Συμβολίζουμε το σύνολο των μιγαδικών δυναμοσειρών με:

$$\mathbb{C}[[z]] = \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} a_k z^k \mid a_k \in \mathbb{C}, k \in \mathbb{N}_0 \right\}$$

Ο παραπάνω συμβολισμός του συνόλου των μιγαδικών δυναμοσειρών, $\mathbb{C}[[z]]$, γίνεται σε αναλογία με τον συμβολισμό του συνόλου $\mathbb{C}[z]$ των πολυωνύμων υπεράνω του \mathbb{C} .

Εν τω μεταξύ στα πολυώνυμα είναι γνωστό ότι $\mathbb{C}[z - c] = \mathbb{C}[z]$, δηλαδή τα πολυώνυμα «με κέντρο c » είναι (ή τουλάχιστον τα βλέπουμε ως) πολυώνυμα με μεταβλητή z .

$$P(z) = a_n(z - c)^n + \cdots + a_0$$

Το ίδιο δεν συμβαίνει με τις δυναμοσειρές. Δηλαδή, δεν αληθεύει η ισότητα $\mathbb{C}[[z - c]] = \mathbb{C}[z]$ - οι δυναμοσειρές κέντρου c ενδέχεται να μην είναι κέντρου 0. Ένα απλό παράδειγμα είναι το ακόλουθο:

$$P(z) = \sum_{k=0}^{\infty} (z + 1)^k$$

Οπότε γενικά θα πρέπει να υπάρχει προσοχή στο τι είδους δυναμοσειρά είναι μία δυναμοσειρά, αν έχουμε δηλαδή κέντρο ή όχι. Είναι επίσης σκόπιμο να ορίσουμε τη σύγκλιση των δυναμοσειρών, πράγμα που κάνουμε στην επόμενη παράγραφο. Γενικά θα μελετήσουμε σύγκλιση σε δυναμοσειρές της μορφής:

$$\sum_{k=0}^{\infty} c_k z^k$$

δηλαδή με κέντρο 0, τα αποτελέσματα όμως μεταφέρονται σε δυναμοσειρές με οποιοδήποτε κέντρο (με της απαραίτητες τροποποιήσεις φυσικά).

2.3.1 Σύγκλιση δυναμοσειρών

Κατ' αρχάς ο όρος «σύγκλιση δυναμοσειρών» είναι λογικός, αν και ίσως λίγο παραπλανητικός. Στην ουσία μια δυναμοσειρά (έστω κέντρου 0) με συντελεστές a_k ορίζεται στα z στα οποία το όριο $\lim_{n \in \mathbb{N}_0} \sum_{k=0}^n a_k z^k$

υπάρχει, οπότε ο όρος «σύγκλιση» έχει νόημα.

Επιπλέον, είναι σημαντικό κανείς να παρατηρήσει ότι οι σειρές (μερικών αθροισμάτων) στην ουσία δεν διαφέρουν πολύ από τις ακολουθίες. Κατ' αρχάς μία ακολουθία μερικών αθροισμάτων $\sum_{k=0}^n a_k$ είναι (προφανώς) μία ακολουθία του n , κι αντίστροφα μία ακολουθία $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ μπορεί να γραφεί:

$$a_{n+1} = a_0 + \sum_{k=1}^n (a_k - a_{k-1})$$

Με αυτό υπόψη, αρκετά αποτελέσματα που θα δώσουμε είναι στην πραγματικότητα αποτελέσματα ακολουθών, οπότε ίσως γνωστά για κάποιους. Θα δούμε παρόλα αυτά αποδείξεις που εμπλέκουν σειρές, για να ενασχοληθούμε μ' αυτές.

Ορισμός 2.5: (Κατά σημείο σύγκλιση). Θα λέμε ότι μία ακολουθία συναρτήσεων $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ με $f_n : A \rightarrow \mathbb{C}$, $A \subseteq \mathbb{C}$, συγκλίνει κατά σημείο σε μία $f : A \rightarrow \mathbb{C}$ εάν:

$$\text{Για κάθε } z \in A, f_n(z) \rightarrow f(z)$$

Στην περίπτωση των δυναμοσειρών, θα λέμε ότι μία δυναμοσειρά $P(z) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k z^k$ συγκλίνει σ' ένα σύνολο $A \subseteq \mathbb{C}$ εάν, για $S_{n,P}(z) = \sum_{k=0}^n c_k z^k$:

$$S_{n,P}(z) \rightarrow P(z), \text{ για κάθε } z \in A$$

Πρόταση 2.9: Έστω $((a_k, b_k))_{k \in \mathbb{N}}$ μια ακολουθία μιγαδικών αριθμών (a_k, b_k) . Τότε η ακόλουθη ισοδυναμία αληθεύει:

$$\sum_{k=0}^{\infty} (a_k + i b_k) \text{ συγκλίνει} \Leftrightarrow \text{οι } \sum_{k=0}^{\infty} a_k, \sum_{k=0}^{\infty} b_k \text{ συγκλίνουν.}$$

Απόδειξη:

(\Rightarrow) Υποθέτουμε ότι η σειρά $\sum_{k=0}^{\infty} (a_k + i b_k)$ συγκλίνει. Εάν s_n είναι η σειρά των μερικών αθροισμάτων της, τότε υπάρχει $(\alpha, \beta) \in \mathbb{C}$ τέτοιο ώστε:

$$s_n \xrightarrow{k \rightarrow \infty} \alpha + i \beta$$

Γράφοντας ισοδύναμα την ακολουθία των μερικών αθροισμάτων στη μορφή $s_n = \sum_{k=0}^n a_k + i \sum_{k=0}^n b_k$, παρατηρούμε ότι:

$$\sum_{k=0}^n a_k + i \sum_{k=0}^n b_k \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \alpha + i \beta \Rightarrow \sum_{k=0}^n a_k \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \alpha, \sum_{k=0}^n b_k \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \beta$$

Έτσι λοιπόν, οι σειρές $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$, $\sum_{k=0}^{\infty} b_k$ συγκλίνουν στα α και β αντίστοιχα.

(\Leftarrow) Έστω s_n, t_n να είναι οι σειρές των μερικών αθροισμάτων των $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ και $\sum_{k=0}^{\infty} b_k$ αντίστοιχα, οι οποίες συγκλίνουν στα α και β . Παρατηρούμε ότι:

$$\sum_{k=0}^n (a_k + i b_k) = \sum_{k=0}^n a_k + i \sum_{k=0}^n b_k = s_n + t_n$$

Επομένως, η $\sum_{k=0}^{\infty} (a_k + i b_k)$ συγκλίνει, και μάλιστα τον μιγαδικό αριθμό $\alpha + i \beta$.

□

Λήμμα 2.1: Μια γεωμετρική σειρά $\sum_{k=0}^{\infty} a^k$, $a \geq 0$ συγκλίνει αν και μόνο αν ο λόγος της a είναι αυστηρά μικρότερος του 1. ■

Απόδειξη: Πράγματι, η σειρά των μερικών αθροισμάτων:

$$s_n = \sum_{k=0}^n a^k = \frac{a^{n+1} - 1}{a - 1}, \quad a \geq 0$$

συγκλίνει αν και μόνο αν $a < 1$. Μάλιστα, το όριό της είναι το $1/(1-a)$.

□

Θεώρημα 2.2: (**Υπαρξη ακτίνας σύγκλισης δυναμοσειράς**). Έστω $P \in \mathbb{C}[[z]]$ μια μιγαδική δυναμοσειρά της μορφής:

$$P(z) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k z^k$$

Υπάρχει ένας αριθμός $R \in [0, \infty]$, τέτοιος ώστε στον (ανοικτό) δίσκο $S(0, R)$ η P να συγκλίνει απολύτως και στην (κλειστή) περιοχή $\mathbb{C} \setminus B(0, R)$ να αποκλίνει.

Μάλιστα, αυτό το R είναι το:

$$R = \sup \{r \geq 0 \mid (|c_k|r^k)_{k \in \mathbb{N}_0} \text{ φραγμένη}\}$$

Απόδειξη: Έστω:

$$R = \sup \{r \geq 0 \mid (|c_k|r^k)_{k \in \mathbb{N}_0} \text{ φραγμένη}\}$$

Κατ' αρχάς παρατηρούμε ότι το supremum υπάρχει, αφού για $r = 0$ η $(|c_k|r^k)_{k \in \mathbb{N}_0}$ είναι πάντοτε φραγμένη (δεν πέφτουμε σε τετριμένες περιπτώσεις με κενά σύνολα).

Η περίπτωση όπου $R = 0$ είναι τετριμένη. Εάν $R > 0$, κάθε πραγματικός αριθμός $0 \leq r_0 \leq R$ δίνει ακολουθία $(|c_k|r_0^k)_{k \in \mathbb{N}_0}$ η οποία είναι φραγμένη, έστω από έναν θετικό αριθμό M . Παρατηρούμε ότι για $|z| < r_0$:

$$|c_k z^k| = |c_k|r_0^k \cdot \left(\frac{|z|}{r_0}\right)^k \leq M \cdot \left(\frac{|z|}{r_0}\right)^k$$

Κατά συνέπεια:

$$0 \leq \sum_{k=0}^{\infty} |c_k z^k| \leq \sum_{k=0}^{\infty} M \left(\frac{|z|}{r_0}\right)^k \stackrel{*}{=} M \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{|z|}{r_0}\right)^k}$$

όπου στην ισότητα άστρο (*) γίνεται χρήση του **Λήμματος 2.1**. Επειδή η τελευταία συγκλίνει και η πρώτη είναι σειρά αιύζοντων μερικών αθροισμάτων (περιέχει μόνο θετικούς όρους), η $\sum_{k=0}^{\infty} |c_k z^k|$ συγκλίνει για κάθε $|z| < r_0$. Επειδή το εν λόγω αποτέλεσμα ισχύει για κάθε $R \geq r_0 \geq 0$, για κάθε $|z| < R$ η σειρά συγκλίνει.

Για να ολοκληρωθεί η απόδειξη, θα δείξουμε ότι αν $|z| > R$, η σειρά αποκλίνει. Πράγματι, το R είναι το supremum των θετικών αριθμών r , για τους οποίους η ακολουθία $(|c_k|r^k)_{k \in \mathbb{N}_0}$ είναι φραγμένη. Επομένως, για $|z| > R$, υπάρχουν άπειροι όροι της $(|c_k z^k|)_{k \in \mathbb{N}_0}$ οι οποίοι είναι μεγαλύτεροι του 1 (αφού αν το αντίθετο συνέβαινε, η ακολουθία προφανώς θα φράσσοταν από το $1 + \max\{|c_k z^k| > 1\}$) και συνεπώς:

$$\sum_{\ell=0}^{\infty} |c_{\ell} z^{\ell}| \geq \sum_{\ell \in \{k \mid |c_k z^k| > 1\}} |c_{\ell} z^{\ell}| \geq \sum_{\ell \in \{k \mid |c_k z^k| > 1\}} = \#\{k \mid |c_k z^k| > 1\} = \infty$$

Αυτό ολοκληρώνει την απόδειξη.

□

Ένα ακόμη αποτέλεσμα που ίσως κανείς να θυμάται από τον απειροστικό λογισμό ή την πραγματική ανάλυση είναι το παρακάτω.

Πρόταση 2.10: (**Κριτήριο λόγου για δυναμοσειρές**). Έστω $P(z) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k z^k$ μια μιγαδική δυναμοσειρά. Εάν:

$$\left| \frac{c_k}{c_{k+1}} \right| \xrightarrow{k \rightarrow \infty} R$$

τότε το R αποτελεί την ακτίνα σύγκλισης της δυναμοσειράς P .

Ως γενίκευση, σε οποιαδήποτε άλλη δυναμοσειρά (με διαφορετικό κέντρο) $Q \in \mathbb{C}[[z - c]]$, $a \in \mathbb{C}$, εφαρμόζει το εν λόγω κριτήριο.

Απόδειξη: Αρχικά υποθέτουμε ότι το R δεν είναι άπειρο. Για $|z| < R$ παρατηρούμε ότι εφαρμόζει το κριτήριο του λόγου για πραγματικές σειρές, αφού:

$$\left| \frac{c_{k+1}z^{k+1}}{c_k z^k} \right| = \frac{|c_{k+1}| \cdot |z|}{|c_k|} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} \frac{|z|}{R} < 1$$

Επομένως, η σειρά $\sum_{k=0}^{\infty} |c_k z^k|$ συγκλίνει. Εάν τώρα $|z| > R$, ο προαναφερθής λόγος είναι μεγαλύτερος της μονάδας, οπότε $|c_k z^k| \xrightarrow{k \rightarrow \infty} \infty$. Αυτό δίνει ότι η σειρά αποκλίνει, αφού εάν συνέκλινε, $|c_k z^k| \rightarrow 0$.

Εάν το R είναι άπειρο, για κάθε (σταθερό) $z \in \mathbb{C}$, η ποσότητα:

$$\frac{|c_{k+1}| \cdot |z|}{|c_k|}$$

τείνει στο $0 < 1$, οπότε και πάλι εφαρμόζει το κριτήριο του λόγου για πραγματικές σειρές. Η σειρά λοιπόν $\sum_{k=0}^{\infty} |c_k z^k|$, σε αυτήν την περίπτωση συγκλίνει για κάθε μιγαδικό z .

Τα προαναφερθέντα επιχειρήματα παραμένουν αναλλοίωτα στην περίπτωση όπου το z έχει αντικατασταθεί από το $z - c$, $c \in \mathbb{C}$ - οπότε το αποτέλεσμα γενικεύεται: σε οποιαδήποτε άλλη δυναμοσειρά $Q \in \mathbb{C}[[z - c]]$, $c \in \mathbb{R}$, εφαρμόζει το εν λόγω κριτήριο.

□

Επίσης, μία χρήσιμη μορφή της ακτίνας σύγκλισης δίνεται παρακάτω.

Πρόταση 2.11: Έστω $P(z) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k z^k$ μία μιγαδική δυναμοσειρά. Ο αριθμός:

$$R = \frac{1}{\limsup_{k \rightarrow \infty} \sqrt[k]{|c_k|}}$$

αποτελεί την ακτίνα σύγκλισης της δυναμοσειράς.

Απόδειξη: Εάν $R = 0$, τότε -δεδομένου οποιουδήποτε $r > 0$ - η ακολουθία $(|c_k|r^k)_{k=1}^{\infty}$ δεν είναι φραγμένη. Κατά συνέπεια, η σειρά $P(z)$ δεν συγκλίνει απολύτως για κανένα $z = re^{i\theta}$ (εκτός από το 0, που ούτως ή άλλως δεν «πιάνεται», αφού $r > 0$).

Εάν $R = \infty$, τότε είναι φανερό ότι η $P(z)$ συγκλίνει απολύτως για κάθε $z \in \mathbb{C}$.

Εάν $R \notin \{0, \infty\}$, για αριθμό $z \in \mathbb{C}$ με:

$$|z| < \frac{1}{\limsup_{k \rightarrow \infty} \sqrt[k]{|c_k|}} \Rightarrow \limsup_{k \rightarrow \infty} \sqrt[k]{|c_k z^k|} < 1$$

Θεωρούμε $\limsup_{k \rightarrow \infty} \sqrt[k]{|c_k z^k|} < \mu < 1$. Αυτό επιτυγχάνεται εφόσον η ανισότητα είναι γνήσια. Λόγω της προηγούμενης ανισότητας, η ακολουθία $(\sqrt[k]{|c_k z^k|})_{k \in \mathbb{N}}$ έχει άπειρους όρους άνω φραγμένους από μ , και μάλιστα τελικά φράσσεται από το μ (αφού αν δεν φρασσόταν, θα μπορούσε να επιλεγεί υπακολουθία που θα καθιστούσε το \limsup μεγαλύτερο του μ). Δηλαδή, έπειτα ενός n :

$$\sum_{k=n}^{\infty} |c_k z^k| \leq \sum_{k=n}^{\infty} \mu^k \leq \sum_{k=1}^{\infty} \mu^k = \frac{1}{1-\mu}$$

(εφόσον $\mu < 1$ και η $\sum_{k=1}^{\infty} \mu^k$ είναι γεωμετρική). Άρα η σειρά $\sum_{k=1}^{\infty} c_k z^k$ συγκλίνει απολύτως για $|z| < R$.

Τέλος, εάν $|z| > R$, θα δείξουμε ότι η εν λόγω σειρά δεν συγκλίνει. Πράγματι, τότε θα μπορούσε (όπως και πριν) να επιλεγεί αριθμός:

$$\limsup_{k \rightarrow \infty} \sqrt[k]{|c_k z^k|} > \mu > 1$$

το οποίο με τη σειρά του σημαίνει την ύπαρξη υπακολουθίας $(c_{k(s)} z^{k(s)})_{s \in \mathbb{N}}$ με $|c_{k(s)} z^{k(s)}| > \mu^{k(s)} > 1$. Αυτό μας δείχνει ότι η σειρά $\sum_{k=1}^{\infty} c_k z^k$ δεν συγκλίνει, αφού αν συνέκλινε $c_k z^k \rightarrow 0$.

□

Όλα όσα αναφέραμε περί σύγκλισης δυναμοσειρών μπορούν να εφαρμοστούν σε δυναμοσειρές γενικά, αλλά και σε μία χρήσιμη παρατήρηση που θα αναφέρουμε παρακάτω. Βάσει αυτής κανείς μπορεί να υπολογίζει την ακτίνα σύγκλισης μίας δυναμοσειράς (σε ορισμένες περιπτώσεις), «πετώντας» περιπτές πληροφορίες.

Παρατήρηση 2.3: Θεωρούμε δύο δυναμοσειρές:

$$P(z) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k (z - c)^k \text{ και } Q(z) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k f(k) (z - c)^k$$

με κέντρο c και ακτίνες σύγκλισης R_P και R_Q αντίστοιχα.

- i. Εάν το f είναι πολυώνυμο του $\mathbb{C}[k]$, τότε $R_P = R_Q$.
- ii. Εάν $f(k) = m^k$ (δηλαδή εκθετική συνάρτηση του k), τότε $R_Q = R_P/m$.
- iii. Γενικότερα, εάν $f(k)/f(k+1) \rightarrow m$, τότε $R_Q = m \cdot R_P$.

Απόδειξη: Για το i.: Επειδή:

$$\left| \frac{c_k}{c_{k+1}} \right| \rightarrow R_P \text{ και } \frac{f(k)}{f(k+1)} \rightarrow 1$$

έχουμε:

$$\left| \frac{c_k f(k)}{c_{k+1} f(k+1)} \right| \rightarrow R_P$$

Επομένως, βάσει της **Πρότασης 2.10**, $R_P = R_Q$.

Για τα ii. και iii. εφαρμόζουμε και πάλι την **Πρόταση 2.10**, με ανάλογο τρόπο. □

Αναφέραμε ότι οι δυναμοσειρές στην ουσία είναι όριο, εφόσον:

$$P(z) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n c_k z^k$$

Δηλαδή, αν $S_{n,P}(z) = \sum_{k=0}^n c_k z^k$, τότε (σε κάποιο σύνολο):

$$S_{n,P} \rightarrow P$$

οπότε έχει νόημα να λέμε ότι μία δυναμορειρά συγκλίνει. Εκτός από την κατά σημείο σύγκλιση όμως, έχει νόημα να μιλήσουμε και για ομοιόμορφη σύγκλιση.

Ορισμός 2.6: (Ομοιόμορφη σύγκλιση). Θα λέμε ότι μία ακολουθία συναρτήσεων $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ με $f_n : A \rightarrow \mathbb{C}$, $A \subseteq \mathbb{C}$, συγκλίνει ομοιόμορφα σε μία $f : A \rightarrow \mathbb{C}$ εάν:

$$\sup_{z \in A} |f_n(z) - f(z)| \rightarrow 0$$

Θα συμβολίζουμε $f_n \rightarrow_o f$. Στην περίπτωση των δυναμοσειρών, θα λέμε ότι μία $P(z) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k z^k$ συγκλίνει ομοιόμορφα σ' ένα σύνολο $A \subseteq \mathbb{C}$ εάν, για $S_{n,P}(z) = \sum_{k=0}^n c_k z^k$:

$$\sup_{z \in A} |S_{n,P}(z) - P(z)| \rightarrow 0$$

Είναι φανερό, από τον προηγούμενο ορισμό, ότι μία σειρά που συγκλίνει απολύτως ομοιόμορφα, συγκλίνει και ομοιόμορφα. Δηλαδή, εάν η:

$$\sum_{k=0}^{\infty} |c_k z^k|$$

συγκλίνει ομοιόμορφα, τότε επειδή:

$$\left| \sum_{k=0}^n |c_k z^k| - \sum_{k=0}^{\infty} |c_k z^k| \right| = \sum_{k=n+1}^{\infty} |c_k z^k| \geq \left| \sum_{k=0}^n c_k z^k - \sum_{k=0}^{\infty} c_k z^k \right|$$

η $\sum_{k=0}^{\infty} c_k z^k$ θα συγκλίνει ομοιόμορφα επίσης.

Ένα χρήσιμο αποτέλεσμα σχετικά με την ομοιόμορφη σύγκλιση είναι το παρακάτω.

Πρόταση 2.12: (Κριτήριο ομοιόμορφης σύγκλισης του Weierstrass). Έστω $(f_k)_{k \in \mathbb{N}_0}$, $f_k : A \rightarrow \mathbb{C}$, $A \subseteq \mathbb{C}$, μία ακολουθία συναρτήσεων. Εάν υπάρχουν σταθερές $M_k > 0$ ώστε $|f_k(z)| \leq M_k$ και $\sum_{k=0}^{\infty} M_k < \infty$, τότε η σειρά:

$$\sum_{k=0}^{\infty} |f_k(z)|$$

συγκλίνει ομοιόμορφα.

Απόδειξη: Παρατηρούμε η σειρά $\sum_{k=0}^{\infty} f_k(z)$ συγκλίνει απολύτως, αφού η σειρά $\sum_{k=0}^{\infty} |f_k(z)|$ περιέχει θετικούς όρους και φράσσεται ως εξής:

$$\sum_{k=0}^{\infty} |f_k(z)| \leq \sum_{k=0}^{\infty} M_k$$

Η τελευταία σειρά συγκλίνει, οπότε και η πρώτη συγκλίνει (κατά σημείο).

Για κάθε λοιπόν $z \in A$ θα δείξουμε ότι η σύγκλιση δεν είναι απλώς κατά σημείο, αλλά και ομοιόμορφη. Έχουμε λοιπόν ότι:

$$\sup_{z \in A} \left| \sum_{k=0}^n |f_k(z)| - \sum_{k=0}^{\infty} |f_k(z)| \right| = \sup_{z \in A} \left| \sum_{k=n+1}^{\infty} |f_k(z)| \right| \leq \sup_{z \in A} \left| \sum_{k=n+1}^{\infty} M_k \right| = \left| \sum_{k=n+1}^{\infty} M_k \right|$$

Επειδή η σειρά $\sum_{k=0}^{\infty} M_k$ συγκλίνει, η σειρά των μερικών αθροισμάτων της $\sum_{k=0}^n M_k$ συγκλίνει. Κατ' επέκταση, η 'ουρά' της σειράς είναι συγκλίνουσα προς το 0 και συνεπώς:

$$\sup_{z \in A} \left| \sum_{k=0}^n |f_k(z)| - \sum_{k=0}^{\infty} |f_k(z)| \right| \leq \left| \sum_{k=n+1}^{\infty} M_k \right| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

Αυτό δείχνει ότι η σειρά $\sum_{k=0}^{\infty} |f_k(z)|$ συγκλίνει ομοιόμορφα. □

Γενικά η ομοιόμορφη σύγκλιση έχει καλύτερες ιδιότητες απ' ότι η κατά σημείο. Ένα παράδειγμα μίας παρατήρησης που το δείχνει αυτό, είναι η ακόλουθη.

Παρατήρηση 2.4: Έστω $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ μία ακολουθία συνεχών συναρτήσεων $f_k : A \rightarrow \mathbb{C}$, $A \subseteq \mathbb{C}$, κι επίσης μία συνάρτηση $f : A \rightarrow \mathbb{C}$. Εάν $f_n \rightarrow_o f$, τότε και f είναι συνεχής συνάρτηση.

Απόδειξη: Έστω $\varepsilon > 0$. Λόγω της ομοιόμορφης σύγκλισης $f_n \rightarrow_o f$, υπάρχει ένα $n_0 \in \mathbb{N}$ τέτοιο ώστε για κάθε $n \geq n_0$ να αληθεύει ότι:

$$\sup_{z \in A} |f_n(z) - f(z)| < \varepsilon/3 \Rightarrow |f_n(z) - f(z)| < \varepsilon/3, \text{ για κάθε } z \in A$$

Έστω τυχαίο σημείο $a \in A$. Επειδή κάθε συνάρτηση f_n είναι συνεχής σε αυτό το a , για κάποιο $\delta > 0$ και για κάθε $z \in A$ για το οποίο $|z - a| < \delta$:

$$|f_n(z) - f_n(a)| < \varepsilon/3$$

Εάν λοιπόν θεωρήσουμε $n \geq n_0$ και $z \in A$ τέτοιο ώστε $|z - a| < \delta$, τότε:

$$|f(z) - f(a)| \leq |f(z) - f_n(z)| + |f_n(z) - f_n(a)| + |f_n(a) - f(a)| < 3 \cdot \varepsilon/3 = \varepsilon$$

Αυτό δείχνει ότι η f είναι συνεχής στο a . Επειδή το a ήταν τυχόν σημείο στο A , αποδεικνύεται η συνέχεια της f στο A . □

2.3.2 Παραγώγιση δυναμοσειρών

Γενικά θα μας απασχολήσουν πολύ μιγαδικές συναρτήσεις που έχουν ανάπτυγμα σε δυναμοσειρά, οπότε είναι οικόπειμα να ελέγχουμε εάν αυτές έχουν καλές ιδιότητες, που μεταβιβάζονται ίσως από τα πολυώνυμα. Για παράδειγμα, είναι μία δυναμοσειρά ολόμορφη συνάρτηση στον δίσκο σύγκλισής της: Η απάντηση που θα δώσουμε είναι καταφατική, και μάλιστα θα δείξουμε κάτι καλύτερο (σε μεταγενέστερο κεφάλαιο). Οι συναρτήσεις που αναλύονται σε δυναμοσειρά -δηλαδή οι αναλυτικές συναρτήσεις- είναι ακριβώς οι ολόμορφες.

Ορισμός 2.7: (Αναλυτικές συναρτήσεις). Έστω $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ένα ανοικτό σύνολο. Μία συνάρτηση $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ που για κάθε $a \in \Omega$ υπάρχει r ώστε να έχει ανάπτυγμα σε δυναμοσειρά στο $S(a, r) \subseteq \Omega$:

$$f(z) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k (z - a)^k$$

λέγεται αναλυτική συνάρτηση στο Ω . Το σύνολο των αναλυτικών συναρτήσεων στο Ω το συμβολίζουμε με:

$$\mathcal{A}(\Omega) = \{f : \Omega \rightarrow A \mid f \text{ αναλυτική}\}$$

Ας δείξουμε αρχικά ότι κάθε συνάρτηση που αναλύεται σε δυναμοσειρά έχει μιγαδική παράγωγο.

Θεώρημα 2.3: (Θεώρημα παραγώγισης δυναμοσειρών). Έστω $P(z) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k z^k$ μία δυναμοσειρά με ακτίνα σύγκλισης R . Η P είναι ολόμορφη στον $S(0, R)$. Γενικεύοντας, οποιαδήποτε δυναμοσειρά $Q(z) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k (z - a)^k$ με ακτίνα σύγκλισης R , είναι ολόμορφη στον $S(a, R)$.

Απόδειξη: Η απόδειξη είναι αρκετά εκτενής και θα γίνει σε βήματα.

Βήμα I: Κατ' αρχάς, οι σειρές:

$$\sum_{k=0}^{\infty} c_k z^k \text{ και } \sum_{k=0}^{\infty} k c_k z^k$$

έχουν την ίδια ακτίνα σύγκλισης, από την **Παρατίρηση 2.3, i..**

Βήμα II: Θεωρούμε τυχόν $\zeta \in S(0, R)$ και αριθμό r με $|\zeta| < r < R$. Για κάθε $z \in S(0, r) \setminus \{\zeta\}$ έχουμε:

$$\begin{aligned} \frac{P(z) - P(\zeta)}{z - \zeta} &= \frac{1}{z - \zeta} \left(\sum_{k=0}^{\infty} c_k z^k - \sum_{k=0}^{\infty} c_k \zeta^k \right) = \frac{1}{z - \zeta} \sum_{k=0}^{\infty} c_k (z^k - \zeta^k) = \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} c_k (z^{k-1} + \zeta z^{k-2} + \cdots + \zeta^{k-1}) \end{aligned}$$

Βήμα III: Θα δείξουμε ότι η σύγκλιση της:

$$\sum_{k=1}^{\infty} c_k (z^{k-1} + \zeta z^{k-2} + \cdots + \zeta^{k-1})$$

είναι ομοιόμορφη, οπότε βάσει της **Παρατίρησης 2.4**, θα είναι και συνεχής συνάρτηση. Πράγματι, παρατηρούμε ότι:

$$|c_k (z^{k-1} + \zeta z^{k-2} + \cdots + \zeta^{k-1})| \leq |c_k| \cdot (|z|^{k-1} + |\zeta| \cdots |z|^{k-2} + \cdots + |\zeta|^{k-1}) \leq k |c_k| r^{k-1}$$

κι επειδή $r < R$, η $\sum_{k=0}^{\infty} k |c_k| r^k$ συγκλίνει. Δηλαδή, από την **Πρόταση 2.12**, η σύγκλιση της $\sum_{k=1}^{\infty} c_k (z^{k-1} + \zeta z^{k-2} + \cdots + \zeta^{k-1})$ είναι ομοιόμορφη.

Βήμα IV: Λόγω της συνέχειας της $\sum_{k=1}^{\infty} c_k (z^{k-1} + \zeta z^{k-2} + \cdots + \zeta^{k-1})$, είναι δυνατόν να γράψουμε:

$$\lim_{z \rightarrow \zeta} \frac{P(z) - P(\zeta)}{z - \zeta} = \lim_{z \rightarrow \zeta} \sum_{k=1}^{\infty} c_k (z^{k-1} + \zeta z^{k-2} + \cdots + \zeta^{k-1}) = \sum_{k=1}^{\infty} k c_k z^{k-1}$$

δηλαδή η P παραγωγίζεται σε κάθε σημείο $\zeta \in S(0, r)$, $r < R$. Επειδή οι δίσκοι $S(0, r)$, για τα διάφορα r , καλύπτουν τον $S(0, R)$, σε κάθε σημείο του $S(0, R)$ η P παραγωγίζεται.

□

Είναι φανερό, από το προηγούμενο θεώρημα, ότι μία δυναμοσειρά όχι απλώς παραγωγίζεται, αλλά παραγωγίζεται απείρως.

Δεδομένης της παραγώγισης των δυναμοσειρών, μπορούμε πλέον να βρούμε ένα ανάπτυγμα για την εκθετική συνάρτηση.

Παρατίρηση 2.5: Η εκθετική συνάρτηση $e^{(\cdot)} : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ έχει ανάλυση σε δυναμοσειρά:

$$e^z = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{k!}$$

Απόδειξη: Θεωρούμε τη δυναμοσειρά:

$$E(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{k!}$$

και θα δείξουμε ότι αυτή είναι η εκθετική συνάρτηση. Παρατηρούμε ότι:

$$(E(z) \cdot e^{-z})' = E'(z) \cdot e^{-z} - E(z) \cdot e^{-z} \stackrel{*}{=} e^{-z} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^{k-1}}{(k-1)!} - e^{-z} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{k!} = 0$$

(όπου στη σχέση άστρο (*) χρησιμοποιείται το **Θεώρημα 2.3**). Δηλαδή:

$$E(z) \cdot e^{-z} = c \Rightarrow E(z) = ce^z, \text{ για κάποιο } c \in \mathbb{C}$$

Επειδή $E(0) \cdot e^0 = 1$, έπειτα τελικά ότι $c = 1$ και $E(z) = e^z$.

□

Εν τω μεταξύ θυμηθείτε ότι είχαμε ορίσει:

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta, \quad \theta \in \mathbb{R}$$

και, βάσει των προηγουμένων:

$$\cos \theta + i \sin \theta = \sum_{k=0}^{\infty} i^k \cdot \frac{\theta^k}{k!} = \sum_{\lambda=0}^{\infty} (-1)^{\lambda} \frac{\theta^{2\lambda}}{(2\lambda)!} + i \sum_{\lambda=0}^{\infty} (-1)^{\lambda} \frac{\theta^{2\lambda+1}}{(2\lambda+1)!}$$

Έτσι λοιπόν, έπειτα μία (ήδη γνωστή) παρατήρηση:

Παρατήρηση 2.6: Τα πραγματικά συνημίτονα και ημίτονα έχουν ανάλυση σε δυναμοσειρά:

$$\cos \theta = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{\theta^{2k}}{(2k)!} \quad \text{και} \quad \sin \theta = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{\theta^{2k+1}}{(2k+1)!}$$

για $\theta \in \mathbb{R}$.

Με γνώμονα την προηγούμενη παρατήρηση, είναι δυνατόν να ορίσουμε πλέον μία γενίκευση των \cos , \sin στο μιγαδικό επίπεδο.

Ορισμός 2.8: (Μιγαδικά συνημίτονα και ημίτονα). Επεκτείνουμε τις συναρτήσεις \cos , \sin , για κάθε $z \in \mathbb{C}$:

$$\cos z = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{z^{2k}}{(2k)!} \quad \text{και} \quad \sin z = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{z^{2k+1}}{(2k+1)!}$$

Ο ορισμός αυτός είναι καλός, αφού πράγματι επεκτείνει τις πραγματικές \cos , \sin , κι επιπλέον οι εν λόγω δυναμοσειρές συγκλίνουν για κάθε $z \in \mathbb{C}$. Πράγματι, αυτό μπορούμε να το δούμε γράφοντας (για παράδειγμα για το συνημίτονο):

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{|z|^{2k}}{(2k)!} \leqslant \sum_{k=0}^{\infty} \frac{|z|^k}{k!} = e^{|z|} < \infty$$

Παρατήρηση 2.7: Για κάθε μιγαδικό αριθμό $z \in \mathbb{C}$, αληθεύουν οι σχέσεις:

$$e^{iz} = \cos z + i \sin z$$

(το οποίο είναι η γενικευμένη μορφή του ορισμού) και:

$$\cos z = \frac{1}{2} (e^{iz} + e^{-iz}) \quad \text{και} \quad \sin z = \frac{1}{2i} (e^{iz} - e^{-iz})$$

Επιπλέον, έτσι όπως ορίστηκαν οι \cos , \sin , είναι επί συναρτήσεις. Πράγματι, θεωρώντας:

$$\begin{aligned} \cos(z) = w &\Rightarrow \exp(iz) + \exp(-iz) = 2w \\ &\Rightarrow \exp(iz)^2 - 2w \exp(iz) + 1 = 0 \\ &\Rightarrow \exp(iz) = w \pm \sqrt{w^2 - 1} \\ &\Rightarrow iz = \log(w \pm \sqrt{w^2 - 1}) \mod (2\pi i) \\ &\Rightarrow z = -i \cdot \log(w \pm \sqrt{w^2 - 1}) \mod (2\pi) \end{aligned}$$

παρατηρούμε ότι η εξίσωση $\cos z = w$ έχει τουλάχιστον μία λύση, οπότε η \cos είναι επί (αναλόγως και η \sin).

Τέλος, θα αναλύσουμε (πέρα από τις προηγούμενες συναρτήσεις) και τις $1/(z)$, \log σε δυναμοσειρές.

Παρατήρηση 2.8:

i. Η συνάρτηση $1/z$ αναλύεται σε δυναμοσειρά σε κάθε σύνολο $S(a, |a|)$, $a \in \mathbb{C}$, και μάλιστα:

$$\frac{1}{z} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{a^{k+1}} (z-a)^k, \quad z \in S(a, |a|)$$

ii. Ο λογάριθμος είναι αναλυτική συνάρτηση σε κάθε σύνολο της μορφής $S(a, |a|)$ που δεν τέμνει την ημιευθεία $\underline{Ox'}$. Μάλιστα:

$$\log(z) = \log(a) + \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(k+1)a^{k+1}} (z-a)^k$$

Απόδειξη: Για το i.: Έστω $z \in S(a, |a|) \Rightarrow |z-a| < |a|$. Παρατηρούμε ότι $|z-a|/|-a| < 1$, οπότε η σειρά:

$$\sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{z-a}{-a} \right)^k$$

συγκλίνει (ως γεωμετρική). Μάλιστα:

$$\sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{z-a}{-a} \right)^k = 1 / \left(1 - \frac{z-a}{-a} \right) = \frac{-a}{-a-z+a} = \frac{a}{z} \Rightarrow \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{a^{k+1}} (z-a)^k = \frac{1}{z}$$

Για το ii.: Από το **Θεώρημα 2.3**, η δυναμοσειρά:

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(k+1)a^{k+1}} (z-a)^k + c, \quad c \in \mathbb{C}$$

έχει παράγωγο:

$$\frac{d}{dz} \left(\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(k+1)a^{k+1}} (z-a)^k + c \right) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{a^{k+1}} (z-a)^k = \frac{1}{z} = \frac{d \log}{dz}(z)$$

Επομένως:

$$\log(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(k+1)a^{k+1}} (z-a)^k + c, \quad \text{για κάποιο } c \in \mathbb{C}$$

Για $z = a$ η προηγούμενη σχέση δίνει ότι $\log(a) = c$, κι επομένως το ζητούμενο έπεται:

$$\log(z) = \log(a) + \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(k+1)a^{k+1}} (z-a)^k$$

□

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ολοκληρωτικός λογισμός

3.1 Γενικοί ορισμοί

Προσπαθώντας να «μαντέψουμε» τι μορφή είναι φυσιολογικό να δώσουμε σε ένα μιγαδικό ολοκλήρωμα, επιτρεζόμενοι από την πραγματική περίπτωση είναι λογικό να θελήσουμε να ορίσουμε το μιγαδικό ολοκλήρωμα ως επικαμπύλιο ολοκλήρωμα.

Δηλαδή, αν a, b είναι δύο πραγματικοί αριθμοί, το ολοκλήρωμα:

$$\int_a^b (\cdot) dx$$

ολοκληρώνει σε ένα ευθύγραμμο τμήμα, το $[a, b]$. Αν τώρα τα a, b είναι μιγαδικά, είναι φυσιολογικό να θέλουμε και πάλι να ολοκληρώσουμε μεταξύ των a, b , δηλαδή αυτήν την φορά στο ευθύγραμμο τμήμα $[a, b] = \{ta + (1 - t)b \mid t \in [0, 1]\}$ του επιπέδου (δηλαδή του \mathbb{C}).

$$\int_{[a,b]} (\cdot) dz$$

Δίνουμε λοιπόν τον ακόλουθο ορισμό.

Ορισμός 3.1: (Μιγαδικά ολοκληρώματα). Έστω $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$ μια συνάρτηση ορισμένη στο ευθύγραμμο τμήμα $[a, b] := \{ta + (1 - t)b \mid t \in [0, 1]\}$ ώστε οι συναρτήσεις $\Re f, \Im f$ είναι κατά Riemann ολοκληρώσιμες. Ορίζουμε:

$$\int_{[a,b]} f(z) dz = \int_{[a,b]} \Re f(z) dz + i \cdot \int_{[a,b]} \Im f(z) dz$$

Υπάρχουν κι άλλοι ορισμοί για το μιγαδικό ολοκλήρωμα, που ακολουθούν μία λογική υπολογισμού όγκου. Θα μπορούσαμε -για παράδειγμα- να είχαμε ορίσει:

$$\int_{\mathbb{C}} f(z) d^2z = \iint_{\mathbb{R}^2} \Re f(x+iy) dx dy + i \cdot \iint_{\mathbb{R}^2} \Im f(x+iy) dx dy$$

όμως δεν θα μελετήσουμε τέτοιου τύπου ολοκληρώματα.

Παρατήρηση 3.1: Εάν μία συνάρτηση $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$, $a, b \in \mathbb{C}$ είναι ολοκληρώσιμη με τη μιγαδική έννοια, τότε:

$$\left| \int_{[a,b]} f(z) dz \right| \leqslant \int_{[a,b]} |f(z)| dz$$

Απόδειξη: Η πρόταση, παρά το ότι φαίνεται τετριμένη και είναι αναμενόμενη, με τους υπάρχοντες ορισμούς χρειάζεται ένα τέχνασμα για να αποδειχθεί. Συγκεκριμένα, η ποσότητα $\int_{[a,b]} f(z) dz$ μπορεί να θεωρηθεί μιγαδικός αριθμός, επομένως υπάρχει γωνία θ τέτοια ώστε:

$$\int_{[a,b]} f(z) dz = \left| \int_{[a,b]} f(z) dz \right| \cdot e^{i\theta} \Rightarrow \left| \int_{[a,b]} f(z) dz \right| = \int_{[a,b]} f(z) dz \cdot e^{-i\theta}$$

Επειδή το αριστερό μέλος είναι πραγματικός αριθμός:

$$\left| \int_{[a,b]} f(z) dz \right| = \Re \int_{[a,b]} f(z) e^{-i\theta} dz = \int_{[a,b]} \Re(f(z) e^{-i\theta}) dz \leqslant \int_{[a,b]} |\Re f(z)| dz \leqslant \int_{[a,b]} |f(z)| dz$$

□

Η συμπεριφορά της ομοιόμορφης σύγκλισης ολοκληρώσιμων συναρτήσεων, όπως και στην πραγματική περίπτωση, είναι «καλή» και στα μιγαδικά ολοκληρώματα. Αυτό φαίνεται με την επόμενη πρόταση.

Πρόταση 3.1: Έστω $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ μία οικογένεια ολοκληρώσιμων μιγαδικών συναρτήσεων $f_n : [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$, $a, b \in \mathbb{C}$, τέτοια ώστε $f_n \rightarrow_o f$, για κάποια $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$. Ισχύει:

$$\int_{[a,b]} f_n(z) dz \rightarrow \int_{[a,b]} f(z) dz$$

Απόδειξη: Θεωρούμε τη συνάρτηση $u(t) = ta + (1-t)b$. Οι συναρτήσεις $\Re(f_n \circ u)$ και $\Im(f_n \circ u)$ συγκλίνουν ομοιόμορφα στις $\Re(f \circ u)$ και $\Im(f \circ u)$ αντίστοιχα. Επομένως, για τις πραγματικές συναρτήσεις $\Re(f_n \circ u)$ και $\Im(f_n \circ u)$ ισχύουν:

$$\begin{aligned} \int_{[a,b]} \Re f_n(z) dz &= \int_{[0,1]} \Re(f_n \circ u(t)) dt \rightarrow \int_{[0,1]} \Re(f \circ u(t)) dt = \int_{[a,b]} \Re f(z) dz \\ \int_{[a,b]} \Im f_n(z) dz &= \int_{[0,1]} \Im(f_n \circ u(t)) dt \rightarrow \int_{[0,1]} \Im(f \circ u(t)) dt = \int_{[a,b]} \Im f(z) dz \end{aligned}$$

Από τον ορισμό του μιγαδικού ολοκληρώματος, προκύπτει το ζητούμενο.

□

Στην ουσία η παραπάνω πρόταση δείχνει κάπι αρκετά βασικό, που παρακάτω θα χρησιμοποιήσουμε: Στην ομοιόμορφη σύγκλιση, τα αθροίσματα και τα ολοκληρώματα μπορούν να εναλλάσσονται. Δηλαδή, εάν:

$$\sum_{k=1}^n f_k(z) dz \xrightarrow{n} \sum_{k=1}^{\infty} f_k(z) dz$$

τότε:

$$\sum_{k=1}^n \int_{[a,b]} f_k(z) dz = \int_{[a,b]} \sum_{k=1}^n f_k(z) dz \xrightarrow{n} \int_{[a,b]} \sum_{k=1}^{\infty} f_k(z) dz$$

δηλαδή:

$$\sum_{k=1}^{\infty} \int_{[a,b]} f_k(z) dz = \int_{[a,b]} \sum_{k=1}^{\infty} f_k(z) dz$$

3.2 Επικαμπύλια ολοκληρώματα

Είναι κατά κάποιον τρόπο αναμενόμενο, εφόσον ορίσαμε το μιγαδικό ολοκλήρωμα σε ευθύγραμμα τμήματα, να θελήσουμε να τα επεκτείνουμε σε καμπύλες γενικά. Ξεκινούμε λοιπόν με τον ορισμό της καμπύλης.

Ορισμός 3.2: (Καμπύλες). Έστω $I = [a, b] \subseteq \mathbb{R}$ ένα διάστημα. Κάθε συνεχής συνάρτηση $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ θα ονομάζεται καμπύλη.

Είναι λογικό να ορίσουμε το ολοκλήρωμα σε καπύλη χρησιμοποιώντας «αλλαγή μεταβλητής». Αν δούμε κάθε σημείο της καμπύλης όχι απλώς ως σημείο του επιπέδου αλλά σαν τιμή $\gamma(t)$, μπορούμε να ορίσουμε:

$$\int_{\gamma} (\cdot) dz = \int_I (\cdot) \circ \gamma(t) \cdot \frac{d\gamma}{dt}(t) dt$$

Αυτό φυσικά απαιτεί όχι μόνο την ύπαρξη της παραγώγου $d\gamma/dt$, αλλά και την ολοκληρωσιμότητά της.

 Από εδώ και στο εξής, όποτε αναφερόμαστε σε καμπύλες, θα θεωρούμε ότι είναι παραγώγισμες με ολοκληρώσιμη παράγωγο.

Ορισμός 3.3: (Επικαμπύλια μιγαδικά ολοκληρώματα). Έστω $\gamma : I \rightarrow \mathbb{C}$ μία καμπύλη και $f : \gamma(I) \rightarrow \mathbb{C}$ μία συνάρτηση. Εάν η $f \circ \gamma$ είναι ολοκληρώσιμη, ορίζουμε:

$$\int_{\gamma} f(z) dz = \int_I f \circ \gamma(t) \cdot \frac{d\gamma}{dt}(t) dt$$

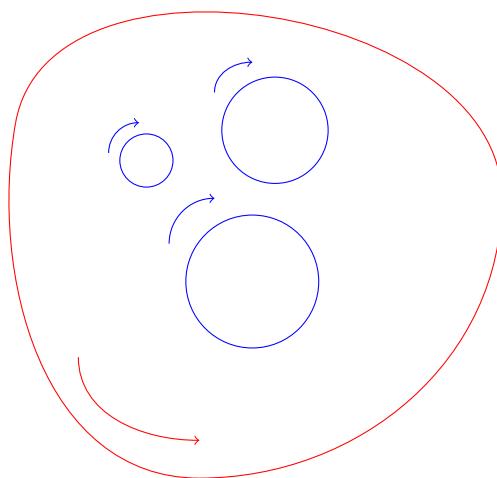
Ορισμός 3.4: (Μερικές ιδιότητες των καμπυλών). Έστω $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ μια καμπύλη.

- i. Εάν η γ είναι $1 - 1$ (αγνοώντας την περίπτωση όπου μόνο η αρχή και το τέλος ταυτίζονται), θα λέμε την καμπύλη γ απλή. Με γεωμετρική σκοπιά, η γ δεν είναι αυτοτεμνόμενη.
- ii. Αντιθέτως, εάν η γ δεν είναι $1 - 1$ (πέραν του αν η αρχή και το τέλος ταυτίζονται), θα την ονομάζουμε μη απλή. Η καμπύλη γ λοιπόν είναι αυτοτεμνόμενη σε αυτήν την περίπτωση.
- iii. Εάν η γ είναι απείρως παραγωγίσιμη (δηλαδή $\gamma \in C^\infty(I)$) τότε η καμπύλη γ θα καλείται λεία.
- iv. Εάν το σύνορο ∂A ενός συνεκτικού συνόλου $A \subseteq \mathbb{C}$ αποτελείται από πεπερασμένες στο πλήθος απλές, μη τεμνόμενες, κλειστές καμπύλες, θα λέμε ότι το ∂A είναι ομαλό.

Στο επίπεδο οι καμπύλες μπορούν να έχουν προσανατολισμό, δεξιόστροφο ή αριστερόστροφο. Υπάρχει μία σύμβαση -η οποία εκρέει από προβλήματα φυσικής- ένα ομαλό σύνορο ∂A να προσανατολίζεται έστι ώστε :

- Εάν η γ_κ βρίκεται εντός της γ_λ , οι καμπύλες έχουν διαφορετικό προσανατολισμό.
- Διαφορετικά οι γ_κ , γ_λ προσανατολίζονται με τον ίδιο προσανατολισμό.
- Η εξωτερική καμπύλη, έστω γ_j , προσανατολίζεται αριστερόστροφα (αν κι αυτό είναι μία τυπικότητα που ανάλογα με το πρόβλημα μπορεί να αλλάξει).

(Εννοείται ότι $\kappa \neq \lambda$ και το ∂A γράφεται ως ένωση καμπυλών $\partial A = \bigcup_{k \in [n]} \gamma_k$). Η ιδέα βρίσκεται (για παράδειγμα) στη ρευστομηχανική. Ένα ρευστό, καθώς στροβιλίζεται στο εσωτερικό ενός συνόλου, τείνει να κινήσει τις επιμέρους καμπύλες του συνόρου όπως περιγράψαμε παραπάνω.



Μ' αυτό υπόψη, κάθε επικαμπύλιο ολοκλήρωμα $\int_{\gamma_k} (\cdot) dz$ εξαρτάται από τον προσανατολισμό της γ_k . Συγκεκριμένα, προσανατολίζοντας την καμπύλη με τους δύο διαφορετικούς προσανατολισμούς, (από τον ορισμό του ολοκληρώματος έπεται ότι) το ολοκλήρωμα διαφέρει ένα πολλαπλάσιο -1 .

Ορισμός 3.5: (Ολοκλήρωμα σε σύνορο). Έστω ένα σύνολο A με ομαλό σύνορο $\partial A = \bigcup_{k \in [n]} \gamma_k$. Έστω επίσης $f : \partial A \rightarrow \mathbb{C}$ μία συνάρτηση, που είναι ολοκληρώσιμη σε καθεμία γ_k , $k \in [n]$. Ορίζουμε:

$$\int_{\partial A} f(z) dz = \sum_{k=1}^n \int_{\gamma_k} f(z) dz$$

3.3 Θεωρήματα για τα επικαμπύλια ολοκληρώματα

Βασικοί υπολογισμοί στις καμπύλες αποτελούν οι μετρήσεις μήκους, ή τουλάχιστον προϋποθέτουν τη γνώση του μήκους μίας καμπύλης. Γι' αυτό θα ξεκινήσουμε αναζητώντας έναν τρόπο υπολογισμού του μήκους μίας καμπύλης.

Ορισμός 3.6: (Τεθλασμένες προσεγγίσεις). Έστω $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ μία καμπύλη και $P = \{p_0, \dots, p_n\}$, $n \in \mathbb{N}$ μία διαμέριση του διαστήματος I . Ορίζουμε ως τεθλασμένη προσέγγιση (του μήκους) της γ , το μήκος της τεθλασμένης γραμμής $\gamma(p_0) \cdots \gamma(p_n)$. Δηλαδή το μήκος:

$$\ell(\gamma, P) = \sum_{k+1 \in [n+1]} \|\gamma(p_{k+1}) - \gamma(p_k)\|$$

Είναι λογικό να αναζητήσουμε το μήκος μίας καμπύλης θεωρώντας κάποιο όριο τεθλασμένων προσεγγίσεων. Φανταζόμαστε ότι, καθώς το πλάτος της διαμέρισης μικραίνει, το μήκος προσεγγίζεται καλύτερα.

Παρατήρηση 3.2: Έστω $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ μία καμπύλη και P, Q δύο διαμερίσεις του I , με την P να είναι λεπτότερη της Q (συμβολικά $\|P\| > \|Q\|$). Τότε αληθεύει:

$$\ell(\gamma, P) \geq \ell(\gamma, Q)$$

Επομένως, εάν το supremum:

$$\sup_{P \in \mathfrak{P}} \ell(\gamma, P), \text{ όπου } \mathfrak{P} \text{ είναι το σύνολο των διαμερίσεων του } I$$

δεν είναι άπειρο, φανταζόμαστε ότι θα μπορεί να οριστεί κάποια έννοια μήκους.

Ορισμός 3.7: (Ευθυγραμμίσιμες καμπύλες και μήκος καμπυλών).

- Μία καμπύλη $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ θα λέγεται ευθυγραμμίσιμη εάν υπάρχει $L > 0$ ώστε:

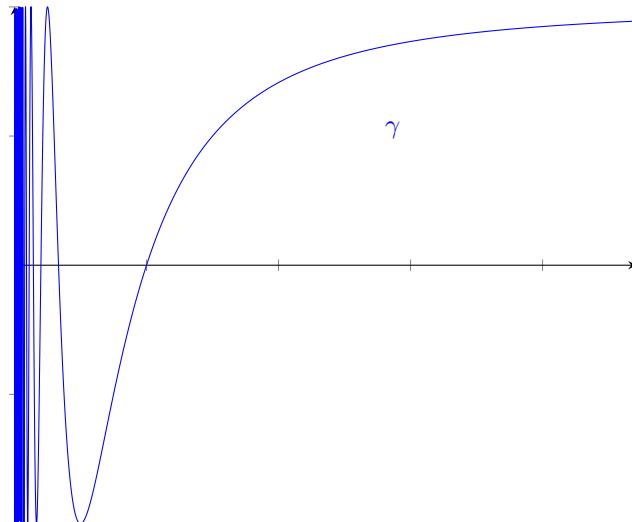
$$\sup_{P \in \mathfrak{P}} \ell(\gamma, P) < L$$

- Έστω $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ μία ευθυγραμμίσιμη καμπύλη. Ορίζουμε ως μήκος της γ τον αριθμό:

$$\ell(\gamma) = \sup_{P \in \mathfrak{P}} \ell(\gamma, P), \text{ όπου } \mathfrak{P} \text{ είναι το σύνολο των διαμερίσεων του } I$$

Παρατήρηση 3.3: Γενικά υπάρχουν καμπύλες που δεν είναι ευθυγραμμίσιμες. Για παράδειγμα, η:

$$\gamma(t) = \begin{cases} \left(t, t \cos \frac{\pi}{2t} \right), & t \in (0, 1] \\ (0, 0), & t = 0 \end{cases}$$



Απόδειξη: Για κάθε $n \in \mathbb{N}$ ορίζουμε τις διαμερίσεις του $[0, 1]$:

$$P_n = \left\{ 0, \frac{1}{n}, \frac{1}{n-1}, \dots, \frac{1}{2}, 1 \right\}$$

Επειδή:

$$\ell(\gamma, P_n) = \sum_{k+1 \in [n+1]} \left\| \gamma\left(\frac{1}{k+1}\right) - \gamma\left(\frac{1}{k}\right) \right\| = \sum_{\substack{k+1 \in [n+1] \\ 2 \mid k+1}} \left\| \pm \frac{1}{k+1} - 0 \right\| + \sum_{\substack{k+1 \in [n+1] \setminus \{1\} \\ 2 \nmid k+1}} \left\| 0 \mp \frac{1}{k} \right\|$$

έχουμε:

$$\ell(\gamma, P_n) = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \rightarrow \infty$$

Έτσι λοιπόν, καθώς $n \rightarrow \infty$, $\ell(\gamma, P_n) \rightarrow \infty$ και $\sup_{P \in \mathfrak{P}} \ell(\gamma, P) = \infty$. \square

Φυσικά ο υπολογισμός του μήκους με διαμερίσεις είναι κατ' ελάχιστο χρονοβόρος και μη αποδοτικός. Με το παρακάτω θεώρημα θα δώσουμε έναν εναλλακτικό τύπο μήκους.

Θεώρημα 3.1: Έστω $\gamma : I = [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ μία C^1 καμπύλη. Η γ είναι ευθυγραμμίσιμη κι έχει μήκος:

$$\ell(\gamma) = \int_I \|\gamma'(t)\| dt$$

Απόδειξη: Για την απόδειξη του θεωρήματος θα δείξουμε τις δύο ανισότητες.

Για την \leqslant : Θεωρούμε $P = \{a = p_0, \dots, p_n = b\}$ μία τυχούσα διαμέριση του I , και παρατηρούμε ότι:

$$\|\gamma(p_{k+1}) - \gamma(p_k)\| = \left\| \int_{p_k}^{p_{k+1}} \gamma'(t) dt \right\| \leqslant \int_{p_k}^{p_{k+1}} \|\gamma'(t)\| dt$$

Οπότε αθροίζοντας:

$$\ell(\gamma, P) \leqslant \sum_{k+1 \in [n+1]} \int_{p_k}^{p_{k+1}} \|\gamma'(t)\| dt = \int_a^b \|\gamma'(t)\| dt = \int_I \|\gamma'(t)\| dt$$

έπειται η μία ανισότητα (και ότι η καμπύλη είναι ευθυγραμμίσιμη).

Για την \geqslant : Θεωρούμε τυχόν $\varepsilon > 0$. Επειδή η γ είναι λεία, η γ' είναι συνεχής, κι οπότε υπάρχει $\delta > 0$ τέτοιο ώστε για $|t - s| < \delta$, $\|\gamma'(t) - \gamma'(s)\| < \varepsilon$. Επιλέγουμε διαμέριση P_δ ώστε για κάθε $p_k, p_{k+1} \in P_\delta$, $|p_{k+1} - p_k| < \delta$ (δηλαδή $\|P_\delta\| < \delta$) και παρατηρούμε ότι $\|\gamma'(p_{k+1}) - \gamma'(p_k)\| < \varepsilon$. Ειδικότερα, εάν $t \in [p_k, p_{k+1}]$, τότε $\|\gamma'(p_{k+1}) - \gamma'(t)\| < \varepsilon \Rightarrow \|\gamma'(t)\| < \|\gamma'(p_{k+1})\| + \varepsilon$. Επομένως:

$$\int_{p_k}^{p_{k+1}} \|\gamma'(t)\| dt \leqslant \int_{p_k}^{p_{k+1}} \|\gamma'(p_{k+1})\| + \varepsilon dt = (\|\gamma'(p_{k+1})\| + \varepsilon) \cdot (p_{k+1} - p_k)$$

Επειδή όμως:

$$\begin{aligned} \|\gamma'(p_{k+1})\| \cdot (p_{k+1} - p_k) &= \|\gamma'(t) + \gamma'(p_{k+1}) - \gamma'(t)\| dt \leqslant \\ &\leqslant \left\| \int_{p_k}^{p_{k+1}} \gamma'(t) dt \right\| + \int_{p_k}^{p_{k+1}} \|\gamma'(p_{k+1}) - \gamma'(t)\| dt \leqslant \|\gamma(p_{k+1}) - \gamma(p_k)\| + \varepsilon(p_{k+1} - p_k) \end{aligned}$$

προσθέτοντας για τα διάφορα k τις παραπάνω σχέσεις, έχουμε:

$$\int_a^b \|\gamma'(t)\| dt \leqslant \sum_{k+1 \in [n+1]} \|\gamma(p_{k+1}) - \gamma(p_k)\| + \varepsilon \sum_{k+1 \in [n+1]} (p_{k+1} - p_k) = \ell(\gamma, P_\delta) + \varepsilon(b - a)$$

και με supremum:

$$\int_a^b \|\gamma'(t)\| dt \leqslant \sup_{P \in \mathfrak{P}} \ell(\gamma, P) + \varepsilon(b - a)$$

Αφήνοντας $\varepsilon \rightarrow 0^+$, έπειται η ζητούμενη ανισότητα. \square

Η παραπάνω ανάλυση, σχετικά με το μήκος των καμπυλών, είναι γενική και δεν περιορίζεται στις μιγαδικές καμπύλες. Όσον αφορά για τα μιγαδικά ολοκληρώματα, επειδή ακριβώς τα ορίσαμε με πολύ φυσιολογικό τρόπο, τα περισσότερα θεωρήματα του απειροστικού λογισμού «μεταβιβάζονται» κι αυτά. Στη συνέχεια θα αναφέρουμε μερικά εξ αυτών, τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε κατά κόρον.

Θεώρημα 3.2: (Το θεμελιώδες θεώρημα του απειροστικού λογισμού). Έστω $\gamma : I = [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$ μία καμπύλη και $f : \gamma(I) \rightarrow \mathbb{C}$ μία παραγωγίσιμη συνάρτηση με ολοκληρώσιμη παράγωγο. Αλήθευει ότι:

$$\int_{\gamma} f'(z) dz = f \circ \gamma(b) - f \circ \gamma(a)$$

Απόδειξη: Γράφοντας το μιγαδικό ολοκλήρωμα στη μορφή:

$$\int_{\gamma} f'(z) dz = \int_a^b f' \circ \gamma(t) \cdot \frac{d\gamma}{dt}(t) dt = \int_a^b \frac{df \circ \gamma}{dt}(t) dt$$

και εφαρμόζοντας το γνωστό θεμελιώδες θεώρημα του απειροστικού λογισμού, της πραγματικής περίπτωσης, παίρνουμε το ζητούμενο. \square

Ένα ακόμη χρήσιμο θεώρημα είναι αυτό του Green. Πριν όμως το διατυπώσουμε, θα αναφερθούμε σε έναν συμβολισμό που χρησιμοποιείται στον πολυμεταβλητό λογισμό (κι έτσι ίσως γίνει καλύτερα η σύνδεση των δύο όψεων του θεωρήματος).

Ο συμβολισμός που δίνουμε στην ουσία εμπλέκει τις λεγόμενες διαφορικές μορφές, και κανονικά είναι αυστηρός και με νόημα. Εδώ εμείς δεν θα ασχοληθούμε με διαφορικές μορφές, οπότε στην ουσία τα παρακάτω είναι μονάχα συμβολισμοί σ' αυτήν την παρουσίαση.

Έτσι λοιπόν, αν γράψουμε $dz = (dx, dy)$ και $f = (\Re f, \Im f)$, έχουμε συμβολικά ότι:

$$\int_{\gamma} f(z) dz = \int_{\gamma} (\Re f, \Im f) \cdot (dx, dy) = \int_{\gamma} \Re f dx + \Im f dy$$

Επιπλέον, ένας συμβολισμός που θα εμφανίζεται συχνά είναι ο ακόλουθος

Γενικά τα σύνολα των ολομόρφων κι αναλυτικών συναρτήσεων, $\mathcal{O}(\Omega)$, $\mathcal{A}(\Omega)$ ορίζονται σε ανοικτά σύνολα $\Omega \subseteq \mathbb{C}$. Παρόλα αυτά θα εμφανιστούν οι συμβολισμοί $\mathcal{O}(\overline{\Omega})$, $\mathcal{A}(\overline{\Omega})$, που θα σημαίνουν:

$$\mathcal{O}(\overline{\Omega}) = \mathcal{O}(A), \text{ για κάποιο ανοικτό } A \supset \Omega$$

και:

$$\mathcal{A}(\overline{\Omega}) = \mathcal{A}(A), \text{ για κάποιο ανοικτό } A \supset \Omega$$

Αυτός δεν είναι και πολύ καλός συμβολισμός από άποψη μαθηματικής ακρίβειας, είναι όμως συνήθης και στην περίπτωσή μας βολικός. Αντίστοιχοι συμβολισμοί θα δίνονται και για τα διάφορα σύνολα $C^n(\overline{\Omega})$, $n \in \mathbb{N}_0$.

Θεώρημα 3.3: (Το θεώρημα του Green). Έστω ένα ανοικτό, συνεκτικό και φραγμένο σύνολο $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ με ομαλό σύνορο $\partial\Omega$. Εάν $f : A \rightarrow \mathbb{C}$ είναι μία συνάρτηση τέτοια ώστε $\Re f, \Im f \in C^1(\overline{\Omega})$, τότε:

$$\int_{\partial\Omega} f(z) dz = \iint_{\Omega} \frac{\partial \Im f}{\partial x} - \frac{\partial \Re f}{\partial y} dxdy$$

Απόδειξη: Αν γράψουμε, με τους συμβολισμούς που δώσαμε:

$$\int_{\partial\Omega} f(z) dz = \int_{\partial\Omega} \Re f dx + \Im f dy = \iint_{\Omega} \frac{\Im f}{\partial x} - \frac{\Re f}{\partial y} dxdy$$

η σύνδεση του θεωρήματος με το γνωστό θεώρημα του Green γίνεται εμφανής. \square

3.4 Ο ολοκληρωτικός τύπος του Cauchy

3.4.1 Το λήμμα του Goursat

Το θεώρημα του Green είναι ίσως ένα από τα σημαντικότερα θεωρήματα της μιγαδικής ανάλυσης και του απειροστικού λογισμού. Μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές του -που δεδομένων των τύπων Cauchy-Riemann είναι φυσιολογική- είναι η ακόλουθη: Θεωρούμε μία απλή καμπύλη και θεωρούμε Ω το χωρίο

που περικλύει. Εάν f είναι μία συνάρτηση $f \in \mathcal{O}(\bar{\Omega}) \cap C^1(\bar{\Omega})$ (οπότε έχει -λόγω του C^1 - μερικές παραγώγους που είναι C^1), τότε:

$$\int_{\partial\Omega} f(z) dz = \iint_{\Omega} \frac{\partial \Im f}{\partial x} - \frac{\partial \Re f}{\partial y} dx dy \stackrel{*}{=} 0$$

(η ισότητα áστρο (*) είναι συνέπεια των εξισώσεων Cauchy-Riemann).



Εν τω μεταξύ θα βοηθήσει να εισάγουμε έναν συμβολισμό. Εάν γ είναι μία απλή καμπύλη, με $\mathcal{X}(\gamma)$ θα συμβολίζουμε το (κλειστό) χωρίο που περικλύει η καμπύλη αυτή (εννοείται αυτό που αντιλαμβανόμαστε ως «εσωτερικό» κάθε φορά).

Θα μπορούσε (όπως είχε γίνει στην πρώτη μορφή αυτών των σημειώσεων) να ακολουθηθεί μία ανάπτυξη βασιζόμενη στο προηγούμενο αυτό αποτέλεσμα. Οπότε, οι συναρτήσεις που ολοκληρώνονται θα έπρεπε να υποθέτονται ολόμορφες και C^1 σε όλα τα θεωρήματα που πηγάζουν από την προηγούμενη παρατήρηση. Στην πραγματικότητα όμως μπορούμε να κάνουμε κάτι καλύτερο -για συναρτήσεις ορισμένες σε απλά συνεκτικά σύνολα- το οποίο θα δούμε στη συνέχεια.

Λήμμα 3.1: (Λήμμα του Goursat). Έστω $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ένα ανοικτό σύνολο και $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ μία ολόμορφη συνάρτηση $f \in \mathcal{O}(\Omega \setminus \{\omega\}) \cap C(\Omega)$, $\omega \in \mathbb{C}$. Για τετράγωνο T με $\mathcal{X}(T) \subseteq \Omega$ έχουμε:

$$\int_T f(z) dz = \int_{\partial\mathcal{X}(T)} f(z) dz = 0$$

■

Απόδειξη: Η απόδειξη θα γίνει σε βήματα.

Βήμα I: Ας υποθέσουμε ότι η γ είναι ένα τετράγωνο πλευράς $a/4$ και ότι $\omega \in (\mathcal{X}(T))^\circ$ -η περίπτωση όπου το ω δεν είναι στο εσωτερικό χωρίο της T μπορεί να αντιμετωπιστεί με παρόμοιο τρόπο και, για χάρη συντομίας, δεν θα αναφερθεί. Χωρίζουμε το τετράγωνο στα 4, στα 8, στα 16 κ.ο.κ., υποδιαιρώντας κάθε φορά το τετράγωνο ή τα υποτετράγωνα στα 4. Οι προσανατολισμοί γίνονται έτσι ώστε:

$$\int_T (\cdot) dz = \sum_{k=1}^{4^n} \int_{T_k^n} (\cdot) dz$$

όπου:

$$\{T_k^n\}_{k=1}^{4^n}$$

είναι η οικογένεια των τετραγώνων που προκύπτουν μετά την n -οστή επανάληψη της υποδιαίρεσης. Επίσης κατασκευάζουμε τετράγωνο $E_\eta = E_{\eta(n)}$ γύρω από το ω , με πλευρά $\eta > 0$, που μικραίνει σε κάθε υποδιαίρεση και γίνεται $0 < \eta < \min\{a/4^n, \text{dist}(\omega, T)\}$.

Βήμα II: Αφού ορίσαμε τις υποδαιρέσεις του τετραγώνου, θα τροποποιήσουμε λίγο τα υποτετράγωνα. Αυτό το κάνουμε γιατί θα χρειαστεί αργότερα, όταν θα ολοκληρώσουμε πάνω σ' όλα αυτά τα τετράγωνα. Επειδή δεν ξέρουμε πώς ακριβώς η f συμπεριφέρεται στο ω , θα ολοκληρώσουμε μακριά απ' αυτό.

- Εάν κάποιο T_k^n τέμνει το E_η , τροποποιούμε το πρώτο έτσι ώστε να μην περιέχει το τμήμα του που βρίσκεται στο $\mathcal{X}(E_\eta)$. Στη θέση του μπαίνει το αντίστοιχο τμήμα του E_η .
- Εάν το E_η βρίσκεται εντός κάποιου $\mathcal{X}(T_k^n)$, τότε ενώνουμε με ευθύγραμμο τμήμα τα E_η , T_k^n . Προσανατολίζουμε το σχήμα με τον εξής τρόπο: Διατρέχουμε το E_η , το ευθύγραμμό τμήμα, το T_k^n και αντίστροφα το ίδιο ευθύγραμμό τμήμα.



Βήμα III: Έστω $\varepsilon > 0$. Εφόσον $f \in \mathcal{O}(\Omega \setminus \{\omega\})$, σε κάθε $\zeta \in \Omega \setminus \{\omega\}$ έχουμε:

$$\left| \frac{f(z) - f(\zeta)}{z - \zeta} - f'(\zeta) \right| < \varepsilon, \text{ για αρκετά μικρό } \delta \text{ και } z \in S(\zeta, \delta)$$

δηλαδή:

$$|f(z) - f(\zeta) - f(\zeta)(z - \zeta)| < \varepsilon \cdot |z - \zeta|$$

Εάν το n γίνει αρκετά μικρό ώστε $z \in \mathcal{X}(T_k^n) \subseteq S(\zeta, \delta)$, τότε η παραπάνω ανισότητα γίνεται:

$$|f(z) - f(\zeta) - f(\zeta)(z - \zeta)| < \varepsilon \cdot \text{diam } T_k^n = \varepsilon a \sqrt{2}/4^n$$

Έτσι τελικά:

$$\left| \int_{T_k^n} f(z) - f(\zeta) - f(\zeta)(z - \zeta) dz \right| \leq \int_{T_k^n} |f(z) - f(\zeta) - f(\zeta)(z - \zeta)| dz < \int_{T_k^n} \varepsilon a \sqrt{2}/4^n = \varepsilon a^2 \sqrt{2}/4^{2n-1}$$

Βήμα IV: Επειδή:

$$\int_{T_k^n} f(\zeta) dz = \int_{T_k^n} [f(\zeta)z]' dz = 0$$

(από το **Θεώρημα 3.2**) και:

$$\int_{T_k^n} f'(\zeta)(z - \zeta) dz = \int_{T_k^n} [f'(\zeta)(z - \zeta)^2/2]' dz = 0$$

(πάλι από το **Θεώρημα 3.2**), η σχέση του **Βήματος III** γίνεται:

$$\left| \int_{T_k^n} f(z) dz \right| < \varepsilon a^2 \sqrt{2}/4^{2n-1}$$

Αθροίζοντας λοιπόν στα $k \in [4^n]$, έπειτα:

$$\left| \int_{T+E_\eta} f(z) dz \right| = \left| \sum_{k=1}^{4^n} \int_{T_k^n} f(z) dz \right| < \varepsilon a^2 \sqrt{2} \sum_{k=1}^{4^n} \frac{1}{4^{2n-1}} \leq \varepsilon a^2 \sqrt{2} \sum_{\lambda=1}^{\infty} \frac{1}{4^\lambda} = \varepsilon a^2 \sqrt{2}/2$$

Επειδή το παραπάνω ισχύει για τυχόν $\varepsilon > 0$:

$$\int_{T+E_\eta} f(z) dz = 0$$

Βήμα V: Γράφουμε:

$$\left| \int_T f(z) dz \right| - \left| \int_{E_\eta} f(z) dz \right| \leq \left| \int_{T+E_\eta} f(z) dz \right| \Rightarrow \left| \int_T f(z) dz \right| \leq \left| \int_{T+E_\eta} f(z) dz \right| + \left| \int_{E_\eta} f(z) dz \right|$$

και παρατηρούμε ότι:

$$\left| \int_{E_\eta} f(z) dz \right| \leq \max |f|(E_\eta) \cdot \ell(E_\eta) \leq \max |f|(\mathcal{X}(T)) \cdot \ell(E_\eta) \leq \max |f|(\mathcal{X}(T)) \cdot a/4^{n-1} \xrightarrow{n} 0$$

Επομένως, η πρώτη σχέση του βήματος δίνει (σε συνδυασμό με το **Βήμα IV**) ότι:

$$\int_T f(z) dz = 0$$

□

Από το προηγούμενο λήμμα προκύπτουν διάφορά ανάλογά του. Κατ' αρχάς, αντί για τετράγωνο, ισχύει για κάθε ισοσκελές ορθογώνιο τρίγωνο (κι αυτό προκύπτει από το προηγούμενο λήμμα, χωρίζοντας το τετράγωνο στη μέση). Χωρίζοντας κάθε ισοσκελές τρίγωνο στη μέση, μπορούμε να δείξουμε ότι το λήμμα ισχύει για κάθε ορθογώνιο τρίγωνο, κι έπειτα για κάθε τρίγωνο (αφού φέρνοντας το κατάλληλο ύψος, κάθε τρίγωνο χωρίζεται σε δύο ορθογώνια τρίγωνα).

Η απόδειξη επίσης δείχνει ότι, αν η καμπύλη T (που δεν είναι κατ' ανάγκη τετράγωνο στην περίπτωση αυτή) είναι ευθυγραμμίσιμη, κλειστή και απλή, το ίδιο λήμμα ισχύει.

Γενικά φαίνεται ότι -παρά την πολύ δουλειά που κάναμε- η διατύπωση του λήμματος χρίζει βελτίωσης. Από εδώ και στο εξής λοιπόν, σταδιακά θα το βελτιώνουμε.

Για τη διατύπωση της παρακάτω πρότασης -που θα λειτουργήσει βοηθητικά για την απόδειξη άλλων αποτελεσμάτων- χρειάζεται ο ορισμός του αστρόμορφου συνόλου.

Ορισμός 3.8: (Αστρόμορφα σύνολα). Ένα σύνολο $A \subseteq \mathbb{C}$ θα λέγεται αστρόμορφο υπάρχει κάποιο $a \in A$ ώστε για κάθε $b \in A$, το ευθύγραμμο τμήμα $[a, b]$ περιέχεται στο A .

Πρόταση 3.2: Έστω $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ένα ανοικτό και αστρόμορφο σύνολο. Για κάθε $f \in \mathcal{O}(\Omega \setminus \{\omega\}) \cap C(\Omega)$, $\omega \in \mathbb{C}$, υπάρχει παράγουσα συνάρτηση F .

Απόδειξη: Υποθέτουμε ότι το Ω είναι αστρόμορφο σύνολο ως προς το w (w , όχι ω). Ορίζουμε:

$$F(z) = \int_{[w,z]} f(\zeta) d\zeta$$

και θα δείξουμε ότι η F αποτελεί παράγουσα της F . Πράγματι, επειδή το Ω είναι ανοικτό σύνολο, για κάθε $z_0 \in \Omega$ υπάρχει αρκετά μικρή περιοχή $S(z_0, \delta) \subseteq \Omega$. Θεωρούμε λοιπόν $z \in S(z_0, \delta) \setminus \{z_0\}$ και από το **Λήμμα 3.1** έχουμε:

$$\frac{F(z) - F(z_0)}{z - z_0} = -\frac{1}{z - z_0} \int_{[z,z_0]} f(\zeta) d\zeta$$

μιας και:

$$\int_{[w,z] + [z,z_0] - [w,z_0]} f(\zeta) d\zeta = 0 \Rightarrow F(z) - F(z_0) = - \int_{[z,z_0]} f(\zeta) d\zeta$$

Επιπλέον, είναι τετριμένο ότι:

$$f(z_0) = -\frac{f(z_0)}{z - z_0} \int_{[z,z_0]} d\zeta = -\frac{1}{z - z_0} \int_{[z,z_0]} f(z_0) d\zeta$$

οπότε, σε συνδυασμό με τα προηγούμενα:

$$\left| \frac{F(z) - F(z_0)}{z - z_0} - f(z_0) \right| = \left| \frac{1}{z - z_0} \int_{[z-z_0]} f(z_0) - f(\zeta) d\zeta \right| \leq \frac{1}{|z - z_0|} \int_{[z,z_0]} |f(z_0) - f(\zeta)| d\zeta$$

δηλαδή:

$$\left| \frac{F(z) - F(z_0)}{z - z_0} - f(z_0) \right| \leq \sup_{\zeta \in S(z_0, \delta)} |f(z_0) - f(\zeta)|$$

Έστω τώρα $\varepsilon > 0$. Μικραίνοντας αρκετά το δ , λόγω της συνέχειας της f , είναι δυνατόν να κάνουμε τη δεξιά ποσότητα όσο μικρή θέλουμε, δηλαδή:

$$\left| \frac{F(z) - F(z_0)}{z - z_0} - f(z_0) \right| < \varepsilon \Rightarrow F'(z_0) = f(z_0)$$

□

Λήμμα 3.2: (Λήμμα του Goursat για αστρόμορφα σύνολα). Έστω $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ένα ανοικτό και αστρόμορφο σύνολο, και $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ μία ολόμορφη συνάρτηση $f \in \mathcal{O}(\Omega \setminus \{\omega\}) \cap C(\Omega)$, $\omega \in \mathbb{C}$. Για κάθε κλειστή καμπύλη γ με $\gamma(I) \subseteq \Omega$ αληθεύει:

$$\int_{\gamma} f(z) dz = 0$$

■

Απόδειξη: Από την **Πρόταση 3.2** και το θεμελιώδες θεώρημα του απειροστικού λογισμού, σε συνδυασμό με το ότι η καμπύλη είναι κλειστή, έχουμε το ζητούμενο.

□

Πλέον είμαστε σχεδόν έτοιμοι να διατυπώσουμε τη γενικότερη μορφή του λήμματος. Χρειαζόμαστε μόνο λίγους ορισμούς και μία πρόταση.

Ορισμός 3.9: (Ομοτοπία μεταξύ καμπυλών και ομοτοπικές καμπύλες).

- Έστω γ, η δύο καμπύλες ορισμένες στο ίδιο σύνολο $I = [a, b]$, με κοινή αρχή και ίδιο πέρας. Η απαίτηση να ορίζονται στο ίδιο σύνολο δεν είναι καθόλου περιοριστική, αφού μπορούμε να αναπαραμετρήσουμε κάθε καμπύλη. Για παράδειγμα, κάθε καμπύλη γ μετασχηματίζεται σε καμπύλη γ^* με πεδίο ορισμού το $[0, 1]$:

$$\gamma^*(s) = \gamma(sa + (1-s)b), \quad s \in [0, 1]$$

Έστω $\Omega \subseteq \mathbb{C}$. Ορίζουμε ομοτοπία μεταξύ των γ, η κάθε συνάρτηση $H : I \times [0, 1] \rightarrow \Omega$ (αν υπάρχει) τέτοια ώστε:

- ◊ $H(s, 0) = \gamma(s)$
- ◊ $H(s, 1) = \eta(s)$
- ◊ $H(0, t) = \gamma(0) = \eta(0)$
- ◊ $H(1, t) = \gamma(1) = \eta(1)$
- ◊ Η H είναι συνεχής.

Στην ουσία η ύπαρξη μίας ομοτοπίας μεταξύ δύο καμπυλών με ίδια αρχή και ίδιο πέρας σημαίνει ότι η πρώτη καμπύλη μπορεί -με συνεχή τρόπο- να μετασχηματιστεί και να γίνει η δεύτερη. Έτσι λοιπόν, στην ομοτοπία $H(s, t)$ το t μπορούμε να το φανταζόμαστε ως χρόνο. Όταν το $t = 0$, η ομοτοπία είναι ακριβώς η καμπύλη γ , ενώ καθώς το t μεγαλώνει, η $H(s, t)$ πλησιάζει (με συνεχή τρόπο) την $H(s, 1)$, που είναι η η .

- Εάν γ και η είναι δύο καμπύλες όπως πριν για τις οποίες υπάρχει ομοτοπία H , θα λέμε ότι οι γ και η είναι ομοτοπικές.

Δεν είναι όλες οι καμπύλες (με ίδια αρχή και ίδιο τέλος) ομοτοπικές, κι αυτό γιατί η ομοτοπία εξαρτάται από το σύνολο Ω . Για παράδειγμα, εάν θεωρήσουμε τις δύο καμπύλες $\gamma, \eta : I \rightarrow \mathbb{C}$, με την ίδια αρχή και το ίδιο τέλος, που μάλιστα βρίσκεται ανάμεσα στις καμπύλες, δεν είναι δυνατόν η μία καμπύλη να μεταφερθεί στη δεύτερη -κινούμενοι εντός του Ω - με συνεχή τρόπο.

Όταν κάθε καμπύλη μπορεί να συμπέσει σε κάθε άλλη καμπύλη (με ίδια αρχή και ίδιο τέλος), θα λέμε ότι το σύνολο Ω είναι απλά συνεκτικό.

Ορισμός 3.10: (Απλά συνεκτικά σύνολα). Έστω $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ένα κατά τόξα συνεκτικό σύνολο. Το Ω θα λέγεται απλά συνεκτικό εάν οποιεσδήποτε καμπύλες $\gamma, \eta : I \rightarrow \mathbb{C}$, με την ίδια αρχή και το ίδιο τέλος, είναι ομοτοπικές. Γενικά τέτοια σύνολα Ω δεν έχουν τρύπες.

Πρόταση 3.3: Έστω $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ανοικτό σύνολο και $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ μία ολόμορφη συνάρτηση $f \in \mathcal{O}(\Omega \setminus \{\omega\}) \cap C(\Omega)$, $\omega \in \mathbb{C}$. Εάν $\gamma, \eta : I = [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$ είναι δύο ομοτοπικές καμπύλες με $\gamma(I), \eta(I) \subseteq \Omega$, τότε:

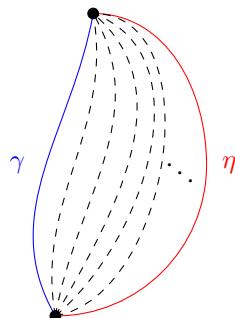
$$\int_{\gamma} f(z) dz = \int_{\eta} f(z) dz$$

Απόδειξη: Εφόσον οι δύο καμπύλες γ, η είναι ομοτοπικές, υπάρχει ομοτοπία $H(s, t)$ από την πρώτη στη δεύτερη. Τώρα, για κάθε σταθεροποιημένη χρονική στιγμή t , η συνάρτηση $H(\cdot, t)$ είναι μία καμπύλη, που είναι ακριβώς ο «μετασχηματισμός» της γ μετά από χρόνο t . Μάλιστα (από τον ορισμό της ομοτοπίας) $H(\cdot, 0) = \gamma(\cdot)$ και $H(\cdot, 1) = \eta(\cdot)$.

Αυτό που αποσκοπούμε να δείξουμε είναι ότι, για κάποιες κοντινές χρονικές στιγμές $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n = 1$, αληθεύει:

$$\int_{\gamma} f(z) dz = \int_{H(\cdot, t_0)} f(z) dz = \int_{H(\cdot, t_1)} f(z) dz = \dots = \int_{H(\cdot, t_n)} f(z) dz = \int_{\eta} f(z) dz$$

δηλαδή με μικρή μεταβολή στις καμπύλες, το ολοκλήρωμα δεν αλλάζει.



Έστω $\varepsilon > 0$. Για σταθεροποιημένο $\tilde{t} \in [0, 1]$, η (υπεραριθμήσιμη) οικογένεια δίσκων:

$$\left(S(H(s, \tilde{t}), \varepsilon) \right)_{s \in I}$$

αποτελεί κάλυμμα της καμπύλης $H(I, \tilde{t})$ (που είναι συμπαγές σύνολο), οπότε υπάρχει πεπερασμένη υποκάλυψη:

$$\left(S(H(s_k, \tilde{t}), \varepsilon) \right)_{k+1 \in [m]}$$

στην οποία διατάσσουμε με αύξοντα τρόπο τα s_k . Επιπλέον, απαιτούμε $s_0 = a$ και $s_m = b$.

Έστω $\delta > 0$. Θεωρώντας τις κάλυψεις (για τα διάφορα k):

$$\left(S(H(s_k, t), \delta) \right)_{t \in [0, 1]}$$

των $H(s_k, \cdot)$, μπορούμε να βρούμε πεπερασμένες υποκαλύψεις:

$$\left(S(H(s_k, t_\lambda), \delta) \right)_{\lambda+1 \in [n_k]}$$

Μάλιστα, αν $n = \max\{n_k\}_{k+1 \in [m]}$, τότε οι οικογένειες:

$$\left(S(H(s_k, t_\lambda), \delta) \right)_{\lambda+1 \in [n]}$$

είναι καλύψεις των $H(s_k, \cdot)$ (προσθέτοντας στοιχεία, όπου χρειάζεται). Και πάλι θα διατάξουμε τα t_λ και θα απαιτήσουμε $t_0 = 0$ και $t_n = 1$.

Τώρα, επειδή η H είναι συνεχής, για $\theta > 0$ και για αρκετά μικρά ε, δ και $|s_k - s_{k+1}| < \varepsilon, |t_\lambda - t_{\lambda+1}| < \delta$:

$$|H(s_k, t_\lambda) - H(s_{k+1}, t_{\lambda+1})| < \theta, |H(s_k, t_\lambda) - H(s_k, t_{\lambda+1})| < \theta$$

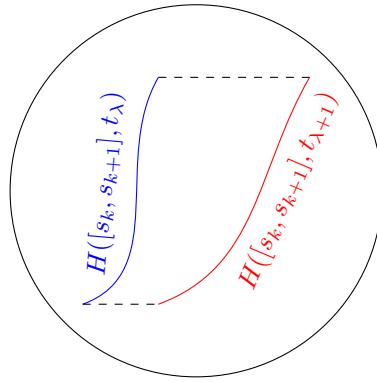
$$|H(s_k, t_\lambda) - H(s_{k+1}, t_\lambda)| < \theta, |H(s_k, t_{\lambda+1}) - H(s_{k+1}, t_{\lambda+1})| < \theta$$

Δηλαδή τα τμήματα καμπυλών $H([s_k, s_{k+1}], t_\lambda)$ και $H([s_k, s_{k+1}], t_{\lambda+1})$ περιέχονται σε δίσκο (ακτίνας το πολύ 2θ), έστω $S_{k,\lambda}$. Από το **Λήμμα 3.2**, εφόσον οι δίσκοι $S_{k,\lambda}$ είναι αστρόμορφα σύνολα:

$$\int_{H([s_k, s_{k+1}], t_\lambda) + T_{k+1,\lambda} - H([s_k, s_{k+1}], t_{\lambda+1}) - T_{k,\lambda}} f(z) dz = 0$$

όπου $T_{k,\lambda}$ είναι το ευθύγραμμο τμήμα $[H(s_k, t_\lambda), H(s_k, t_{\lambda+1})] \subseteq S_{k,\lambda}$. Δηλαδή:

$$\int_{H([s_k, s_{k+1}], t_\lambda)} f(z) dz - \int_{H([s_k, s_{k+1}], t_{\lambda+1})} f(z) dz = \int_{T_{k+1,\lambda}} f(z) dz - \int_{T_{k,\lambda}} f(z) dz$$



Αθροιζόντας τώρα στα $k+1 \in [m]$, έχουμε:

$$\sum_{k+1 \in [m]} \left(\int_{T_{k+1,\lambda}} f(z) dz - \int_{T_{k,\lambda}} f(z) dz \right) \stackrel{*}{=} \int_{T_{0,\lambda}} f(z) dz - \int_{T_{m,\lambda}} f(z) dz$$

(η άστρο (*) γίνεται τηλεσκοπικά). Επειδή $T_{0,\lambda} = \{\gamma(a) = \eta(a)\}$, $T_{m,\lambda} = \{\gamma(b) = \eta(b)\}$, έχουμε:

$$\sum_{k+1 \in [m]} \left(\int_{T_{k+1,\lambda}} f(z) dz - \int_{T_{k,\lambda}} f(z) dz \right) = 0$$

δηλαδή:

$$\sum_{k+1 \in [m]} \left(\int_{H([s_k, s_{k+1}], t_\lambda)} f(z) dz - \int_{H([s_k, s_{k+1}], t_{\lambda+1})} f(z) dz \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow \int_{H(\cdot, t_\lambda)} f(z) dz - \int_{H(\cdot, t_{\lambda+1})} f(z) dz = 0$$

Έτσι, αποδείξαμε το ζητούμενο:

$$\int_{\gamma} f(z) dz = \int_{H(\cdot, t_0)} f(z) dz = \int_{H(\cdot, t_1)} f(z) dz = \dots = \int_{H(\cdot, t_n)} f(z) dz = \int_{\eta} f(z) dz$$

□

Λήμμα 3.3: (**Λήμμα του Goursat για απλά συνεκτικά σύνολα**). Έστω $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ένα απλά συνεκτικό σύνολο και $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ μία ολόμορφη συνάρτηση $f \in \mathcal{O}(\Omega \setminus \{\omega\}) \cap C(\Omega)$. Για κάθε κλειστή καμπύλη $\gamma : I \rightarrow \mathbb{C}$ με $\gamma(I) \subseteq \Omega$ έχουμε:

$$\int_{\gamma} f(z) dz = 0$$

■

Απόδειξη: Χωρίζουμε την γ σε δύο καμπύλες, ψ και η , με κοινή αρχή και ίδιο τέλος (δηλαδή $\gamma = \psi - \eta$). Έπειτα, εφόσον το Ω είναι απλά συνεκτικό, οι ψ και η είναι ομοτοπικές, οπότε βάσει της **Πρότασης 3.3**:

$$\int_{\psi} f(z) dz = \int_{\eta} f(z) dz \Rightarrow \int_{\gamma} f(z) dz = \int_{\psi - \eta} f(z) dz = 0$$

□

3.4.2 Ο δείκτης στροφής

Δεδομένου του λήμματος του Goursat -και μάλιστα της εκδοχής που αποδεικνύεται μέσω του θεωρήματος του Green- μπορεί να δειχθεί ένα χρήσιμο αποτέλεσμα σχετικά με το πώς στρέφεται μία καμπύλη γύρω από ένα σημείο. Θα δειξουμε ότι, μέσω ενός ολοκληρώματος, είναι δυνατόν να υπολογιστεί πόσες φορές μία καμπύλη έχει στραφεί γύρω από ένα σημείο. Για την ακρίβεια, μπορούμε να υπολογίζουμε το πλήθος:

$$\text{αριστερόστροφες περιστροφές} - \text{δεξιόστροφες περιστροφές}$$

Μία ιδέα από την οποία θα εφορμήσουμε, θα δούμε στην ακόλουθη παρατήρηση. Πρώτα όμως, ας κάνουμε μία σημείωση.



Για να μπορούμε να ορίσουμε σωστά τον δείκτη στροφής, θα χρειαστεί οι καμπύλες γ με τις οποίες ασχολούμαστε να μην είναι «περιέργες». Συγκεκριμένα, για να χωρίσουμε μία καμπύλη γ σε απλές συνηστώσες, θα χρειαστεί το C^1 των καμπυλών. Επομένως, οποτε εμφανίζεται ο δείκτης στροφής, αυτό θα είναι κάτι που σιωπηρά θα υποθέτουμε.

Παρατήρηση 3.4: Για κάθε απλή καμπύλη $\gamma : I = [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$ με $0 \in (\mathcal{X}(\gamma))^{\circ}$ (που κατά σύμβαση στρέφεται αριστερόστροφα) έχουμε:

$$\int_{\gamma} \frac{1}{z} dz = 2\pi i$$

Γενικότερα, αν $\zeta \in \mathbb{C}$ και $\zeta \in (\mathcal{X}(\gamma))^{\circ}$, τότε:

$$\int_{\gamma} \frac{1}{z - \zeta} dz = 2\pi i$$

Απόδειξη: Κατ' αρχάς δεν χρειάζεται να δειξουμε το θεώρημα για τυχαίες καμπύλες, αρκεί να το δειξουμε για κύκλους. Εάν θεωρήσουμε $S(0, r) \subseteq (\mathcal{X}(\gamma))^{\circ}$, τότε $1/z \in \mathcal{O}(\mathcal{X}(\gamma) \setminus S(0, r)) \cap C^1(\mathcal{X}(\gamma) \setminus S(0, r))$. Από το λήμμα του Goursat -όπως αυτό αποδεικνύεται μέσω του θεωρήματος του Green- έπειται:

$$\int_{\gamma - \partial S(0, r)} \frac{1}{z} dz = \int_{\partial(\mathcal{X}(\gamma) \setminus S(0, r))} \frac{1}{z} dz = 0$$

δηλαδή:

$$\int_{\gamma} f(z) dz = \int_{\partial S(0,r)} f(z) dz$$

Τώρα, όσον αφορά τον κύκλο, τον παραμετροποιούμε έτσι ώστε να είναι καμπύλη του $[0, 1]$ (για παράδειγμα $e^{2\pi i\theta}$, $\theta \in [0, 1]$) και $\partial S(0,r)(0) = \partial S(0,r)(1) = -1 + 0i \in \underline{Ox'}$. Παρατηρούμε ότι στην καμπύλη:

$$\partial S(0,r)|_{[1/n, 1-1/n]} : [1/n, 1-1/n] \rightarrow \mathbb{C}$$

η $1/z$ δεν εμφανίζει κάποια «ανωμαλία». Μάλιστα εκεί αποτελεί παράγωγο συνάρτηση της \log (όπως είδαμε στην **Πρόταση 2.8, ii.**). Από το θεμελιώδες θεώρημα του απειροστικού λογισμού έπειτα:

$$\int_{\partial S(0,r)([1/n, 1-1/n])} \frac{1}{z} dz = \log(\partial S(0,r)(1-1/n)) - \log(\partial S(0,r)(1/n))$$

Αφήνοντας $n \rightarrow \infty$, έχουμε τελικά ότι:

$$\log(\partial S(0,r)(1-1/n)) - \log(\partial S(0,r)(1/n)) \rightarrow 2\pi i$$

και:

$$\int_{\partial S(0,r)} \frac{1}{z} dz = 2\pi i$$

□

Στην ουσία λοιπόν, η ποσότητα:

$$\delta_{\gamma}(\zeta) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{1}{z} dz$$

είναι πάντοτε 1 όταν η γ είναι απλή (κατά σύμβαση αριστερόστροφη) και $\zeta \in (\mathcal{X}(\gamma))^{\circ}$. Όσο δηλαδή το πλήθος των στροφών γύρω από το ζ . Φυσικά, εάν η γ είναι δεξιόστροφη, τότε το πλήθος πολλαπλασιάζεται με -1 .

Διαφορετικά, εάν η γ δεν είναι απλή, τότε έχουμε το ακόλουθο:

Θεώρημα 3.4: Έστω $\gamma : I = [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$ μία καμπύλη και $\zeta \in (\mathcal{X}(\gamma))^{\circ}$. Το πλήθος:

$$\delta_{\gamma}(\zeta) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{1}{z - \zeta} dz = \frac{1}{2\pi i} \int_I \frac{\gamma'(t)}{\gamma(t) - \zeta} dt$$

είναι ακέραιος που εκφράζει το πλήθος:

αριστερόστροφες περιστροφές γύρω από το ζ – δεξιόστροφες περιστροφές γύρω από το ζ

Απόδειξη: Εάν η καμπύλη γ δεν περιστρέφεται άπειρες φορές γύρω από το ζ , είναι δυνατόν να γράψουμε:

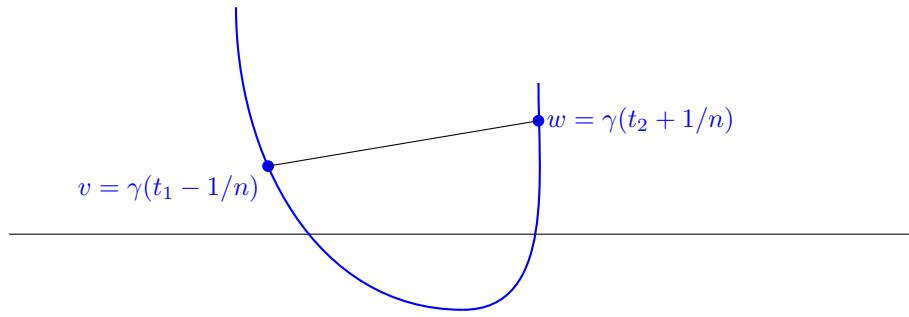
$$\frac{1}{2\pi i} \int_a^b \frac{\gamma'(t)}{\gamma(t) - \zeta} dt = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k \in [m]} \left(\log(\gamma(t_{k+1} + 1/n) - \zeta) - \log(\gamma(t_{k+1} - 1/n) - \zeta) \right)$$

όπου $\gamma(t_k)$, $k \in [m]$ είναι τα σημεία τομής της γ με τον άξονα $\zeta + \underline{Ox'}$. Επειδή ο λογάριθμος διαφέρει κατά $2\pi i$ μετά από κάθε αριστερόστροφη περιστροφή και $-2\pi i$ μετά από κάθε δεξιόστροφη (χωρίς πολλές λεπτομέριες) έχουμε το ζητούμενο.

Το μόνο που μένει αναπόδεικτο είναι ότι πράγματι η γ (ουσιωδώς) τέμνει πεπερασμένο το πλήθος φορές τον άξονα $\zeta + \underline{Ox'}$, δηλαδή δεν περιστρέφεται άπειρες φορές γύρω από το ζ . Λέμε «ουσιωδώς», γιατί εάν η γ «ταλαντώνεται» πάνω στον άξονα $\zeta + \underline{Ox'}$, τότε για κάθε δύο διαδοχικά «περάσματα» της γ χωρίς στροφή -έστω $\gamma(t_1)$ και $\gamma(t_2)$ - έχουμε:

$$\int_{\gamma([t_1-1/n, t_2+1/n]) + [w, v]} \frac{1}{z} dz = 0 \Rightarrow \int_{\gamma([t_1-1/n, t_2+1/n])} \frac{1}{z} dz = \int_{[v, w]} \frac{1}{z} dz$$

(από το **Λήμμα 3.2**) όπου $v = \gamma(t_1 - 1/n)$, $w = \gamma(t_2 + 1/n)$. Δηλαδή η καμπύλη γ μπορεί να αντικατασταθεί από μία άλλη καμπύλη, η οποία δεν ταλαντώνεται στον άξονα $\zeta + \underline{Ox'}$, χωρίς το ολοκλήρωμα να αλλάξει (υπάρχει και η περίπτωση που αυτή η ταλάντωση «εφάπτεται» στον μετατοπισμένο άξονα, αλλά δεν θα μας απασχολήσει γιατί αντιμετωπίζεται ενελώς ανάλογα -και στην τελική, περισσότερο θα δυσκολέψει απ' ότι θα βοηθήσει). Αυτή η καμπύλη είναι (για παράδειγμα) αυτή που έχει αντικαταστήσει τα τμήματα της καμπύλης $\gamma([t_1 - 1/n, t_2 + 1/n])$ με τα ευθύγραμμα τμήματα $[v - 1/n, w + 1/n]$.



Έτσι λοιπόν, γράφουμε την γ σε πολική μορφή:

$$\gamma(t) = \rho(t)(\cos \theta(t) + i \sin \theta(t)) + \zeta$$

με τις ρ, θ να είναι συνεχείς συναρτήσεις. Επειδή η θ είναι συνεχής σε κλειστό και φραγμένο διάστημα, είναι φραγμένη. Δηλαδή η ποσότητα:

$$\theta(b) - \theta(a)$$

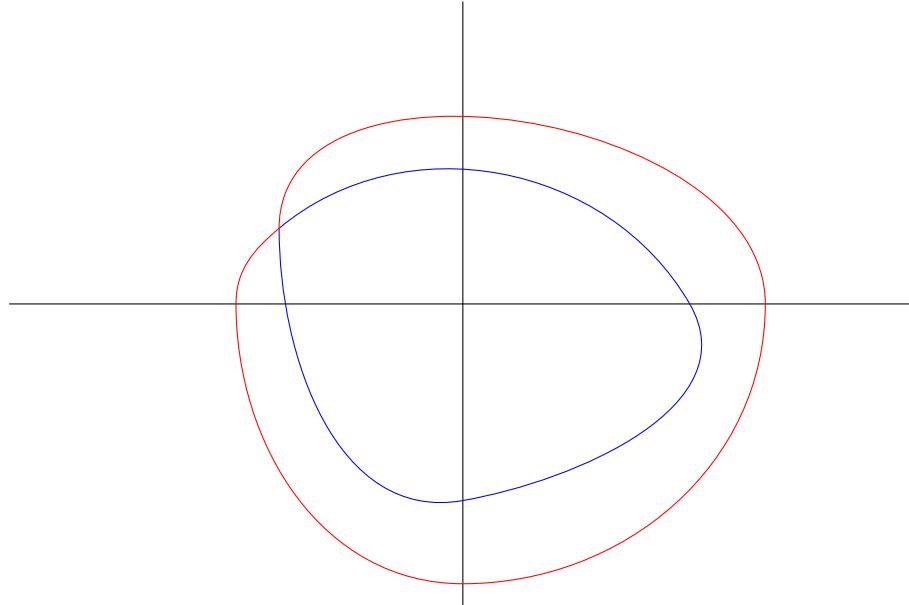
που εκφράζει το πλήθος των περιστροφών γύρω από το ζ , είναι πεπερασμένη.

□

Έχοντας πει όλα αυτά, ο επόμενος ορισμός είναι λογικός.

Ορισμός 3.11: (Δείκτης στροφής). Έστω $\gamma : I \rightarrow \mathbb{C}$ μία καμπύλη και $\zeta \in (\mathcal{X}(\gamma))^{\circ}$. Ορίζουμε ως δείκτη στροφής της γ γύρω από το ζ τον ακέραιο αριθμό:

$$\delta_{\gamma}(\zeta) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{1}{z - \zeta} dz$$



3.4.3 Ο ολοκληρωτικός τύπος του Cauchy

Έχοντας κάνει όλη αυτήν την προετοιμασία, είναι δυνατόν να αποδείξουμε ένα σημαντικό θεώρημα της μιγαδικής ανάλυσης, τον ολοκληρωτικό τύπο του Cauchy. Μ' αυτό αργότερα θα δείξουμε -μεταξύ άλλων- ότι οι ολόμορφες συναρτήσεις και οι αναλυτικές ταυτίζονται.

Θεώρημα 3.5: (Ολοκληρωτικός τύπος του Cauchy). Έστω $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ένα απλά συνεκτικό σύνολο και $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ μία ολόμορφη συνάρτηση $f \in \mathcal{O}(\Omega)$. Τότε, εάν $\gamma : I \rightarrow \mathbb{C}$ είναι μία καμπύλη με $\gamma(I) \subseteq \Omega$:

$$2\pi i \delta_{\gamma}(z) \cdot f(z) = \int_{\gamma} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta, \quad z \in \Omega \setminus \gamma(I)$$

Απόδειξη: Κατ' αρχάς θεωρούμε τη συνάρτηση:

$$\varphi(\zeta) = \begin{cases} \frac{f(\zeta) - f(z)}{\zeta - z}, & \zeta \neq z \\ f'(z), & \zeta = z \end{cases}$$

η οποία είναι συνεχής (λόγω της ολομορφίας της f) και $\varphi \in \mathcal{O}(\Omega \setminus \{z\})$ (δηλαδή $\varphi \in \mathcal{O}(\Omega \setminus \{z\}) \cap C(\Omega)$). Από το **Λήμμα 3.3** έχουμε:

$$0 = \int_{\gamma} \varphi(\zeta) d\zeta = \int_{\gamma} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta - \int_{\gamma} \frac{f(z)}{\zeta - z} d\zeta = \int_{\gamma} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta - 2\pi i \delta_{\gamma}(z) \cdot f(z)$$

δηλαδή:

$$2\pi i \delta_{\gamma}(z) \cdot f(z) = \int_{\gamma} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta, \quad z \in \Omega \setminus \gamma(I)$$

□

3.5 Συσχέτιση αναλυτικών και ολομόρφων συναρτήσεων

Είδαμε στο **Θεώρημα 2.3** (στο θεώρημα παραγώγισης δυναμοσειρών) ότι κάθε αναλυτική συνάρτηση είναι ολόμορφη. Είναι πολύ χρήσιμο αποτέλεσμα και το αντίστροφο, ότι δηλαδή κάθε ολόμορφη συνάρτηση είναι αναλυτική. Με το θεώρημα που θ' ακολουθήσει θα δείξουμε ότι, για κάθε ανοικτό σύνολο $\Omega \subseteq \mathbb{C}$:

$$\begin{aligned} \mathcal{O}(\Omega) &= \{f : \Omega \rightarrow \mathbb{C} \mid f \text{ ολόμορφη}\} \\ &= \{f : \Omega \rightarrow \mathbb{C} \mid \forall a \in \Omega \text{ η } f \text{ αναλύεται σε δυναμοσειρά σε περιοχή } S(a, r_a) \subseteq \Omega\} = \mathcal{A}(\Omega) \end{aligned}$$

Θεώρημα 3.6: (**Συσχέτιση αναλυτικών και ολομόρφων συναρτήσεων**). Έστω $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ένα ανοικτό σύνολο. Για κάθε $f \in \mathcal{O}(\Omega)$ έχουμε $f \in \mathcal{A}(\Omega)$. Δηλαδή ο εγκλεισμός $\mathcal{O}(\Omega) \subseteq \mathcal{A}(\Omega)$ αληθεύει. Ο αντίστροφος εγκλεισμός έπειται από το **Θεώρημα 2.3**, οπότε:

$$\mathcal{O}(\Omega) = \mathcal{A}(\Omega)$$

Απόδειξη: Θα δείξουμε ότι, για κάθε δίσκο $S(a, r) \subset \Omega$ στον οποίο η f είναι ολόμορφη, είναι κι αναλυτική. Θεωρούμε λοιπόν $z \in S(a, r)$, $\zeta \in \partial S(a, r)$ και παρατηρούμε ότι:

$$\left| \frac{z-a}{\zeta-a} \right| < 1$$

Δηλαδή (ως γεωμετρική) η σειρά:

$$\sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{z-a}{\zeta-a} \right)^k = \frac{1}{1 - \frac{z-a}{\zeta-a}} = \frac{\zeta-a}{\zeta-z}$$

συγκλίνει και ισούται με όσο γράψαμε. Έτσι λοιπόν:

$$\frac{1}{\zeta-z} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(z-a)^k}{(\zeta-a)^{k+1}}$$

και, πολλαπλασιάζοντας με $f(\zeta)$:

$$\frac{f(\zeta)}{\zeta-z} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{f(\zeta)}{(\zeta-a)^{k+1}} \cdot (z-a)^k$$

Από το **Θεώρημα 3.4**, εφόσον $\delta_{\gamma}(\partial S(a, r)) = 1$:

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\partial S(a, r)} \frac{f(\zeta)}{\zeta-z} d\zeta = \frac{1}{2\pi i} \int_{\partial S(a, r)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{f(\zeta)}{(\zeta-a)^{k+1}} \cdot (z-a)^k d\zeta$$

Εάν είναι δυνατόν να γίνει η εναλλαγή του αθροίσματος με το ολοκλήρωμα, το ζητούμενο θα έχει αποδειχθεί:

$$f(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \overbrace{\frac{1}{2\pi i} \int_{\partial S(a,r)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - a)^{k+1}} d\zeta}^{c_k} \cdot (z - a)^k = \sum_{k=0}^{\infty} c_k (z - a)^k$$

Αυτή η εναλλαγή είναι εφικτή, εφόσον όπως θα δείξουμε, η σύγκλιση:

$$\sum_{k=0}^n \frac{f(\zeta)}{(\zeta - a)^{k+1}} \cdot (z - a)^k \rightarrow \sum_{k=0}^{\infty} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - a)^{k+1}} \cdot (z - a)^k$$

είναι ομοιόμορφη (θυμηθείτε την **Πρόταση 3.1**). Για να δείξουμε την ομοιόμορφη σύγκλιση, θα επικαλεστούμε το κριτήριο ομοιόμορφης σύγκλισης του Weierstrass. Παρατηρούμε ότι:

$$\left| \frac{f(\zeta)}{(\zeta - a)^k} \cdot (z - a)^k \right| \leq \frac{\sup_{\zeta \in \partial S(a,r)} |f(\zeta)|}{r^{k+1}} \cdot |z - a|^k = \frac{\sup_{\zeta \in \partial S(a,r)} |f(\zeta)|}{r} \cdot \left(\frac{|z - a|}{r} \right)^k$$

με την δεξιά ποσότητα να είναι αθροίσιμη (το άθροισμά της συγκλίνει), αφού $|z - a|/r < 1$. Το κριτήριο ομοιόμορφης σύγκλισης αποδεικνύει την ομοιόμορφη σύγκλιση και κατ' επέκταση το θεώρημα.

□

Παρατήρηση 3.5: Σε συνδυασμό με τον κανόνα παραγώγισης δυναμοσειρών (**Θεώρημα 2.3**), το προηγούμενο θεώρημα δείχνει ότι κάθε ολόμορφη συνάρτηση είναι απείρως παραγωγίσιμη.

Παρατήρηση 3.6: Έστω $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ένα ανοικτό σύνολο και $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ μία ολόμορφη συνάρτηση $f \in \mathcal{O}(\Omega)$. Βάσει του **Θεωρήματος 3.6**, γύρω από κάθε $a \in \Omega$ η f έχει αναγραφή σε δυναμοσειρά:

$$f(z) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k (z - a)^k$$

Από την αναγραφή αυτή -σε συνδυασμό με τον κανόνα παραγώγισης δυναμοσειρών στο **Θεώρημα 2.3**- έχουμε:

$$c_k = \frac{f^{[k]}(a)}{k!}$$

Επιπλέον, από την απόδειξη του **Θεωρήματος 3.6**:

$$c_k = \frac{1}{2\pi i} \int_{\partial S(a,r)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - a)^{k+1}} d\zeta$$

Συνέπεια της προηγούμενης παρατήρησης είναι το ακόλουθο θεώρημα:

Θεώρημα 3.7: (Γενικευμένο θεώρημα του Cauchy). Έστω $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ένα ανοικτό σύνολο. Για κάθε ολόμορφη συνάρτηση $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ με $f \in \mathcal{O}(\Omega)$, και για απλή καμπύλη $\gamma : I \rightarrow \mathbb{C}$ με $\gamma(I) \subseteq \Omega$, έχουμε:

$$f^{[k]}(z) = \frac{k!}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z)^{k+1}} d\zeta, \quad z \in \Omega \setminus \gamma(I)$$

Απόδειξη: Θεωρώντας αρκετά μικρό δίσκο $S(z, r) \subseteq \gamma(I)$, λόγω της αναλυτικότητας (δηλαδή της ολομορφίας) της f έχουμε:

$$f^{[k]}(z) = \frac{k!}{2\pi i} \int_{\partial S(z,r)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z)^{k+1}} d\zeta$$

Από το θεώρημα του Green (εφόσον το σύνορο $\partial \overline{\gamma(I) \setminus S(z,r)}$ είναι ομαλό και οι ολόμορφες συναρτήσεις λείες), έχουμε το ζητούμενο.

□

3.6 Παράγουσες μιγαδικών συναρτήσεων

Όπως είδαμε στην απόδειξη του **Λήμματος 3.2**, καθοριστικής σημασίας ήταν η ύπαρξη παράγουσας σε αστρόμορφα σύνολα. Είδαμε συγκεκριμένα μία πρόταση, την οποία ξαναγράφουμε για χάρη πληρότητας.

Πρόταση 3.4: Έστω $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ένα ανοικτό και αστρόμορφο σύνολο. Για κάθε $f \in \mathcal{O}(\Omega \setminus \{\omega\}) \cap C(\Omega)$, $\omega \in \mathbb{C}$, υπάρχει παράγουσα συνάρτηση F .

Γενικά η ύπαρξη παραγουσών έχει αρκετό ενδιαφέρον κι αυτόνομα. Εμείς εδώ θα προσπαθήσουμε να εξασφαλίσουμε την ύπαρξη παραγουσών και σε άλλες περιπτώσεις, πρώτα όμως να κάνουμε μία παρατήρηση: σε αντίθεση με τις πραγματικές συναρτήσεις, η συνέχεια (και μόνο αυτή) μίας μιγαδικής συνάρτησης δεν εξασφαλίζει την ύπαρξη παγάγουσας (σε ένα σύνολο). Για παράδειγμα, η $1/(z)$ δεν έχει παράγουσα F στον κύκλο $\partial S(0, 1)$ (τον οποίο βλέπουμε ως καμπύλη του $[0, 1]$), παρά το ότι είναι συνεχής σ' αυτόν. Αν είχε παράγουσα, τότε:

$$1 = \delta_{\partial S(0,1)} = \frac{1}{2\pi i} \int_{\partial S(0,1)} \frac{1}{z} dz = F(\partial S(0,1)(1)) - F(\partial S(0,1)(0)) = 0$$

το οποίο είναι άτοπο. Γενικά, αυτό που εξασφαλίζει την ύπαρξη παραγουσών στις πραγματικές συναρτήσεις είναι η «καλή γεωμετρία» του \mathbb{R} , κάτι που δεν μεταβιβάζεται στις πολλές διαστάσεις.

Πάντως, η **Πρόταση 3.4** δείχνει το εξής:

Παρατήρηση 3.7: Έστω $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ένα ανοικτό σύνολο. Κάθε $f \in \mathcal{O}(\Omega \setminus \{\omega\}) \cap C(\Omega)$, $\omega \in \mathbb{C}$ έχει τοπικά παράγουσα συνάρτηση (εάν θεωρήσουμε αρκετά μικρούς δίσκους $S(a, r_a)$, γύρω από κάθε $a \in \Omega$).

Η **Πρόταση 3.4** μπορεί να γενικευτεί με αρκετούς τρόπους -μερικούς εξ' αυτών θα παραθέσουμε.

Πρόταση 3.5: Έστω $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ένα ανοικτό και αστρόμορφο σύνολο, και $\{\omega_k\}_{k \in [n]} \subseteq \mathbb{C}$ μία πεπερασμένη οικογένεια σημείων. Για κάθε $f \in \mathcal{O}(\Omega \setminus \{\omega_k\}_{k \in [n]}) \cap C(\Omega)$

Απόδειξη: Λόγω του ότι τα σημεία είναι πεπερασμένα στο πλήθος, μπορούμε (με ανάλογη απόδειξη) να αποδείξουμε μία γενικότερη μορφή του **Λήμματος 3.1**, άρα και της **Πρότασης 3.4**. \square

Πρόταση 3.6: (Θεώρημα του Morera). Έστω $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ένα ανοικτό σύνολο και $\{\omega_k\}_{k \in [n]} \subseteq \mathbb{C}$ μία πεπερασμένη οικογένεια σημείων. Για κάθε $f \in \mathcal{O}(\Omega \setminus \{\omega_k\}_{k \in [n]})$, τέτοια ώστε για κάθε τρίγωνο T με $\mathcal{X}(T) \subseteq \Omega$:

$$\int_T f(z) dz = 0$$

υπάρχει παράγουσα συνάρτηση F .

Απόδειξη: Από την απόδειξη της **Πρότασης 3.4** (ή καλύτερα της **Πρότασης 3.5**). \square

Η «μεγαλύτερη» γενίκευση που θα αποδείξουμε είναι η παρακάτω πρόταση, αμέσως μετά το λήμμα.

Λήμμα 3.4: Έστω $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ένα κατά τόξα συνεκτικό, ανοικτό σύνολο, $\{\omega_k\}_{k \in [n]} \subseteq \mathbb{C}$ μία πεπερασμένη οικογένεια σημείων και μία ολόμορφη συνάρτηση $f \in \mathcal{O}(\Omega \setminus \{\omega_k\}_{k \in [n]})$. Εάν για κάθε δύο καμπύλες γ, η μεταξύ δύο σημείων:

$$\int_{\gamma} f(\zeta) d\zeta = \int_{\eta} f(\zeta) d\zeta$$

(δηλαδή το ολοκλήρωμα είναι ανεξάρτητο της διαδρομής), τότε υπάρχει παράγουσα συνάρτηση F της f . \blacksquare

Απόδειξη: Για κάθε $z \in \Omega$, βρίσκουμε μία καμπύλη $\gamma_z : I \rightarrow \mathbb{C}$, $\gamma_z(\Omega) \subseteq \Omega$, από σταθεροποιημένο $a \in \Omega$ προς το z . Ορίζουμε τη συνάρτηση:

$$F(z) = \int_{\gamma_z} f(\zeta) d\zeta$$

(η οποία πράγματι ορίζεται και είναι ανεξάρτητη της επιλογής των γ_z). Ακολουθώντας τα βήματα της **Πρότασης 3.4** (ή καλύτερα της **Πρότασης 3.5**), η συνάρτηση F αποδεικνύεται ότι είναι πράγματι παράγουσα της f . \square

Πρόταση 3.7: Έστω $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ ένα απλά συνεκτικό σύνολο και $\{\omega_k\}_{k \in [n]} \subseteq \mathbb{C}$ μία πεπερασμένη οικογένεια σημείων. Για κάθε $f \in \mathcal{O}(\Omega \setminus \{\omega_k\}_{k \in [n]})$ υπάρχει παράγουσα συνάρτηση.

Απόδειξη: Από τον ορισμό των απλά συνεκτικών συνόλων, την **Πρόταση 3.3** και το **Λήμμα 3.4** (ή τέλος πάντων από μία προφανή γενίκευσή του), το ζητούμενο έπειται. \square

3.7 Ακεραίες συναρτήσεις και το θεμελιώδες θεώρημα της άλγεβρας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ανωμαλίες και ρίζες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Υπό προετοιμασία...

5.1 Υπό προετοιμασία...

Υπό προετοιμασία...

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία:

- (ZS) Zill Denis, Shanahan Patrick: **A First Course in Complex Analysis** (Jones and Bartlett Publishers, 2003)
- (Or) Orlando Merino: **A Short History of Complex Numbers** (Univ. of Rhode Island, 2006)
- (ER) Eberhard Freitag, Rolf Busam: **Complex Analysis** (Springer, δεύτερη έκδοση, 2008)
- (Ro) Romik Dan: **Complex Analysis** (UC Davis, 2020)
- (Ge) Gerarld Edgar: **Measure, Topology and Fractal Geometry** (Springer, δεύτερη έκδοση, 2008)

Ελληνική βιβλιογραφία:

- (Gi) Γιαννόπουλος Απόστολος: **Αναθητική Θεωρία Αρθμάν** (ΕΚΠΑ, σημειώσεις ΠΠΣ, 2022)
- (Ha) Χατζηαφράτης Τηλέμαχος: **Απειροστικός Λογισμός σε Πολλές Μεταβλητές** (Συμμετρία, 2009)
- (Ru) Walter Rudin: **Αρχές Μαθηματικής Αναμύσεως** (Leader Books, πρώτη έκδοση, 2000)
- (At) Αθανασόπουλος Κωνσταντίνος: **Διαφορική Γεωμετρία** (Παν. Κρήτης, σημειώσεις ΠΠΣ, 2020)
- (Fr) Φράγκος Αναστάσιος: **Εισαγωγή στην Επίπεδη Υπερβολική Γεωμετρία** (ΕΚΠΑ, σημειώσεις ΠΠΣ, επηρεασμένες από τον κ. Λάππα Διονύσιο, 2021)
- (Ko) Κουρουνιώτης Χρήστος: **Θεμέλια των Μαθηματικών** (Παν. Κρήτης, σημειώσεις ΠΠΣ, 2016)
- (Ma) Μαλιάκας Μιχαήλ: **Μαθήματα Βασικής Άλγεβρας και Θεωρίας Galois** (Τσότρας, 2022)
- (Ts) Τσαρπαλιάς Αθανάσιος: **Μιγαδική Ανάλυση** (ΕΚΠΑ, σημειώσεις ΠΠΣ, 2013)
- (CB) Churchill R.V., Brown J.W.: **Μιγαδικές συναρτήσεις και εφαρμογές** (Παν. εκδόσεις Κρήτης, δεύτερη έκδοση, 2020)
- (Me) Μερκουράκης Σοφοκλής: **Σημειώσεις Μιγαδικής Ανάλυσης** (ΕΚΠΑ, σημειώσεις ΠΠΣ, 2022)

Ευρετήριο

n -οστές μιγαδικές ρίζες, 11
 n -οστή ρίζα, 15

Όρισμα μιγαδικού αριθμού, 9
Υπαρξη ακτίνας σύγκλισης δυναμοσειράς, 31
Αλγεβρικό σώμα, 7
Αναλυτικές συναρτήσεις, 35
Αστρόμορφα σύνολα, 47
Δείκτης στροφής, 52
Διαφορισιμότητα, 23
Δυναμοσειρές, 29
Εκθετική με γενική βάση, 19
Εκθετική συνάρτηση, 17
Εναλλακτική μορφή ακτίνας σύγκλισης, 32
Εξισώσεις Cauchy - Riemann, 27
Επικαμπύλια μιγαδικά ολοκληρώματα, 41
Ευθυγραμμίσμες καμπύλες, 42
Θεμελιώδες θεώρημα της άλγεβρας, 14
Θεώρημα παραγώγισης δυναμοσειρών, 35
Θεώρημα του Moretta, 55
Καμπύλες, 40
Κανόνας της αλυσίδας, 27
Κριτήριο λόγου για δυναμοσειρές, 31
Κριτήριο ομοιόμορφης σύγκλισης του Weierstrass, 34
Λήμμα του Goursat, 45
Λήμμα του Goursat για απλά συνεκτικά σύνολα, 50

Λήμμα του Goursat για αστρόμορφα σύνολα, 47
Λογάριθμος, 18
Λύσεις τριτοβάθμιων εξισώσεων, 12
Μέτρο μιγαδικού αριθμού, 8
Μήκος καμπυλών, 42
Μιγαδικά ολοκληρώματα, 39
Μιγαδικά συνημίτονα και ημίτονα, 36
Μιγαδική μονάδα, 7
Μιγαδικοί αριθμοί, 6
Ολοκλήρωμα σε σύνορο, 41
Ολοκληρωτικός τύπος του Cauchy, 52
Ολομορφία, 24
Ολόμορφες συναρτήσεις, 25
Ομοτοπία μεταξύ καμπυλών, 47
Ομοτοπικές καμπύλες, 47
Παρατήρηση του Καραθεοδωρή, 25
Πραγματικά και φανταστικά μέρη, 8
Συζυγής μιγαδικός αριθμός, 8
Συσχέτιση αναλυτικών και ολομόρφων συναρτήσεων, 53
Σύνολα Julia, 20
Σύνολα αποδρόντων, 20
Σύνολα φυλακισμένων, 20
Τεθλασμένες προσεγγίσεις, 42
Το θεμελιώδες θεώρημα του απειροστικού λογισμού, 44
Το σύνολο του Mandelbrot, 22
Τύπος του de Moivre, 11