



pel final de mètodes analítics en teoria de nombres

Curs 2025-2026

BERNAT ESTEVE

2026

ÍNDEX

1	Capítol 1 Definicions	
1.1	Sèries de Dirichlet	4
1.2	Funcions L	4
1.3	Continuació meromorfa i equació funcional de $\zeta(s)$	6
1.4	Productes d'Hadamard	6
2	Capítol 2 Enunciat sense demostració del criteri de sumació d'Abel (Teorema 4, capítol 1)	
3	Capítol 3 Demostració del Teorema 8, capítol 3 (sense la part final de veure que la integral $I(s)$ defineix una funció holomorfa).	
4	Capítol 4 Demostració de la Proposició 6 del capítol 4, donat el seu enunciat i assumint la Proposició 7.	
5	Capítol 5 Demostració del Teorema 15 del capítol 4, donat el seu enunciat i assumint els corol·laris 10 i 14.	
6	Capítol 6 Demostració del Teorema 5 del capítol 5. La demostració ha d'incloure els enunciats i demostracions de Lema 2 i), Lema 3, i Proposició 4 i).	

7

Capítol 7

Demostració del Teorema 8 §5, donat el seu enunciat. A la demostració cal ser capaç d'enunciar el Lema 6 i) i el Lema 7 de capítol 5 amb les seves dues parts (però no cal donar les demostracions dels lemes).

8

Capítol 8

Demostració de la Proposició 8 de capítol 6 assumint el Lema 9 (l'enunciat del qual cal recordar).

9

Capítol 9

Demostració de Lema 5 del capítol 6 donat el seu enunciat.

DEFINICIONS

1.1 Sèries de Dirichlet

Definició 1.1 Sèrie de Dirichlet

Una sèrie de Dirichlet és una sèrie de la forma

$$\sum_{n \in \mathbb{Z}_{\geq 1}} \frac{f(n)}{n^s}$$

On $f: \mathbb{Z}_{\geq 1} \rightarrow \mathbb{C}$ és una funció aritmètica, i $s \in \mathbb{C}$.

Definició 1.2 Convergència de productoris

Sigui $\{z_n\}_n \subset \mathbb{C}$ una successió de complexos, aleshores el productori $\prod z_n$ convergeix si i només si existeix el límit $\lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{i=1}^n z_n$, i aquest és no nul.

Definició 1.3 Convergència absoluta de productoris

Donada una seqüència z_n amb $\Re(z_n) > 0$, aleshores el productori $\prod z_n$ es diu que convergeix absolutament si $\sum \log(z_n)$ convergeix absolutament.

1.2 Funcions L

Definició 1.4 Caràcter d'un grup

Sigui G un grup finit i abelià, aleshores un caràcter de G serà un morfisme $\psi: G \rightarrow \mathbb{C}^*$

(on \mathbb{C}^* és el grup multiplicatiu de $\mathbb{C} \setminus \{0\}$)

Definició 1.5 El grup de caràcters

Denotem per \widehat{G} al grup $\widehat{G} = \text{Hom}(G, \mathbb{C}^*) = \{\text{Caràcters de } G\}$, on la operació és:

$$\psi, \phi: G \rightarrow \mathbb{C}^* \quad \text{aleshores } (\psi \cdot_{\widehat{G}} \phi)(g) \mapsto \psi(g) \cdot_{\mathbb{C}^*} \phi(g)$$

I anomenarem a \widehat{G} el grup de caràcters de G .

Definició 1.6 Caràcter mòdul m

Un caràcter mòdul m és un caràcter de $(\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^\times$.

Definició 1.7 Caràcter principal mòdul m

El caràcter principal mòdul m és $\chi_0(a): \mathbb{Z}^+ \rightarrow \mathbb{C}$ definit per

$$\chi_0(a) = \begin{cases} 1 & \text{gcd}(a, m) = 1 \\ 0 & \text{altrament} \end{cases}$$

Definició 1.8 Funció L associada a un caràcter de Dirichlet

La funció L associada al caràcter de Dirichlet mòdul m χ és la sèrie de Dirichlet

$$L(\chi, s) = \sum_{n \geq 1} \frac{\chi(n)}{n^s}.$$

Definició 1.9 Funció m -èsima de Dirichlet

Sigui $m \in \mathbb{Z}_{\geq 1}$, aleshores la funció m -èsima de Dirichlet es defineix com

$$\zeta_m(s) := \prod_{\chi} L(\chi, s)$$

On el producte recorre tots els caràcters de Dirichlet mòdul m .

Definició 1.10 Caràcters reals i complexos.

Diem que $\chi: \mathbb{Z}_{\geq 1} \rightarrow \mathbb{C}$ és un caràcter de Dirichlet real si $\text{Im}(\chi) \subset \mathbb{R}$. És a dir $\text{Im}(\chi) \subset \{-1, 0, 1\}$. I direm que és complex altrament.

Definició 1.11 Caràcter conjugat

Direm $\overline{\chi}$ al caràcter de Dirichlet conjugat

$$\overline{\chi}: \mathbb{Z}_{\geq 1} \rightarrow \mathbb{C} \quad \text{que envia } a \in \mathbb{Z} \text{ a } \overline{\chi(a)} = \overline{\chi(a)}$$

I no és massa difícil de veure que aquesta funció és un caràcter de Dirichlet del mateix mòdul.

1.3 Continuació meromorfa i equació funcional de $\zeta(s)$

Definició 1.12 θ de Jacobi

La funció θ de Jacobi es defineix $\theta: \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}$

$$\theta(x) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} e^{-n^2 \pi x}$$

I definim també la funció ω com

$$\omega(x) = \sum_{n \geq 1} e^{-n^2 \pi x} = \frac{\theta(x) - 1}{2}$$

Definició 1.13 La funció Γ

La funció Γ es defineix:

$$\Gamma(s) = \int_0^\infty e^{-x} x^s \frac{dx}{x} \quad \text{per } \sigma > 0$$

Definició 1.14 Funció de Riemann completada

Definim la funció de Riemann completada com

$$\xi(s) := \frac{1}{2} s(s-1) \pi^{-\frac{s}{2}} \Gamma\left(\frac{s}{2}\right) \zeta(s)$$

I també tenim

$$\frac{s(s-1)}{2} \int_1^\infty \left(x^{\frac{s}{2}-1} + x^{-\frac{s+1}{2}} \right) \omega(x) dx + \frac{1}{2}$$

1.4 Productes d'Hadamard

Definició 1.15 Ordre d'una funció

Sigui $f(s)$ una funció entera. Es diu que f és d'ordre menor o igual que $\alpha \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ si existeix $r_0 \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ tal que

$$f(s) = \mathcal{O}\left(e^{|s|^\alpha}\right) \quad \text{per tot } |s| \geq r_0$$

Aleshores l'ordre de f es defineix

$$\inf\{\alpha \in \mathbb{R}_{\geq 0} \mid f \text{ és d'ordre } \leq \alpha\}.$$

ENUNCIAT SENSE DEMOSTRACIÓ DEL CRITERI DE SUMACIÓ D'ABEL (TEOREMA 4,CAPÍTOL 1)

2

Teorema 2.1 Criteri de sumació d'Abel

Sigui $a: \mathbb{Z}_{\geq 1} \rightarrow \mathbb{C}$, considerem $A(t) := \sum_{n \leq t} a(n)$ les sumes parcials de a ; i una funció $g: \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{C}$ amb derivada contínua en un interval $[x, y] \neq \emptyset^a$. Aleshores

$$\sum_{x < n \leq y} a(n)g(n) = A(y)g(y) - A(x)g(x) - \int_x^y A(t)g'(t)dt$$

^aPer alguna raó, al professor li ha agradat considerar l'interval $[y, x]$, però em nego a fer servir aquesta notació.

DEMOSTRACIÓ DEL TEOREMA 8, CAPÍTOL 3 (SENSE LA PART FINAL DE VEURE QUE LA INTEGRAL $I(s)$ DEFINEIX UNA FUNCIO HOLOMORFA).

3

Teorema 3.1

Per $\sigma > 1$, tenim:

$$\pi^{-\frac{s}{2}} \Gamma\left(\frac{s}{2}\right) \zeta(s) = -\frac{1}{s} + \frac{1}{s-1} + \underbrace{\int_1^\infty \left(x^{\frac{s}{2}-1} + x^{-\frac{s}{2}-\frac{1}{2}}\right) \omega(x) dx}_{=I(s)}$$

On la funció $I(s)$ és una funció holomorfa a tot \mathbb{C} .

Demostració. 1. Comencem amb $\Gamma(s)$, i apliquem el canvi de variable $x = n^2\pi x$ i ho treiem tot a fora.

2. Suposem que hi ha convergència absoluta, i fem el sumatori sobre $n \geq 1$ dels 2 costats (en un costat apareix ω i a l'altre apareix ζ).

3. Separem la integral $\int_0^\infty = \int_0^1 + \int_1^\infty$.

4. Fem el canvi de variable $u = \frac{1}{t}$ a la integral de la esquerra.

5. Fem servir $\theta(\frac{1}{x}) = \sqrt{x}\theta(x)$ i que $2\omega(x) + 1 = \theta$.

□

DEMOSTRACIÓ DE LA PROPOSICIÓ 6 DEL CAPÍTOL 4, DONAT EL SEU ENUNCIAT I ASSUMINT LA PROPOSICIÓ 7.

4

Proposició 4.1 proposició 6

Sigui f una funció entera d'ordre α . I suposem que f no té zeros. Aleshores es té que $f = e^{g(s)}$ on g és un polinomi de grau α . És a dir, que el grau d'una funció entera sense zeros ha de ser un enter.

Demostració. Ens caldrà el següent resultat d'AnCo:

Proposició 4.2 proposició 7

Sigui $U \subseteq \mathbb{C}$ simplement connex. Sigui $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ holomorfa i sense zeros en U . Aleshores existeix $g : U \rightarrow \mathbb{C}$ holomorfa tal que $f(s) = e^{g(s)}$ per tot $s \in U$.

1. Agafar la $g(s)$ que ens dona la proposició.

Per la proposició, podem dir que $f(s) = e^{g(s)}$ amb g entera. Com que f té ordre α :

$$|f(s)| \leq K e^{|s|^{\alpha+\delta}} \quad \forall \delta > 0, \quad \text{per } K \in \mathbb{C}, |s| \gg 1$$

I d'aquí en podem treure que

$$\Re(g(s)) \leq |s|^{\alpha+\delta} + \log(K) \quad \forall \delta > 0, \quad \text{per } K \in \mathbb{C}, |s| \gg 1$$

I ara, engrandint el valor de δ si fa falta, tenim

$$\Re(g(s)) \leq 2|s|^{\alpha+\delta}$$

i considerant $g \rightarrow g - g(0)$ (és a dir que podem assumir que $g(0) = 0$), podem expressar g amb la seva sèrie de Taylor:

$$g(s) = \sum_{n=1} a_n s^n$$

Amb $a_n = \frac{g^{(n)}(0)}{n!}$, i ara utilitzant Cauchy:

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{2\pi i} \int_{|s|=\mathbb{R}^n} \frac{g(s)}{s^{n+1}} ds = \\ &= \frac{1}{2\pi i} \int_0^{2\pi} \frac{g(Re^{i\theta})}{R^{n+1}e^{(n+1)i\theta}} Re^{i\theta} i d\theta = \\ &= \frac{1}{2\pi R^n} \int_0^{2\pi} \frac{g(Re^{i\theta})}{e^{ni\theta}} d\theta \end{aligned}$$

Considerem ara la següent integral

$$\int_{|s|=R} g(s) s^{n-1} ds = \underbrace{\int_0^{2\pi} g(Re^{i\theta}) R^n i e^{in\theta} d\theta}_{I_1} = 0 = \underbrace{\int_0^{2\pi} \overline{g(Re^{i\theta})} R^n i e^{-in\theta} d\theta}_{I_2}$$

Això és zero degut a que estem considerant $n \geq 1$, i per tant, la funció que estem integrant és entera. I per tant:

$$a_n = \frac{1}{2\pi R^n} \int_0^{2\pi} (g(Re^{i\theta}) + \overline{g(Re^{i\theta})}) e^{-in\theta} d\theta = \frac{1}{\pi R^n} \int_0^{2\pi} \Re(g(Re^{i\theta}) e^{-in\theta}) d\theta$$

Nosaltres sabem que $\Re(g(Re^{i\theta})) < 2R^{\alpha+\delta}$; però podria ser que $\Re(g(Re^{i\theta})) < 0$ fos molt negatiu; per tant, ens interessa tenir una fita per $|\Re(Re^{i\theta})|$:

$$|a_n| \leq \frac{1}{\pi R^n} \int_0^{2\pi} |\Re(g(Re^{i\theta}))|$$

Però notem que:

$$g(0) = 0 = \int_{|s|=R} \frac{g(s)}{s} ds = \int_0^{2\pi} g(Re^{i\theta}) d\theta = 0$$

I d'aquí en podem deduir que

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \Re(g(Re^{i\theta})) d\theta = 0$$

Per tant, podem canviar el coeficient sense cap preocupació:

$$\frac{1}{\pi R^n} \int_0^{2\pi} \Re(g(Re^{i\theta})) d\theta = 0$$

Però abans hem vist que el valor absolut de l'integrand era una fita de $|a_n|$:

$$|a_n| \leq \frac{1}{\pi R^n} \int_0^{2\pi} |\Re(g(Re^{i\theta}))| + \Re(g(Re^{i\theta})) d\theta \leq \frac{1}{\pi R^n} \int_0^{2\pi} \max\{0, 2\Re(g(Re^{i\theta}))\} d\theta$$

Però $\Re(g(s)) \leq 2|s|^{\alpha+\delta}$, per tant (per $|s| \gg 1$, però això no és un problema):

$$|a_n| \leq \frac{1}{\pi R^n} \int_0^{2\pi} 4R^{\alpha+\delta} d\theta = \frac{8\pi R^{\alpha+\delta}}{\pi R^n} = 8R^{\alpha+\delta-n}$$

I per $\alpha + \delta > n$, $|a_n| \leq 8R^{\alpha+\delta-n} \rightarrow 0$; per tant tots els coeficients de la sèrie de Taylor amb grau més gran que α seràn 0; i per tant, g és un polinomi (de grau α , ja que sabem que f és d'ordre α), que és el que volíem veure. \square

DEMOSTRACIÓ DEL TEOREMA 15 DEL CAPÍTOL 4, DONAT EL SEU ENUNCIAT I ASSUMINT ELS COROL·LARIS 10 I 14.

5

Teorema 5.1

La funció zeta de Riemann completada

$$\xi(s) = \frac{1}{2}s(s-1)\pi^{-s/2}\zeta(s)\Gamma\left(\frac{s}{2}\right)$$

satisfà:

1. Es una funció d'ordre 1.
2. Té un nombre infinit de zeros (a la franja crítica).
3. $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{|\rho_n|}$ divergeix; i $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{|\rho_n|^{1+\varepsilon}}$ convergeix $\forall \varepsilon > 0$.

Notem que els zeros de la funció ξ són exactament els zeros (amb multiplicitat) de ζ en la franja crítica.

Corol·lari 5.1 Corol·lari 10

Sigui f d'ordre α amb $f(0) \neq 0$. Aleshores per tot $\rho \in \mathbb{R}_{>\alpha}$, tenim:

1. $n(R) = \mathcal{O}(R^\rho)$ per tot $R \gg 1$; i on $n : \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{Z}_{\geq 1}$ és el número de zeros amb mòdul menor que R .
2. $\sum_{n \in N_f} |s_n|^{-1}$, on s_n és el n -èsim zero de f (indexat per N_f).

Corol·lari 5.2 Corol·lari 14

Sigui f d'ordre 1 amb $f(0) \neq 0$. Si $\sum_{n \in N_f} |s_n|^{-1}$ convergeix, aleshores $|f| < e^{C|s|}$ per $s \gg 1$.

Demostració. I amb aquesta remarca, procedirem a demostrar els 3 apartats del teorema. Notem que pel corol·lari 9 del tema 3, tenim que la funció ξ és una funció entera. A més, $\frac{1}{2}(s-1)s\pi^{-s/2} = \mathcal{O}(e^{|s|^{1+\varepsilon}})$ per tot ε positiu, i $|s| \gg 1$.

Ara només fa falta tractar la funció Γ , però sabem que $\Gamma(s/2) = \mathcal{O}(e^{|s|^{1+\varepsilon}}) \forall \varepsilon > 0$ i $|s| \gg 1$ amb $\sigma \geq 0$, tot i que aquesta última condició no ens importa, ja que $\xi(s) = \xi(1-s)$ i tot el que puguem dir per $\sigma > 0$ ho podem dir també per $\sigma < 0$.

Però pel teorema 15 del capítol 1, per $\sigma > 0$ tenim que

$$\zeta(s) = \underbrace{\frac{1}{s-1} + 1}_{\text{per } |s| > 1 \text{ fitat}} - s \underbrace{\int_1^\infty \frac{\{x\}}{x^{s+1}} dx}_{\text{per } |s| \gg 1 \text{ amb } \sigma > 1/2, \text{ fitat}} = \mathcal{O}(|s|).$$

Per tant, per $s \gg 1$, $\mathcal{O}(|s|) = \mathcal{O}(e^{|s|^\varepsilon})$, és a dir, que $\zeta(s) = \mathcal{O}(e^{|s|^\varepsilon})$ per $s \gg 1$ i $\sigma \geq \frac{1}{2}$.

En resum $|\xi(s)| = \mathcal{O}(e^{|s|^{1+\varepsilon}}) \forall \varepsilon > 0$, $|s| \gg 1$ i $\sigma \geq \frac{1}{2}$. I per l'equació funcional de ξ , ho tenim per $|s| \gg 1$. És a dir, que ξ és d'ordre ≤ 1 . I per tant, ara ens fa falta veure que l'ordre és exactament 1.

Per veure que la funció assoleix valors grans, farem un claim:

Claim:

Sigui $r \in \mathbb{Z}_{\geq 1}$, aleshores $\log(r!) \sim r \log(r)$ quan $r \rightarrow \infty$.

Demostració. La demostració de la claim consisteix en veure que

$$\log(r^r) = r \log(r) > \log(r!) = \sum_{i=1}^r \log(i) > \int_1^r \log(x) dx = r \log(r) - r + 1$$

□

O sigui, que en els enters, sabem que la funció Γ és gran:

$$\log(\xi) = \log(\Gamma) - \frac{s}{2} \log(\pi) + \log\left(\frac{1}{2}s(s-1)\right) + \log(\zeta)$$

Però en $s = 2r$: sabem que $\log \Gamma(r) = \log(r-1)! \sim r \log r$. També sabem que $\log \zeta(2r) = \log \sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^{2r}} \xrightarrow{r \rightarrow \infty} 0$ (ja que $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^r} \rightarrow 1$). I finalment la resta de coses són de la mida $-r/2 \log(\pi)$. Per tant

$$\log(\xi) \sim r \log(r) \quad \text{quan } r \rightarrow \infty.$$

I d'aquí en podem deduir que ξ té ordre 1. I d'aquí se'n desprenen la resta de coses.

Per tant, suposem que el número de zeros és finit, aleshores:

$$\sum_{n \in N_f} \frac{1}{|\rho_n|} < \infty \quad \implies \quad |\xi(s)| < e^{C|s|} \quad \text{per } s \gg 1$$

On la implicació ve del corol·lari 14; però això contradiu el fet que $\log(\xi(r)) \sim r \log(r)$. I això contradiu el fet que el sumatori convergeix.

Per veure que el segon sumatori convergeix, en tenim prou en invocar el corol·lari 10, i el resultat és immediat. \square

DEMOSTRACIÓ DEL TEOREMA 5 DEL CAPÍTOL 5. LA DEMOSTRACIÓ HA D'INCLOURE ELS ENUNCIATS I DEMOSTRACIONS DE LEMA 2 I), LEMA 3, I PROPOSICIÓ 4 I).

6

Lema 6.1

Per $\sigma > 1$ es té:

$$1. \Re \log(\zeta(s)) = \sum_p \sum_{m \geq 1} \frac{\cos(mt) \log p}{mp^{\sigma m}}$$

On en el segon apartat, la funció $\Lambda(n) = \begin{cases} \log p & \text{si } n = p^k \\ 0 & \text{altrament.} \end{cases}$

Demostració. Per $s \in \mathbb{R}_{>1}$ ja sabem del corol·lari ?? del capítol ??, que

$$\log(\zeta(s)) = - \sum_p \log(1 - p^{-s}) = \sum_p \sum_{m \geq 1} \frac{1}{mp^{\sigma m}}$$

I per continuació analítica, la igualtat es certa per $s = \sigma + it \in \mathbb{C}$. Per tant:

$$\log(\zeta(s)) = \sum_p \sum_{m \geq 1} \frac{1}{mp^{ms}} = \sum_p \sum_{m \geq 1} \frac{p^{-imt}}{mp^{m\sigma}}$$

I ara, si prenem la part real del que tenim:

$$\Re \log(\zeta(s)) = \sum_p \sum_{m \geq 1} \frac{\cos(mt \log p)}{mp^{m\sigma}}$$

On la igualtat ve de que si $\theta \in \mathbb{R}$, aleshores $p^{i\theta} = \log p(\cos(\theta) + i \sin(\theta))$. Que és el que volíem veure. □

Lema 6.2 Lema de Mertens

Per qualsevol $\theta \in \mathbb{R}$, tenim la següent desigualtat.

$$3 + 4 \cos(\theta) + \cos(2\theta) \geq 0$$

Demostració. Utilitzant la fórmula de l'angle doble del cosinus, tenim:

$$3 + 4 \cos(\theta) + \cos(2\theta) = 3 + 4 \cos(\theta) + \cos^2(\theta) - \sin^2(\theta) = 2(1 + \cos(\theta))^2 \geq 0$$
□

Proposició 6.1 Mertens per a la funció ζ .

Per $\sigma > 1$, tenim:

$$1. \quad \zeta^3(\sigma) |\zeta^4(\sigma + it)| |\zeta(\sigma + i2t)| \geq 1,$$

Demostració. Com que a $\sigma > 1$:

$$|\zeta(s)| = e^{\Re \log(\zeta(s))}$$

Només hem de veure que:

$$0 \leq 3 \log(\zeta(\sigma)) + 4 \Re \log(\zeta(\sigma + it)) + \Re \log \zeta(\sigma + 2it)$$

Però pel lema 6, tenim

$$3 \log(\zeta(\sigma)) + 4 \Re \log(\zeta(\sigma + it)) + \Re \log \zeta(\sigma + 2it) = \sum_p \sum_{m \geq 1} \frac{\log(p)}{mp^{\sigma m}} (3 + 4 \cos(mt \log p) + \cos(2mt \log p)) \geq 0$$

Que és el que havíem de veure pel primer apartat. □

Teorema 6.1 Regió lliure de zeros I

La funció $\zeta(s) \neq 0$ en $\sigma = 1$ (i per la simetria de ζ , en $\sigma = 0$).

Demostració. Procedirem per reducció a l'absurd: suposem que existeix alguna $t \in \mathbb{R}$ tal que $\zeta(1+it) = 0$. Clarament $t \neq 0$, ja que $\zeta(1) \neq 0$. De fet, podem dir una miqueta més: com que $\zeta(s) \sim \frac{1}{\sigma-1}$ quan $\sigma \rightarrow 1$.

Com que ζ té un zero en $1+it$, podem escriure $\zeta(s) = (s - (1+it))^m f(s)$ per alguna $m \geq 1$, on ara f no s'anul·la en $1+it$. Per tant, si considerem

$$\zeta(\sigma + it) = (\sigma - 1)^m f(\sigma + it)$$

I ara, utilitzem la proposició 6:

$$\lim_{\sigma \rightarrow 1} \underbrace{\zeta^3(\sigma)}_{\sim (\sigma-1)^{-3}} \underbrace{|\zeta^4(\sigma + it)|}_{\sim (\sigma-1)^4 |f(1+it)|} \underbrace{|\zeta(\sigma + 2it)|}_{< \infty} = \lim_{\sigma \rightarrow 1} (\sigma - 1)^{4m-3} |\dots| = 0$$

Però, la proposició ens diu que això és com a mínim 1 i, per tant, contradicció. \square

DEMOSTRACIÓ DEL
TEOREMA 8 §5, DONAT EL
SEU ENUNCIAT. A LA
DEMOSTRACIÓ CAL SER
CAPAÇ D'ENUNCIAR EL
LEMA 6 I) I EL LEMA 7 DE
CAPÍTOL 5 AMB LES
SEVES DUES PARTS (PERÒ
NO CAL DONAR LES
DEMOSTRACIONS DELS
LEMES).

7

Lema 7.1 Lema 6Per $1 < \sigma \leq 2$

$$-\frac{\zeta'(\sigma)}{\zeta(\sigma)} < \frac{1}{\sigma-1} + K \quad \text{on } K \in \mathbb{R}$$

Lema 7.2 Lema 7

Sigui $\rho = \beta + i\gamma$ un zero no trivial de $\zeta(s)$ amb $\gamma \geq 2$. Sigui $s = \sigma + it$ amb $1 < \sigma \leq 2$ i $t \geq 2$, aleshores

1. $-\Re\left(\frac{\zeta'(\sigma+2it)}{\zeta(\sigma+2it)}\right) < K \log(t)$ per $k \in \mathbb{R}_{>0}$.
2. Si a més $t = \gamma$, aleshores: $-\Re\left(\frac{\zeta'(\sigma+it)}{\zeta(\sigma+it)}\right) < k \log(t) - \frac{1}{\sigma-\beta}$ per $k \in \mathbb{R}_{\geq 0}$

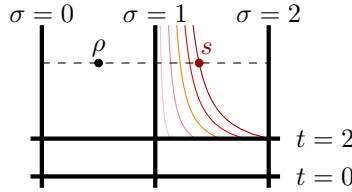
Lema 7.3 Teorema 8

Existeix $c \in \mathbb{R}_{>0}$ tal que ζ no té zeros a la regió $t \geq 2$, i $\sigma \leq 1 - \frac{c}{\log(t)}$

Demostració. Per la segona part 4, tenim que per $\sigma > 1$:

$$3 \left(-\frac{\zeta'(\sigma)}{\zeta(\sigma)} \right) - 4 \Re \left(\frac{\zeta'(\sigma+it)}{\zeta(\sigma+it)} \right) - \Re \left(\frac{\zeta'(\sigma+2it)}{\zeta(\sigma+2it)} \right) \geq 0 \quad (7.1)$$

Sigui $s(t) = \sigma + it$ on $\sigma = 1 + \frac{\delta}{\log(t)}$, per algun $\delta \in (0, \log 2]$ (prenem δ en aquest interval per tal de tenir $\sigma \in (1, 2]$, per a qualsevol $t \geq 2$). Això ens donarà aquesta corba:



I ara, prenem t com l'ordenada del zero no trivial de ζ : $\rho = \beta + i\gamma$. Apliquem ara el lema 6 i 7 a la desigualtat del principi (7), i obtenim:

$$0 \leq \underbrace{\frac{3}{\sigma-1} + k_1}_{\text{lema 6, i)}} + \underbrace{k_2 \log(t) - \frac{4}{\sigma-\beta}}_{\text{lema 7, ii)}} + \underbrace{k_3 \log(t)}_{\text{lema 7 i)}}$$

Si prenem $k/2 \geq \max\{k_1, k_2, k_3\}$, podem suposar que tenim una k comuna (i si cal, la fem encara més gran per a quedar-nos només el termes dominants), obtenim:

$$\frac{4}{\sigma-\beta} < \frac{3}{\sigma-1} + k \log(t)$$

Posant $\sigma = 1 + \frac{\delta}{\log(t)}$:

$$\frac{4}{1 + \frac{\delta}{\log(t)} - \beta} < \frac{3 \log(t)}{\delta} + k \log(t)$$

I que manipulant una mica les coses, tenim:

$$\frac{4}{1 + \frac{\delta}{\log(t)} - \beta} < \frac{\log(t)}{\delta} (3 + k\delta).$$

Com que $\beta \in (0, 1)$, sabem que $\sigma - \beta > 0$, és a dir, que podem invertir les coses:

$$\frac{4\delta}{\log(t)(3+k\delta)} < 1 + \frac{\delta}{\log(t)} - \beta$$

És a dir:

$$\beta < -\frac{4\delta}{\log(t)(3+k\delta)} + 1 + \frac{\delta}{\log(t)} = 1 - \frac{1}{\log(t)} \underbrace{\delta \left(\frac{4}{3+k\delta} - 1 \right)}_{=c}$$

Per tant, per δ prou petita ($\delta < \frac{1}{k}$), tenim que la $c > 0$, que és el que volíem veure. \square

DEMOSTRACIÓ DE LA PROPOSICIÓ 8 DE CAPÍTOL 6 ASSUMINT EL LEMA 9 (L'ENUNCIAT DEL QUAL CAL RECORDAR).

8

Proposició 8.1 Proposició 8

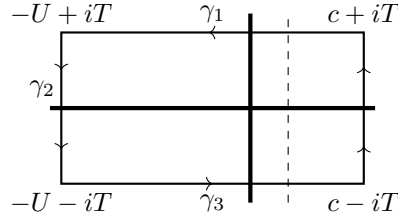
Per $T \gg 1$, i $x \in \mathbb{R}_{\geq 2}$, i $c = 1 + \frac{1}{\log x}$, aleshores:

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{c-iT}^{c+iT} \underbrace{\left(-\frac{\zeta'(s)}{\zeta(s)} \right)}_{F(s)} \frac{x^s}{s} ds = x - \sum_{\substack{\rho=\beta+i\gamma \\ |\gamma|<T}} \frac{x^\rho}{\rho} - \frac{\zeta'(0)}{\zeta(0)} - \frac{1}{2} \log \left(1 - \frac{1}{x^2} \right) + \mathcal{O} \left(\frac{x(\log T)^2}{T \log(x)} \right)$$

On la suma sobre ρ és una suma sobre els zeros no trivials de ζ .

Comentari: l'expressió a la dreta té 4 termes, cadascun representa una família de pols/zeros de $\zeta(s) \frac{x^s}{s}$: el x representa el pol en $s = 0$ de ζ ; la suma representa els zeros no trivials de $\zeta(s)$; el $\zeta'(0)/\zeta(0)$ representa el zero de $\frac{x^s}{s}$, i el logaritme representa els zeros trivials de ζ .

Demostració. Considerem el següent contorn:



On U és un senar positiu; i T no és la ordenada de cap zero de ζ .

Recordem per l'exercici 4 del FP 8, $\frac{\zeta'(s)}{\zeta(s)}$ té un pol a cada pol/zero de ζ , amb residu l'ordre del zero o pol. Per tant:

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{c-iT}^{c+iT} F(s) ds = -R - \underbrace{\frac{1}{2\pi i} \int_{c+iT}^{-U+iT} F(s) ds}_{I_1} - \underbrace{\frac{1}{2\pi i} \int_{-U+iT}^{-U-iT} F(s) ds}_{I_2} - \underbrace{\frac{1}{2\pi i} \int_{-U-iT}^{c-iT} F(s) ds}_{I_3}$$

On R són els residus:

$$R = \overbrace{\sum_{\substack{\rho=\beta+i\gamma \\ -U < \beta < 1 \\ |\gamma| < T}} \text{Res}_{s=\rho} F(s)}^{R_1} + \overbrace{\text{Res}_{s=0} F(s)}^{R_2} + \overbrace{\text{Res}_{s=1} F(s)}^{R_3}$$

Notem que l'ordre dels zeros trivials de R_1 és 1 (i els no trivials els sumem tantes vegades com l'ordre del zero); i els altres residus són:

$$R_1 = \sum_{\substack{\rho=\beta+i\gamma \\ -U < \beta < c \\ |\gamma| < T}} \frac{x^\rho}{\rho} + \sum_{2 \leq 2m < U} \frac{x^{-2m}}{-2m}$$

$$R_2 = \frac{\zeta'(0)}{\zeta(0)}$$

$$R_3 = x$$

Per tant, ens queda:

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{c-iT}^{c+iT} F(s) ds = - \sum_{\substack{\rho=\beta+i\gamma \\ -U < \beta < c \\ |\gamma| < T}} \frac{x^\rho}{\rho} + \sum_{2 \leq 2m < U} \frac{x^{-2m}}{-2m} - \frac{\zeta'(0)}{\zeta(0)} - x + I_1 + I_2 + I_3$$

I ara, pel lema 9:

Lema 8.1 Lema 9

Les integrals:

$$I_1, I_3 = \mathcal{O}\left(\frac{x(\log T)^2}{T \log x}\right)$$

$$I_2 = \mathcal{O}\left(\frac{T \log U}{U x^U}\right)$$

Aleshores, prenent $U \rightarrow \infty$, tenim:

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{c-iT}^{c+iT} F(s) \mathrm{d}s = x - \sum_{\substack{\rho=\beta+i\gamma \\ |\gamma|<T}} \frac{x^\rho}{\rho} - \underbrace{\frac{1}{2} \sum_{n \geq 1} \frac{x^{-2n}}{-2n}}_{\text{Taylor de } \log(1-x^2)} - \frac{\zeta'(0)}{\zeta(0)} + \mathcal{O}\left(\frac{x(\log T)^2}{T \log x}\right)$$

Que és el que volíem veure. □

DEMOSTRACIÓ DE LEMA 5 DEL CAPÍTOL 6 DONAT EL SEU ENUNCIAT.

9

Lema 9.1 Lema 5

Sigui

$$\delta(y) = \begin{cases} 0 & \text{si } y \in (0, 1) \\ \frac{1}{2} & \text{si } y = 1 \\ 1 & \text{si } y > 1 \end{cases}$$

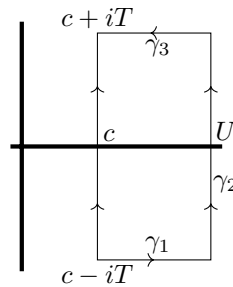
Aleshores, per $y > 0$, $c > 0$, $T > 0$:

$$\left| \frac{1}{2\pi i} \int_{c-iT}^{c+iT} \frac{y^s}{s} ds - \delta(y) \right| < \begin{cases} \frac{y^c}{T|\log y|} & \text{si } y \neq 1 \\ \frac{c}{T} & \text{si } y = 1. \end{cases}$$

Demostració. Per fer aquesta demostració distingirem 3 casos: $y \in (0, 1)$, $y = 1$ i $y > 1$.

Cas 1: $y \in (0, 1)$.

Considerem el següent contorn:



Aleshores, com que a dins d'aquest contorn, la funció y^s/s no té pols, podem canviar aquesta integral per les altres tres integrals:

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{c-iT}^{c+iT} \frac{y^s}{s} ds = \underbrace{\frac{1}{2\pi i} \int_{c-iT}^{U-iT} \frac{y^s}{s} ds}_{=I_1(U)} + \underbrace{\frac{1}{2\pi i} \int_{U-iT}^{U+iT} \frac{y^s}{s} ds}_{=I_2(U)} + \underbrace{\frac{1}{2\pi i} \int_{U+iT}^{c+iT} \frac{y^s}{s} ds}_{=I_3(U)}$$

Però com que en γ_2 la integral és fàcil de fitar:

$$|I_2| \leq \int_{\gamma_2} \left| \frac{y^s}{s} \right| ds \leq 2T \frac{y^U}{U} \xrightarrow{U \rightarrow \infty} 0$$

Només ens hem de preocupar de $I_1 = \lim_{U \rightarrow \infty} I_1(U)$ i de $I_3 = \lim_{U \rightarrow \infty} I_3(U)$. I ara per fitar les altres integrals:

$$|I_1| \leq \frac{1}{2\pi} \int_c^\infty \frac{|y^{\sigma-iT}|}{|\sigma-iT|} d\sigma$$

I com que $|\sigma-iT| > |T|$:

$$\frac{1}{2\pi} \int_c^\infty \frac{|y^{\sigma-iT}|}{|\sigma-iT|} d\sigma \leq \frac{1}{2\pi} \int_c^\infty \frac{y^\sigma}{T} d\sigma = \frac{1}{2\pi T} \left[\frac{y^\sigma}{\log y} \right]_c^\infty = \frac{y^c}{2\pi T |\log y|}$$

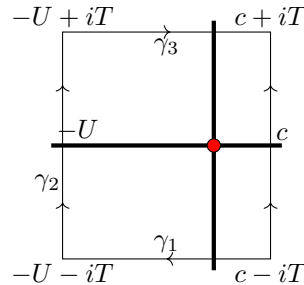
I si repetim aquest mateix càlcul amb l'altra integral ens dona:

$$|I_3| \leq \frac{y^\sigma}{2\pi T |\log y|}$$

I si ho ajuntem tot, obtenim una fita millor que la que volíem.

Cas 2: $y > 1$.

Considerem ara, aquest contorn:



Ara no podem fer el que hem fet abans: ara en aquest contorn hi ha un pol en el $s = 0$. Per tant, haurem de sumar el residu del pol:

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{c-iT}^{c+iT} \frac{y^s}{s} ds = \text{Res}_{s=0} \frac{y^s}{s} + I_1(-U) + I_2(-U) + I_3(-U)$$

I de la mateia manera que abans, $I_2(-U) \xrightarrow{U \rightarrow \infty} 0$, i les altres 2 integrals es poden fitar per:

$$|I_1| \leq \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^c \frac{y^\sigma}{T} d\sigma = \frac{1}{2\pi T} \left[\frac{y^\sigma}{\log y} \right]_{-\infty}^c = \frac{y^c}{2\pi T |\log y|}$$

I l'altra integral es pot fitar igual.

Cas 3: $y = 1$.

Com que la funció és més senzilla, podem fer-ho d'una manera més directa:

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{2\pi i} \int_{c-iT}^{c+iT} \frac{1}{s} ds &= \frac{1}{2\pi i} \int_{-T}^T \frac{i}{c+it} dt = \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-T}^T \frac{c-it}{|c+it|^2} dt = \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-T}^T \frac{c-it}{c^2+t^2} dt = \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-T}^T \frac{c}{c^2+t^2} dt - \underbrace{\frac{i}{2\pi} \int_{-T}^T \frac{t}{c^2+t^2} dt}_{=0}
 \end{aligned}$$

Aquí la segona integral és zero per la paritat de la funció que estem integrant.

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{2\pi} \int_{-T}^T \frac{c}{c^2+t^2} dt &= \frac{1}{2\pi} \int_{-T/c}^{T/c} \frac{1}{1+u^2} du = \\
 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{T/c} \frac{1}{1+u^2} du = \\
 &= \frac{1}{\pi} \left(\underbrace{\int_0^\infty \frac{1}{1+u^2} du}_{=\frac{\pi}{2}} - \int_{T/c}^\infty \frac{1}{1+u^2} du \right)
 \end{aligned}$$

Per tant:

$$\left| \frac{1}{2\pi i} \int_{c-iT}^{c+iT} \frac{1}{s} ds - \frac{1}{2} \right| \leq \frac{1}{\pi} \int_{T/c}^\infty \frac{1}{1+u^2} du \leq \int_{T/c}^\infty \frac{1}{u^2} du = \frac{1}{\pi} \left[\frac{-1}{u} \right]_{T/c}^\infty = \frac{c}{\pi T} < \frac{c}{T}$$

Que és el que volíem veure. □