



ISTITUZIONI DI FISICA MATEMATICA

Corso di 6 Crediti
Corso di Laurea Specialistica in
Matematica
A.A. 2008-2009

Cornelis VAN DER MEE

Dipartimento di Matematica e Informatica
Università di Cagliari

Viale Merello 92, 09123 Cagliari

070-6755605 (studio), 070-6755601 (FAX), 335-5287988 (cell.)

cornelis@krein.unica.it

<http://bugs.unica.it/~cornelis>

oppure: <http://krein.unica.it/~cornelis>

Indice

| | | |
|------------|---|-----------|
| I | EQUAZIONI DELLA FISICA MATEMATICA | 1 |
| 1 | Coordinate ortogonali | 1 |
| 2 | Separazione delle variabili | 4 |
| 3 | Equazione di Helmholtz | 9 |
| 3.1 | Equazione di Helmholtz nell'Intervallo | 9 |
| 3.2 | Equazione di Helmholtz nel Rettangolo | 13 |
| 4 | Equazioni delle onde e del calore | 14 |
| 4.1 | Equazioni delle onde e del calore nell'intervallo | 14 |
| 4.2 | Equazioni delle onde e del calore nel rettangolo | 17 |
| II | ANALISI FUNZIONALE | 21 |
| 1 | Spazi di Banach | 21 |
| 2 | Spazi di Hilbert | 23 |
| 3 | Basi ortonormali in spazi di Hilbert | 25 |
| 4 | Applicazioni | 27 |
| 5 | Operatori lineari | 29 |
| 5.1 | Proprietà generali | 29 |
| 5.2 | Proprietà spettrali | 31 |
| 5.3 | Operatori autoaggiunti e unitari | 33 |
| 5.4 | Operatori autoaggiunti non limitati | 36 |
| III | EQUAZIONI DIFFERENZIALI E FUNZIONI SPECIALI | 39 |
| 1 | Equazioni Differenziali di Secondo Ordine | 39 |
| 2 | Metodo di Frobenius | 41 |
| 3 | Funzioni Ipergeometriche | 46 |
| 4 | Funzioni di Bessel | 50 |
| 4.1 | Definizione e proprietà semplici | 50 |
| 4.2 | Funzioni di Bessel di seconda specie | 52 |
| 4.3 | Ortogonalità e zeri | 54 |
| 4.4 | Altre funzioni cilindriche | 58 |
| 4.5 | Funzioni sferiche di Bessel | 60 |

| | | |
|--------------------------------------|--|------------|
| 5 | Funzioni sferiche | 61 |
| 5.1 | Funzioni sferiche | 62 |
| 5.2 | Polinomi di Legendre | 63 |
| 5.3 | Funzioni di Legendre associate | 70 |
| 5.4 | Le funzioni sferiche per $n = 3$: Completezza | 71 |
| 6 | Polinomi di Hermite | 72 |
| 7 | Polinomi di Laguerre | 75 |
| 8 | Polinomi di Chebyshev | 80 |
| 9 | Polinomi Ortogonali Generali | 82 |
| IV EQUAZIONI INTEGRALI | | 87 |
| 1 | Proprietà Elementari e Iterazione | 87 |
| 2 | Equazioni integrali di Volterra | 92 |
| 3 | Equazioni Integrali con Nucleo Hermitiano | 94 |
| 4 | Teorema di Hilbert-Schmidt | 101 |
| V PROBLEMI DI STURM-LIOUVILLE | | 105 |
| 1 | Problema di Sturm-Liouville | 105 |
| 1.1 | Funzione di Green | 106 |
| 1.2 | Riduzione ad un'equazione integrale | 110 |
| 1.3 | Proprietà degli autovalori e delle autofunzioni | 112 |
| 2 | Problemi di Sturm-Liouville singolari | 115 |
| VI FUNZIONI DI GREEN | | 121 |
| 1 | Classificazione delle equazioni alle derivate parziali | 121 |
| 2 | Problemi agli autovalori multidimensionali | 123 |
| 2.1 | Impostazione del problema agli autovalori | 123 |
| 2.2 | Formule di Green | 124 |
| 2.3 | Proprietà dell'operatore L | 125 |
| 3 | Equazioni ellittiche | 127 |
| 3.1 | Equazioni di Laplace e di Poisson | 128 |
| 3.1.a | Equazione di Poisson negli intervalli | 129 |
| 3.1.b | Funzione di Green in \mathbb{R}^n | 131 |
| 3.1.c | Equazione di Laplace nel semipiano | 134 |
| 3.1.d | Equazione di Laplace nel disco | 135 |
| 3.1.e | Equazione di Laplace e funzioni analitiche | 138 |
| 3.1.f | Equazione di Laplace nella sfera n -dimensionale | 140 |
| 3.2 | Equazione di Helmholtz | 141 |
| 4 | Equazioni paraboliche | 144 |
| 4.1 | Esempi su intervalli limitati | 145 |
| 4.2 | Esempi su domini illimitati | 149 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5 | Equazioni iperboliche | 152 |
| A | LA FUNZIONE GAMMA | 157 |
| B | PROPRIETÀ ASINTOTICHE | 163 |
| 1 | Rappresentazioni integrali delle funzioni di MacDonalld | 163 |
| 2 | Sviluppo asintotico delle funzioni di Bessel | 165 |
| C | EQUAZIONE DI SCHRÖDINGER | 167 |
| 1 | La buca di potenziale | 171 |
| 2 | Oscillatore armonico | 174 |
| 3 | Atomo d'idrogeno | 177 |
| D | TRASFORMATA DI FOURIER | 179 |
| 1 | Trasformata di Fourier negli spazi L^1 e L^2 | 179 |
| 2 | Funzioni Generalizzate di Crescita Lenta | 182 |
| 3 | Trasformata di Fourier in \mathcal{S}' | 184 |
| 3.1 | Proprietà della trasformazione di Fourier | 188 |
| E | INTEGRAZIONE SECONDO LEBESGUE | 191 |
| 1 | Insiemi di Borel | 191 |
| 2 | Integrale di Lebesgue | 193 |
| 3 | Alcuni Teoremi Importanti | 196 |
| F | FUNZIONI ANALITICHE | 199 |
| G | APPROSSIMAZIONE DA POLINOMI | 205 |
| | BIBLIOGRAFIA | 207 |

Capitolo I

EQUAZIONI DELLA FISICA MATEMATICA

1 Coordinate ortogonali

Sia Ω un insieme aperto in \mathbb{R}^3 . Sia $u = (u_1, u_2, u_3)$ una trasformazione di classe C^2 delle variabili cartesiane $x = (x_1, x_2, x_3) \in \Omega$ in \mathbb{R}^3 tale che la matrice Jacobiana è invertibile. Allora localmente esiste una corrispondenza biunivoca tra le coordinate cartesiane $x = (x_1, x_2, x_3)$ e quelle curvilinee $u = (u_1, u_2, u_3)$. Derivando le variabili x_1, x_2, x_3 rispetto alle variabili u_1, u_2, u_3 otteniamo

$$dx_i = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial x_i}{\partial u_j} du_j.$$

Quindi la distanza al quadrato tra due punti vicini tra loro è

$$ds^2 = \sum_{i=1}^3 dx_i^2 = \sum_{i,j=1}^3 g_{ij} du_i du_j,$$

dove

$$g_{kl} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial x_j}{\partial u_k} \frac{\partial x_j}{\partial u_l}$$

è la cosiddetta metrica. La trasformazione si dice *ortogonale* se la metrica $\{g_{kl}\}_{k,l=1}^3$ è una matrice diagonale, cioè se le righe della matrice Jacobiana

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial u_1} & \frac{\partial x_2}{\partial u_1} & \frac{\partial x_3}{\partial u_1} \\ \frac{\partial x_1}{\partial u_2} & \frac{\partial x_2}{\partial u_2} & \frac{\partial x_3}{\partial u_2} \\ \frac{\partial x_1}{\partial u_3} & \frac{\partial x_2}{\partial u_3} & \frac{\partial x_3}{\partial u_3} \end{bmatrix}$$

sono ortogonali. In altre parole, la trasformazione si dice ortogonale se

$$g_{kl} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial x_j}{\partial u_k} \frac{\partial x_j}{\partial u_l} = 0, \quad k \neq l.$$

In tal caso

$$ds^2 = \sum_{i=1}^3 (h_i du_i)^2,$$

dove

$$h_k = \left[\sum_{j=1}^3 \left(\frac{\partial x_j}{\partial u_k} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad k = 1, 2, 3.$$

Si vede facilmente che la matrice $\text{diag}(1/h_1, 1/h_2, 1/h_3) J$ è ortogonale (cioè, $U^{-1} = U^T$ e quindi $\det U \in \{-1, +1\}$). Dunque

$$|\det J| = h_1 h_2 h_3.$$

Per ogni punto (u_1, u_2, u_3) per cui $(\pm \det J) > 0$, ci passano tre superfici $u_i = \text{costante}$ ($i = 1, 2, 3$). In questo punto definiamo il vettore \mathbf{e}_i di lunghezza 1 normale alla superficie $u_i = \text{costante}$ e nella direzione in cui cresce u_i . In tal caso i tre vettori $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ formano un sistema di coordinate cartesiane tale che $\pm(\mathbf{e}_1 \cdot (\mathbf{e}_2 \times \mathbf{e}_3)) > 0$.

Il gradiente di ψ ha la forma

$$\nabla \psi = \sum_{j=1}^3 \frac{1}{h_j} \frac{\partial \psi}{\partial u_j} \mathbf{e}_j,$$

la divergenza della funzione $\mathbf{V} = V_1 \mathbf{e}_1 + V_2 \mathbf{e}_2 + V_3 \mathbf{e}_3$ a valori vettoriali ha la forma

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \left[\frac{\partial}{\partial u_1} (V_1 h_2 h_3) + \frac{\partial}{\partial u_2} (V_2 h_3 h_1) + \frac{\partial}{\partial u_3} (V_3 h_1 h_2) \right],$$

e il rotore di \mathbf{V} ha la forma

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{V} = & \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \left[\left(\frac{\partial (h_3 V_3)}{\partial u_2} - \frac{\partial (h_2 V_2)}{\partial u_3} \right) h_1 \mathbf{e}_1 + \left(\frac{\partial (h_1 V_1)}{\partial u_3} - \frac{\partial (h_3 V_3)}{\partial u_1} \right) h_2 \mathbf{e}_2 \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial (h_1 V_1)}{\partial u_3} - \frac{\partial (h_3 V_3)}{\partial u_1} \right) h_3 \mathbf{e}_3 \right]. \end{aligned}$$

Quindi l'operatore di Laplace, oppure il Laplaciano,

$$\Delta = \nabla^2 = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2}{\partial x_j^2}$$

ha la seguente rappresentazione:

$$\Delta\psi = \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \left[\frac{\partial}{\partial u_1} \left(\frac{h_2 h_3}{h_1} \frac{\partial \psi}{\partial u_1} \right) + \frac{\partial}{\partial u_2} \left(\frac{h_3 h_1}{h_2} \frac{\partial \psi}{\partial u_2} \right) + \frac{\partial}{\partial u_3} \left(\frac{h_1 h_2}{h_3} \frac{\partial \psi}{\partial u_3} \right) \right].$$

Esempio I.1 Introduciamo ora alcuni sistemi di coordinate ortogonali.

- a. **Coordinate Cilindriche:** $x = r \cos \theta$, $y = r \sin \theta$, $z = z$. dove $r \geq 0$, $0 \leq \theta < 2\pi$, $z \in \mathbb{R}$. Allora $h_r = 1$, $h_\theta = r$, $h_z = 1$. In tal caso

$$\Delta\psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}. \quad (\text{I.1})$$

Sostituendo per ψ una funzione $\psi = \psi(r, \theta)$ che non dipende da z si trova l'operatore di Laplace in **coordinate polari**:

$$\Delta\psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2}. \quad (\text{I.2})$$

- b. **Coordinate Sferiche:** $x = \rho \sin \varphi \cos \theta$, $y = \rho \sin \varphi \sin \theta$, $z = \rho \cos \varphi$, dove $\rho \geq 0$, $\varphi \in [0, \pi]$, $\theta \in [0, 2\pi)$. Allora $h_\rho = 1$, $h_\varphi = \rho$, $h_\theta = \rho \sin \varphi$. In tal caso

$$\Delta\psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial \rho^2} + \frac{2}{\rho} \frac{\partial \psi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2 \sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} + \frac{1}{\rho^2 \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} \right). \quad (\text{I.3})$$

Introducendo la nuova variabile $\xi = \cos \varphi \in [-1, 1]$ (tale che $d\xi = -\sin \varphi d\varphi$, $1 - \xi^2 = \sin^2 \varphi$) otteniamo¹

$$\Delta\psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial \rho^2} + \frac{2}{\rho} \frac{\partial \psi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2 (1 - \xi^2)} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left((1 - \xi^2) \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right). \quad (\text{I.4})$$

- c. **Coordinate Parabolico-cilindriche** (vedi [15]): $x = \frac{c}{2} (u^2 - v^2)$, $y = cuv$, $z = z$, dove $u \in \mathbb{R}$, $v \geq 0$, $z \in \mathbb{R}$, e c è una costante positiva. Allora

$$h_u = h_v = c\sqrt{u^2 + v^2}, \quad h_z = 1.$$

In tal caso

$$\Delta\psi = \frac{1}{c^2(u^2 + v^2)} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial v^2} \right) + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}. \quad (\text{I.5})$$

¹Usando le coordinate ortogonali (ρ, θ, ξ) direttamente si trovano le espressioni $h_\rho = 1$, $h_\theta = \rho\sqrt{1 - \xi^2}$ e $h_\xi = (\rho/\sqrt{1 - \xi^2})$.

d. **Coordinate Ellittico-cilindriche** (vedi [15]): $x = c \cosh u \cos v$, $y = c \sinh u \sin v$, $z = z$, dove $u > 0$, $v \in [0, 2\pi]$, $z \in \mathbb{R}$, e c è una costante positiva. Allora

$$\begin{cases} h_u = h_v = c\sqrt{\cosh^2 u \sin^2 v + \sinh^2 u \cos^2 v} = c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}, \\ h_z = 1. \end{cases}$$

In tal caso

$$\Delta\psi = \frac{1}{c^2[\sinh^2 u + \sin^2 v]} \left(\frac{\partial^2\psi}{\partial u^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial v^2} \right) + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}. \quad (\text{I.6})$$

2 Separazione delle variabili

1. Separazione in Coordinate Cartesiane. Consideriamo l'equazione di Helmholtz

$$\Delta\psi + k^2\psi = 0$$

in tre variabili (x, y, z) per $k \geq 0$ nel dominio $[0, a] \times [0, b] \times [0, c]$. Ponendo

$$\psi(x, y, z) = X(x)Y(y)Z(z),$$

dove $X(x)$, $Y(y)$ e $Z(z)$ sono di classe C^2 , si trova

$$0 = \frac{\Delta\psi}{\psi} + k^2 = \frac{X''(x)}{X(x)} + \frac{Y''(y)}{Y(y)} + \frac{Z''(z)}{Z(z)} + k^2.$$

In tal caso esistono tre costanti k_x^2 , k_y^2 e k_z^2 tali che

$$\frac{X''(x)}{X(x)} + k_x^2 = \frac{Y''(y)}{Y(y)} + k_y^2 = \frac{Z''(z)}{Z(z)} + k_z^2 = 0,$$

dove

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2.$$

2. Separazione in Coordinate Polari. Consideriamo l'equazione di Helmholtz

$$\Delta\psi + k^2\psi = 0$$

in due variabili (x, y) per $k \geq 0$ nel dominio

$$D = \left\{ (x, y) : 0 \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq L \right\},$$

dove $L \in (0, +\infty)$. Ponendo

$$\psi(r, \theta) = R(r)\Theta(\theta),$$

dove $R(r)$ e $\Theta(\theta)$ sono funzioni di classe C^2 in $r \in (0, L)$ e $\theta \in \mathbb{R}$ con $\Theta(\theta+2\pi) = \Theta(\theta)$, si trova

$$0 = \frac{\Delta\psi}{\psi} + k^2 = \frac{1}{R(r)} \left[\frac{d^2R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} \right] + \frac{1}{r^2\Theta(\theta)} \frac{d^2\Theta}{d\theta^2} + k^2,$$

oppure

$$\frac{r^2}{R(r)} \left[\frac{d^2R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} \right] + k^2r^2 + \frac{1}{\Theta(\theta)} \frac{d^2\Theta}{d\theta^2} = 0.$$

L'espressione precedente è la somma costante di una funzione di r (che non dipende da θ) e una funzione di θ (che non dipende da r). Dunque i due termini devono essere costanti.

Proposizione I.2 *Sia $\Theta(\theta)$ una funzione di classe C^2 , non banale, tale che*

$$\frac{1}{\Theta(\theta)} \frac{d^2\Theta}{d\theta^2} = -C, \quad \Theta(\theta + 2\pi) \equiv \Theta(\theta).$$

Allora $C = m^2$ per qualche $m = 0, 1, 2, \dots$ e

$$\Theta(\theta) = \begin{cases} \text{costante}, & m = 0 \\ \text{cost}_1 \cos m\theta + \text{cost}_2 \sin m\theta, & m = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

Dimostrazione. Prima dimostriamo che $C \geq 0$. Infatti,

$$\begin{aligned} C \int_0^{2\pi} |\Theta(\theta)|^2 d\theta &= - \int_0^{2\pi} \Theta''(\theta) \overline{\Theta(\theta)} d\theta \\ &= - \left[\Theta'(\theta) \overline{\Theta(\theta)} \right]_0^{2\pi} + \int_0^{2\pi} |\Theta'(\theta)|^2 d\theta \\ &= \int_0^{2\pi} |\Theta'(\theta)|^2 d\theta \geq 0, \end{aligned}$$

poichè il primo termine della seconda parte si annulla per motivi di periodicità e $\Theta'(\theta) \not\equiv 0$. Quindi $C \geq 0$.

D'altra parte, per $C > 0$ troviamo la soluzione generale

$$\Theta(\theta) = c_1 \cos(\theta\sqrt{-C}) + c_2 \sin(\theta\sqrt{-C})$$

dell'equazione $\Theta'' = -C\Theta$. Risulta il sistema di equazioni lineari

$$\begin{bmatrix} 1 - \cos(2\pi\sqrt{C}) & -\sin(2\pi\sqrt{C}) \\ \sin(2\pi\sqrt{C}) & 1 - \cos(2\pi\sqrt{C}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

con determinante $2(1 - \cos(2\pi\sqrt{C}))$. Il determinante si annulla se e solo se $C = m^2$ per $m \in \mathbf{N}$. In tal caso tutti gli elementi della matrice si annullano e quindi le costanti c_1 e c_2 sono arbitrarie.

Infine, per $C = 0$ troviamo la soluzione generale $\Theta(\theta) = c_1 + c_2\theta$. In tal caso $\Theta(\theta + 2\pi) \equiv \Theta(\theta)$ implica $c_2 = 0$. \square

Sostituendo $\frac{1}{\Theta(\theta)} \frac{d^2\Theta}{d\theta^2} = -m^2$ per $m = 0, 1, 2, \dots$, otteniamo

$$\frac{d^2R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \left[k^2 - \frac{m^2}{r^2} \right] R(r) = 0$$

con le condizioni al contorno $R(0^+)$ finito e $R(L) = 0$. Se invece della condizione di Dirichlet $\psi|_{\partial D} \equiv 0$ si considera la condizione di Neumann $\frac{\partial\psi}{\partial n}|_{\partial D} \equiv 0$, risultano le condizioni al contorno $R(0^+)$ finito e $R'(L) = 0$.

Per $k = 0$ si trova l'equazione di Eulero $r^2R''(r) + rR'(r) - m^2R(r) = 0$ con soluzione generale

$$R(r) = \begin{cases} c_1 + c_2 \log r, & m = 0 \\ c_1 r^m + c_2 r^{-m}, & m = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

La condizione che $R(0^+)$ sia finito, implica $c_2 = 0$. In tal caso $R(L) \neq 0$ per ogni $L > 0$, eccetto nel caso banale $c_1 = c_2 = 0$. Quindi per $k = 0$ non ci sono soluzioni non banali. Purtroppo, se studiamo l'equazione di Helmholtz con la condizione di Neumann, risulta la soluzione non banale costante se $m = 0$; per $m = 1, 2, 3, \dots$ non ci sono soluzioni non banali.

Per $k > 0$ si ponga $\rho = kr$. In tal caso risulta l'equazione differenziale di Bessel

$$\frac{d^2R}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{dR}{d\rho} + \left(1 - \frac{m^2}{\rho^2} \right) R(\rho) = 0.$$

Quest'equazione ha una singola soluzione linearmente indipendente limitata se $\rho \rightarrow 0^+$. Con un'opportuna normalizzazione questa soluzione si chiama $J_m(\rho)$, la cosiddetta funzione di Bessel di ordine m .

3. Separazione in Coordinate Sferiche. Consideriamo l'equazione di Schrödinger

$$\Delta\psi + k^2\psi = V(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2})\psi$$

nelle variabili (x, y, z) per $k > 0$, dove il potenziale V dipende soltanto dalla variabile $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. È compreso il caso dell'equazione di Helmholtz ($V \equiv 0$). Ponendo

$$\psi(r, \theta, \varphi) = R(r)S(\theta, \varphi),$$

dove $R(r)$ e $S(\theta, \varphi)$ sono funzioni di classe C^2 in $r \in (0, +\infty)$ e $(\theta, \varphi) \in \mathbb{R} \times (0, \pi)$, si trova facilmente

$$0 = \frac{\Delta\psi}{\psi} + k^2 - V = \frac{1}{R(r)} \left[\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dR}{dr} \right] + \frac{1}{r^2 S(\theta, \varphi)} \left[\frac{1}{\sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 S}{\partial \theta^2} + \frac{1}{\sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \frac{\partial S}{\partial \varphi} \right) \right] + k^2 - V(r).$$

Quindi

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 S}{\partial \theta^2} + \frac{1}{\sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \frac{\partial S}{\partial \varphi} \right) &= -CS(\theta, \varphi), \\ \frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dR}{dr} + \left(k^2 - \frac{C}{r^2} \right) R(r) &= V(r)R(r), \end{aligned}$$

dove C è una costante.

L'equazione differenziale per $S(\theta, \varphi)$ ha soltanto una soluzione non banale per opportuni valori della costante C . Per tali valori di C le funzioni $S(\theta, \varphi)$ sono multipli delle cosiddette funzioni sferiche.

Consideriamo ora l'equazione per $S(\theta, \varphi)$. Ponendo

$$S(\theta, \varphi) = \Theta(\theta)\Phi(\varphi),$$

si trova la cosiddetta *equazione di Beltrami*

$$\frac{1}{\sin^2 \varphi} \frac{1}{\Theta(\theta)} \frac{d^2 \Theta}{d\theta^2} + \frac{1}{\Phi(\varphi)} \frac{1}{\sin \varphi} \frac{d}{d\varphi} \left(\sin \varphi \frac{d\Phi}{d\varphi} \right) + C = 0.$$

Come al solito,

$$\frac{1}{\Theta(\theta)} \frac{d^2 \Theta}{d\theta^2} = -m^2,$$

dove $m = 0, 1, 2, \dots$. Utilizzando la trasformazione $X(\xi) = \Phi(\arccos \xi)$, $\xi = \cos \varphi$, arriviamo all'equazione differenziale

$$\frac{d}{d\xi} \left((1 - \xi^2) \frac{dX}{d\xi} \right) + \left(C - \frac{m^2}{1 - \xi^2} \right) X(\xi) = 0.$$

Quest'equazione è l'equazione differenziale per le funzioni associate di Legendre. Le sue soluzioni non banali limitate se $\xi \rightarrow \pm 1$ esistono soltanto per

$C = l(l + 1)$, dove $l = m, m + 1, m + 2, \dots$. Nel caso particolare $m = 0$ si ottiene l'equazione differenziale di Legendre

$$\frac{d}{d\xi} \left((1 - \xi^2) \frac{dX}{d\xi} \right) + l(l + 1)X(\xi) = 0,$$

dove $l = 0, 1, 2, \dots$.

Ritorniamo all'equazione per $R(r)$ con $C = l(l + 1)$:

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dR}{dr} + k^2 R(r) = \left(V(r) + \frac{l(l + 1)}{r^2} \right) R(r),$$

dove $m = -l, -l + 1, \dots, l - 2, l - 1, l$.

4. Separazione in Coordinate Parabolico-Cilindriche. L'equazione di Laplace in coordinate parabolico-cilindriche (u, v, z) (anche dette coordinate paraboliche) ha la forma (I.5). Sostituendo

$$\psi(u, v, z) = U(u)V(v)Z(z)$$

otteniamo

$$\frac{1}{c^2(u^2 + v^2)} \left(\frac{U''(u)}{U(u)} + \frac{V''(v)}{V(v)} \right) + \frac{Z''(z)}{Z(z)} = 0.$$

Se richiediamo che $Z(z)$ sia limitata, risulta

$$\frac{1}{c^2(u^2 + v^2)} \left(\frac{U''(u)}{U(u)} + \frac{V''(v)}{V(v)} \right) = -\frac{Z''(z)}{Z(z)} = \lambda^2,$$

dove $\lambda \geq 0$ è una costante. Dunque

$$\begin{aligned} U''(u) + (\mu - \lambda^2 c^2 u^2)U(u) &= 0, \\ V''(v) - (\mu + \lambda^2 c^2 v^2)V(v) &= 0, \end{aligned}$$

dove μ è un'altra costante. Introducendo le variabili $\xi = u\sqrt{c\lambda}$ e $\eta = v\sqrt{c\lambda}$, dove $\xi \in \mathbb{R}$ e $\eta \geq 0$, e ponendo $\mu = (2\nu + 1)c\lambda$ otteniamo

$$\begin{aligned} U''(\xi) + (2\nu + 1 - \xi^2)U(\xi) &= 0, \\ V''(\eta) - (2\nu + 1 + \eta^2)V(\eta) &= 0. \end{aligned}$$

Studiamo ora l'equazione

$$u'' + (2\nu + 1 - z^2)u = 0, \tag{I.7}$$

dove u, z e ν non hanno più lo stesso significato come prima. Sostituendo

$$u = e^{-z^2/2} v, \tag{I.8}$$

risulta l'equazione

$$v'' - 2zv' + 2\nu v = 0. \tag{I.9}$$

Per $\nu = 0, 1, 2, \dots$ la (I.9) si dice *equazione differenziale di Hermite*. Le soluzioni della (I.7) si dicono funzioni parabolico-cilindriche.

3 Equazione di Helmholtz

In questa parte vengono calcolati gli autovalori e le corrispondenti autofunzioni normalizzate dell'equazione di Helmholtz in dominio abbastanza semplici.

3.1 Equazione di Helmholtz nell'Intervallo

Consideriamo l'equazione di Helmholtz

$$u'' + k^2 u = 0, \quad 0 < x < L, \quad (\text{I.10})$$

con una delle seguenti condizioni al contorno:

$$u(0) = u(L) = 0, \quad \text{Dirichlet} \quad (\text{I.11})$$

$$u'(0) = u'(L) = 0, \quad \text{Neumann} \quad (\text{I.12})$$

$$u(0) = u'(L) = 0, \quad \text{Dirichlet a sinistra, Neumann a destra} \quad (\text{I.13})$$

$$u'(0) = u(L) = 0, \quad \text{Neumann a sinistra, Dirichlet a destra} \quad (\text{I.14})$$

$$u(0) = u(L), \quad u'(0) = u'(L), \quad \text{condizioni periodiche} \quad (\text{I.15})$$

$$u(0) = 0, \quad (\cos \alpha)u(L) + (\sin \alpha)u'(L) = 0, \quad (\text{I.16})$$

$$(\cos \beta)u(0) - (\sin \beta)u'(0) = 0, \quad (\cos \alpha)u(L) + (\sin \alpha)u'(L) = 0, \quad (\text{I.17})$$

dove $0 \leq \alpha \leq (\pi/2)$ e $0 \leq \beta \leq (\pi/2)$. Le condizioni (I.16) e (I.17) si chiamano *miste*. In tutti i casi determineremo gli autovalori e le autofunzioni del problema al contorno. In tutti i casi gli autovalori k^2 sono positivi, tranne nel caso delle condizioni di Neumann (I.12), dove si annulla uno degli autovalori.

a. Condizioni di Dirichlet. Per trovare una soluzione non banale del problema al contorno supponiamo che $k > 0$. Utilizzando la condizione $u(0) = 0$ si ottiene

$$u(x) \sim \sin(kx).$$

L'altra condizione $u(L) = 0$ conduce alla condizione

$$\sin(kL) = 0 \Leftrightarrow kL = n\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Quindi gli autovalori $\lambda_n = k_n^2 = (n\pi/L)^2$ e le autofunzioni $\varphi_n(x) \sim \sin(n\pi x/L)$ per $n = 1, 2, 3, \dots$. Ortonormalizzando le autofunzioni in $L^2(0, L)$ otteniamo

$$\lambda_n = \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2, \quad \varphi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right), \quad (\text{I.18})$$

dove $n = 1, 2, 3, \dots$. Le autofunzioni formano una base ortonormale di $L^2(0, L)$.

b. Condizioni di Neumann. Per trovare una soluzione non banale del problema al contorno supponiamo che $k \geq 0$. Utilizzando la condizione $u'(0) = 0$ si ottiene

$$u(x) \sim \cos(kx).$$

L'altra condizione $u(L) = 0$ conduce alla condizione

$$\cos(kL) = 0 \Leftrightarrow kL = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Quindi gli autovalori $\lambda_n = k_n^2 = (n\pi/L)^2$ e le autofunzioni $\varphi_n(x) \sim \cos(n\pi x/L)$ per $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. Ortonormalizzando le autofunzioni in $L^2(0, L)$ otteniamo

$$\begin{cases} \lambda_0 = 0, & \varphi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{L}}, \\ \lambda_n = \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2, & \varphi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right), \end{cases} \quad (\text{I.19})$$

dove $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. Le autofunzioni formano una base ortonormale di $L^2(0, L)$.

c. Condizione di Dirichlet in $x = 0$ e di Neumann in $x = L$. Per trovare una soluzione non banale del problema al contorno supponiamo che $k > 0$. Utilizzando la condizione $u(0) = 0$ si ottiene

$$u(x) \sim \sin(kx).$$

L'altra condizione $u'(L) = 0$ conduce alla condizione

$$\cos(kL) = 0 \Leftrightarrow kL = \left(n - \frac{1}{2}\right)\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Quindi gli autovalori $\lambda_n = k_n^2 = \left((n - \frac{1}{2})\pi/L\right)^2$ e le autofunzioni $\varphi_n(x) \sim \sin\left((n - \frac{1}{2})\pi x/L\right)$ per $n = 1, 2, 3, \dots$. Ortonormalizzando le autofunzioni in $L^2(0, L)$ otteniamo

$$\lambda_n = \left(\frac{\left(n - \frac{1}{2}\right)\pi}{L}\right)^2, \quad \varphi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{\left(n - \frac{1}{2}\right)\pi x}{L}\right), \quad (\text{I.20})$$

dove $n = 1, 2, 3, \dots$. Le autofunzioni formano una base ortonormale di $L^2(0, L)$.

d. Condizione di Neumann in $x = 0$ e di Dirichlet in $x = L$. Per trovare una soluzione non banale del problema al contorno supponiamo che $k > 0$. Utilizzando la condizione $u'(0) = 0$ si ottiene

$$u(x) \sim \cos(kx).$$

L'altra condizione $u(L) = 0$ conduce alla condizione

$$\cos(kL) = 0 \Leftrightarrow kL = \left(n - \frac{1}{2}\right) \pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Quindi gli autovalori $\lambda_n = k_n^2 = \left((n - \frac{1}{2})\pi/L\right)^2$ e le autofunzioni $\varphi_n(x) \sim \cos\left((n - \frac{1}{2})\pi x/L\right)$ per $n = 1, 2, 3, \dots$. Ortonormalizzando le autofunzioni in $L^2(0, L)$ otteniamo

$$\lambda_n = \left(\frac{(n - \frac{1}{2})\pi}{L}\right)^2, \quad \varphi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \cos\left(\frac{(n - \frac{1}{2})\pi x}{L}\right), \quad (\text{I.21})$$

dove $n = 1, 2, 3, \dots$. Le autofunzioni formano una base ortonormale di $L^2(0, L)$.

e. Condizioni periodiche. Le soluzioni non banali sono quelle periodiche. Dunque abbiamo la base ortonormale di autofunzioni (con corrispondenti autovalori)

$$\begin{cases} \varphi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{L}}, & \lambda_0 = 0, \\ \varphi_n^c(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \cos\left(\frac{2n\pi x}{L}\right), & \lambda_n = \left(\frac{2n\pi}{L}\right)^2, \\ \varphi_n^s(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{2n\pi x}{L}\right), & \lambda_n = \left(\frac{2n\pi}{L}\right)^2, \end{cases} \quad (\text{I.22})$$

dove $n = 1, 2, 3, \dots$. Quindi l'autovalori zero è semplice mentre gli altri autovalori hanno molteplicità 2.

f. Condizione di Dirichlet in $x = 0$ e mista in $x = L$. Per trovare una soluzione non banale del problema al contorno supponiamo che $k \geq 0$. Utilizzando la condizione $u(0) = 0$ si ottiene

$$u(x) \sim \sin(kx).$$

L'altra condizione $(\cos \alpha)u(L) + (\sin \alpha)u'(L) = 0$ conduce alla condizione

$$\cos \alpha \sin(kL) + k \sin \alpha \cos(kL) = 0, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Escludendo i casi già trattati, cioè $\alpha = 0$ [Dirichlet] e $\alpha = (\pi/2)$ [Dirichlet in $x = 0$ e Neumann in $x = L$], risultano $k > 0$, $\sin(kL) = 0$ e $\cos(kL) \neq 0$. Arriviamo all'equazione trascendentale

$$\tan(kL) = -k \tan \alpha, \quad (\text{I.23})$$

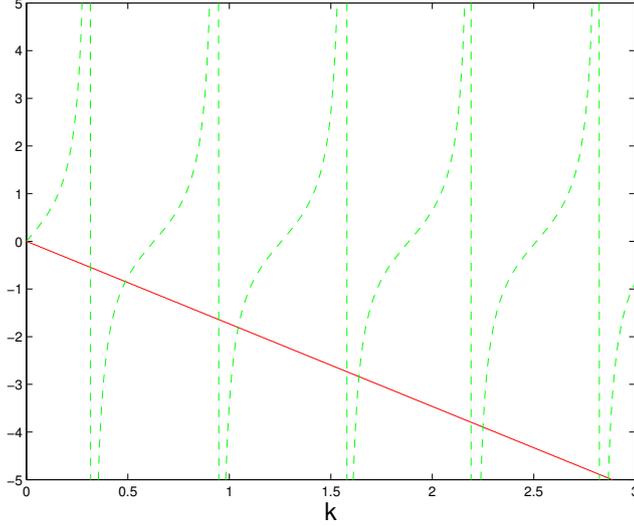


Figura I.1: Il plot contiene i grafici delle funzioni $y = \tan(xL)$ e $y = -k \tan \alpha$ per $L = 5$ e $\alpha = \frac{\pi}{3}$. Gli autovalori sono i valori di $k > 0$ corrispondenti ai loro punti di intersezione.

dove $\tan \alpha > 0$. Cercando i punti di intersezione positivi tra il grafico della funzione $k \mapsto \tan(kL)$ e la retta $k \mapsto -k \tan \alpha$ con coefficiente angolare negativo, troviamo una successione infinita di autovalori $\lambda_n = k_n^2$ ($n = 1, 2, 3, \dots$). Le corrispondenti autofunzioni si possono normalizzare in $L^2(0, L)$, risultando in una base ortonormale di $L^2(0, L)$.

g. Condizioni Miste Diverse. Ci limitiamo al caso in cui $\alpha, \beta \in (0, \frac{\pi}{2})$. In tal caso la soluzione

$$u(x) \sim c_1 \cos(kx) + c_2 \frac{\sin(kx)}{k}$$

per le opportune costanti c_1, c_2 e per $k > 0$ soddisfa alle due condizioni

$$c_1 \cos \beta - c_2 \sin \beta = 0, \tag{I.24}$$

$$c_1 [\cos \alpha \cos(kL) - k \sin \alpha \sin(kL)] + c_2 \left[\cos \alpha \frac{\sin(kL)}{k} + \sin \alpha \cos(kL) \right] = 0. \tag{I.25}$$

L'esistenza di una soluzione non banale conduce alla condizione

$$\begin{aligned} & \cos \beta \left[\cos \alpha \frac{\sin(kL)}{k} + \sin \alpha \cos(kL) \right] \\ & + \sin \beta [\cos \alpha \cos(kL) - k \sin \alpha \sin(kL)] = 0, \end{aligned}$$

oppure

$$\sin(\alpha + \beta) \cos(kL) = - \left[\frac{\cos \alpha \cos \beta}{k} - k \sin \alpha \sin \beta \right] \sin(kL).$$

Si cerchino i punti di intersezione positivi tra il grafico della funzione $k \mapsto \tan(kL)$ e quello della funzione razionale

$$k \mapsto - \frac{k \sin(\alpha + \beta)}{\cos \alpha \cos \beta - k^2 \sin \alpha \sin \beta}.$$

3.2 Equazione di Helmholtz nel Rettangolo

Consideriamo ora l'equazione di Helmholtz

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + k^2 u(x, y) = 0, \quad (\text{I.26})$$

dove $0 < x < L_1$, $0 < y < L_2$ e vengono imposte le seguenti condizioni di Dirichlet:

$$u(x, y) = 0, \quad x = 0, L_1 \text{ oppure } y = 0, L_2. \quad (\text{I.27})$$

Separando le variabili, cioè ponendo

$$u(x, y) = X(x)Y(y),$$

e dividendo la (I.26) da $X(x)Y(y)$ otteniamo

$$\frac{X''(x)}{X(x)} + \frac{Y''(y)}{Y(y)} + k^2 = 0.$$

Quindi esistono costanti k_x^2 e k_y^2 tali che

$$\begin{cases} X''(x) + k_x^2 X(x) = 0, \\ X(0) = X(L_1) = 0, \end{cases} \quad (\text{I.28})$$

$$\begin{cases} Y''(y) + k_y^2 Y(y) = 0, \\ Y(0) = Y(L_2) = 0, \end{cases} \quad (\text{I.29})$$

$$k_x^2 + k_y^2 = k^2. \quad (\text{I.30})$$

Quindi i problemi al contorno nelle variabili x e y sono ambedue problemi al contorno per l'equazione di Helmholtz in una variabile con le condizioni di Dirichlet. Quindi i loro autovalori e le loro autofunzioni normalizzate sono

$$(k_x^2)_n = \left(\frac{n\pi}{L_1} \right)^2, \quad \varphi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L_1}} \sin \left(\frac{n\pi x}{L_1} \right), \quad (\text{I.31})$$

dove $n = 1, 2, 3, \dots$, e

$$(k_y^2)_m = \left(\frac{m\pi}{L_2}\right)^2, \quad \varphi_m(y) = \sqrt{\frac{2}{L_2}} \sin\left(\frac{m\pi y}{L_2}\right), \quad (\text{I.32})$$

dove $m = 1, 2, 3, \dots$. Di conseguenza, gli autovalori e autofunzioni normalizzate del problema bidimensionale sono

$$(k^2)_{n,m} = \pi^2 \left(\frac{n^2}{L_1^2} + \frac{m^2}{L_2^2}\right), \quad \varphi_{n,m}(x, y) = \frac{2}{\sqrt{L_1 L_2}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L_1}\right) \sin\left(\frac{m\pi y}{L_2}\right), \quad (\text{I.33})$$

dove $n, m = 1, 2, 3, \dots$. Le autofunzioni formano una base ortonormale in $L^2((0, L_1) \times (0, L_2))$.

Su tutte le 4 parti del bordo, $\{0\} \times [0, L_2]$, $\{L_1\} \times [0, L_2]$, $[0, L_1] \times \{0\}$ e $[0, L_1] \times \{L_2\}$, si possono imporre diverse condizioni al contorno, quali le condizioni di Dirichlet, quelle di Neumann e quelle miste. In tutti questi casi si possono separare le variabili e risolvere i problemi al contorno unidimensionali che ne risultano.

L'equazione di Helmholtz si può risolvere per separazione delle variabili anche nei parallelepipedi multidimensionali in dimensione ≥ 3 . Per esempio, in tre dimensioni, nel dominio $(0, L_1) \times (0, L_2) \times (0, L_3)$, e sotto le condizioni di Dirichlet escono gli autovalori e autofunzioni

$$(k^2)_{n,m,l} = \pi^2 \left(\frac{n^2}{L_1^2} + \frac{m^2}{L_2^2} + \frac{l^2}{L_3^2}\right),$$

$$\varphi_{n,m,l}(x, y, z) = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{L_1 L_2 L_3}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L_1}\right) \sin\left(\frac{m\pi y}{L_2}\right) \sin\left(\frac{l\pi z}{L_3}\right),$$

dove $n, m, l = 1, 2, 3, \dots$

4 Equazioni delle onde e del calore

Discutiamo ora alcuni casi in cui è abbastanza facile calcolare esplicitamente le soluzioni delle equazioni del calore e delle onde.

4.1 Equazioni delle onde e del calore nell'intervallo

Consideriamo ora l'equazione del calore per $x \in (0, L)$ con condizione iniziale

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (\text{I.34})$$

$$u(x, 0) = u_0(x), \quad (\text{I.35})$$

dove a^2 è la diffusività termica,² e quella delle onde con condizioni iniziali

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (\text{I.36})$$

$$u(x, 0) = u_0(x), \quad (\text{I.37})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x, 0) = u_1(x), \quad (\text{I.38})$$

dove $c > 0$ è la velocità d'onda. In ambedue casi imporremo una condizione al contorno, quali quella di Dirichlet

$$u(0, t) = u(L, t) = 0. \quad (\text{I.39})$$

Al posto delle condizioni di Dirichlet si possono imporre quelle di Neumann

$$\frac{\partial u}{\partial x}(0, t) = \frac{\partial u}{\partial x}(L, t) = 0. \quad (\text{I.40})$$

In ambedue i casi facciamo una separazione delle variabili di tipo

$$u(x, t) = X(x)T(t)$$

e dividiamo la (I.34) e la (I.37) da $X(x)T(t)$. Otteniamo

$$\begin{cases} \frac{1}{a^2} \frac{T'(t)}{T(t)} = \frac{X''(x)}{X(x)}, & \text{equazione del calore,} \\ c^2 \frac{T''(t)}{T(t)} = \frac{X''(x)}{X(x)}, & \text{equazione delle onde,} \end{cases}$$

con le condizioni di Dirichlet

$$X(0) = X(L) = 0.$$

La separazione delle variabili conduce al problema di contorno

$$\begin{cases} X''(x) + k^2 X(x) = 0, \\ X(0) = X(L) = 0, \end{cases} \quad (\text{I.41})$$

più il problema in variabile temporale

$$\begin{cases} T'(t) = -a^2 k^2 T(t), & \text{equazione del calore,} \\ T''(t) = \frac{k^2}{c^2} T(t), & \text{equazione delle onde.} \end{cases} \quad (\text{I.42})$$

²Infatti $a^2 = K/(\mu\rho)$, dove K è la conduttività termica, μ è il calore specifico e ρ è la densità del mezzo. In generale vale l'equazione $\mu\rho(\partial u/\partial t) = K\Delta u + \nabla \vec{K} \cdot \nabla u$.

Quindi la soluzione della (I.41) ha la forma

$$(k^2)_n = \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2, \quad X(x) \sim \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right), \quad (\text{I.43})$$

dove $n = 1, 2, 3, \dots$, mentre la soluzione dei problemi temporali ha la forma

$$\begin{cases} T(t) = T(0) \exp\left(-a^2 t \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2\right), & \text{equazione del calore,} \\ T(t) = T(0) \cos\left(\frac{n\pi t}{cL}\right) + T'(0) \frac{\sin\left(\frac{n\pi t}{cL}\right)}{n\pi t/cL}, & \text{equazione delle onde.} \end{cases} \quad (\text{I.44})$$

La soluzione generale della equazione del calore o delle onde è una combinazione lineare (facendo scorrere $n = 1, 2, 3, \dots$) delle soluzioni elementari $X_n(x)T_n(t)$. Quindi la soluzione generale dell'equazione del calore ha la forma

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \exp\left(-a^2 t \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2\right) \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right), \quad (\text{I.45})$$

dove

$$u_0(x) = u(x, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right). \quad (\text{I.46})$$

Il coefficiente di Fourier c_n viene calcolato nel seguente modo:

$$c_n = \frac{2}{L} \int_0^L u_0(x) \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx.$$

D'altra parte, la soluzione generale dell'equazione delle onde ha la forma

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[c_n \cos\left(\frac{n\pi t}{cL}\right) + d_n \frac{\sin\left(\frac{n\pi t}{cL}\right)}{n\pi t/cL} \right] \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right), \quad (\text{I.47})$$

dove

$$u_0(x) = u(x, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right), \quad (\text{I.48})$$

$$u_1(x) = \frac{\partial u}{\partial t}(x, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} d_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right). \quad (\text{I.49})$$

I coefficienti di Fourier si calcolano nel seguente modo:

$$c_n = \frac{2}{L} \int_0^L u_0(x) \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx,$$

$$d_n = \frac{2}{L} \int_0^L u_1(x) \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx.$$

Se invece della (I.39) vengono imposte le condizioni di Neumann, i dettagli della derivazione della soluzione non cambiano molto.

4.2 Equazioni delle onde e del calore nel rettangolo

La risoluzione delle equazioni del calore e delle onde nel rettangolo è analoga a quella per i corrispondenti problemi unidimensionali. Al posto degli autovalori e autofunzioni dell'equazione di Helmholtz nell'intervallo si utilizzano ora quelli dell'equazione di Helmholtz nel rettangolo.

Consideriamo ora l'equazione del calore per $(x, y) \in (0, L_1) \times (0, L_2)$ con condizione iniziale

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right], \quad (\text{I.50})$$

$$u(x, y, 0) = u_0(x, y), \quad (\text{I.51})$$

dove a^2 è la diffusività termica, e quella delle onde con condizione iniziali

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right], \quad (\text{I.52})$$

$$u(x, y, 0) = u_0(x, y), \quad (\text{I.53})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x, y, 0) = u_1(x, y), \quad (\text{I.54})$$

dove $c > 0$ è la velocità d'onda. In ambedue casi imponremo una condizioni al contorno, quali quella di Dirichlet

$$\begin{cases} u(0, y, t) = u(L_1, y, t) = 0, & y \in [0, L_2], \\ u(x, 0, t) = u(x, L_2, t) = 0, & x \in [0, L_1]. \end{cases} \quad (\text{I.55})$$

La separazione delle variabili

$$u(x, y, t) = X(x)Y(y)T(t)$$

e la divisione dall'espressione $X(x)Y(y)T(t)$ conducono al problema al contorno

$$\begin{cases} \frac{T'(t)}{T(t)} = a^2 \left[\frac{X''(x)}{X(x)} + \frac{Y''(y)}{Y(y)} \right], \\ X(0) = X(L_1) = 0, \\ Y(0) = Y(L_2) = 0, \end{cases} \quad (\text{I.56})$$

per l'equazione del calore e al problema al contorno

$$\begin{cases} \frac{T''(t)}{T(t)} = \frac{1}{c^2} \left[\frac{X''(x)}{X(x)} + \frac{Y''(y)}{Y(y)} \right], \\ X(0) = X(L_1) = 0, \\ Y(0) = Y(L_2) = 0, \end{cases} \quad (\text{I.57})$$

per l'equazione delle onde. Otteniamo, come al solito,

$$\begin{aligned} X''(x) + k_x^2 X(x) &= 0, & X(0) &= X(L_1) = 0, \\ Y''(y) + k_y^2 Y(y) &= 0, & Y(0) &= Y(L_2) = 0, \end{aligned}$$

e dunque

$$\begin{aligned} (k_x)^2 &= \left(\frac{n\pi}{L_1} \right)^2, & X(x) &\sim \sin \frac{n\pi x}{L_1}, \\ (k_y)^2 &= \left(\frac{m\pi}{L_2} \right)^2, & Y(y) &\sim \sin \frac{m\pi y}{L_2}, \end{aligned}$$

dove $n, m = 1, 2, 3, \dots$. Inoltre,

$$T(t) = T(0) \exp \left(-a^2 \left[\left(\frac{n\pi}{L_1} \right)^2 + \left(\frac{m\pi}{L_2} \right)^2 \right] t \right)$$

per l'equazione del calore e

$$\begin{aligned} T(t) &= T(0) \cos \left(\frac{t}{c} \left[\left(\frac{n\pi}{L_1} \right)^2 + \left(\frac{m\pi}{L_2} \right)^2 \right]^{1/2} \right) \\ &\quad + T'(0) \frac{\sin \left(\frac{t}{c} \left[\left(\frac{n\pi}{L_1} \right)^2 + \left(\frac{m\pi}{L_2} \right)^2 \right]^{1/2} \right)}{\frac{1}{c} \left[\left(\frac{n\pi}{L_1} \right)^2 + \left(\frac{m\pi}{L_2} \right)^2 \right]^{1/2}} \end{aligned}$$

per l'equazione delle onde.

Per l'equazione del calore arriviamo alla seguente soluzione completa:

$$u(x, y, t) = \sum_{n,m=1}^{\infty} c_{n,m} \exp \left(-a \left[\left(\frac{n\pi}{L_1} \right)^2 + \left(\frac{m\pi}{L_2} \right)^2 \right] \right) \sin \frac{n\pi x}{L_1} \sin \frac{m\pi y}{L_2}, \quad (\text{I.58})$$

dove

$$u_0(x, y) = \sum_{n,m=1}^{\infty} c_{n,m} \sin \frac{n\pi x}{L_1} \sin \frac{m\pi y}{L_2}, \quad (\text{I.59})$$

$$c_{n,m} = \frac{4}{L_1 L_2} \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} u_0(x, y) \sin \frac{n\pi x}{L_1} \sin \frac{m\pi y}{L_2} dy dx. \quad (\text{I.60})$$

Infine l'equazione delle onde ha la seguente soluzione:

$$u(x, y, t) = \sum_{n,m=1}^{\infty} \left[c_{n,m} \cos \left(\frac{t}{c} \left[\left(\frac{n\pi}{L_1} \right)^2 + \left(\frac{m\pi}{L_2} \right)^2 \right]^{1/2} \right) \sin \frac{n\pi x}{L_1} \sin \frac{m\pi y}{L_2} \right. \\ \left. + d_{n,m} \frac{\sin \left(\frac{t}{c} \left[\left(\frac{n\pi}{L_1} \right)^2 + \left(\frac{m\pi}{L_2} \right)^2 \right]^{1/2} \right)}{\frac{1}{c} \left[\left(\frac{n\pi}{L_1} \right)^2 + \left(\frac{m\pi}{L_2} \right)^2 \right]^{1/2}} \sin \frac{n\pi x}{L_1} \sin \frac{m\pi y}{L_2} \right], \quad (\text{I.61})$$

dove

$$u_0(x, y) = \sum_{n,m=1}^{\infty} c_{n,m} \sin \frac{n\pi x}{L_1} \sin \frac{m\pi y}{L_2}, \quad (\text{I.62})$$

$$u_1(x, y) = \sum_{n,m=1}^{\infty} d_{n,m} \sin \frac{n\pi x}{L_1} \sin \frac{m\pi y}{L_2}, \quad (\text{I.63})$$

$$c_{n,m} = \frac{4}{L_1 L_2} \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} u_0(x, y) \sin \frac{n\pi x}{L_1} \sin \frac{m\pi y}{L_2} dy dx, \quad (\text{I.64})$$

$$d_{n,m} = \frac{4}{L_1 L_2} \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} u_1(x, y) \sin \frac{n\pi x}{L_1} \sin \frac{m\pi y}{L_2} dy dx. \quad (\text{I.65})$$

Capitolo II

ANALISI FUNZIONALE

In questo capitolo si introducono gli spazi di Banach e di Hilbert, gli operatori lineari e loro spettro. Inoltre si discutono gli operatori compatti su uno spazio di Hilbert.

1 Spazi di Banach

Consideriamo noto il concetto di spazio vettoriale X rispetto ad un campo di scalari \mathbb{F} che supponiamo uguale a \mathbb{R} (numeri reali) oppure a \mathbb{C} (numeri complessi). Quindi in X sono state definite l'addizione $X \times X \mapsto X$ e la moltiplicazione scalare $\mathbb{F} \times X \mapsto X$ con le solite proprietà aritmetiche.

Uno *spazio normato* X è uno spazio vettoriale su cui è definita una norma $\|\cdot\| : X \rightarrow \mathbb{R}$ con le seguenti proprietà:

- a. $\|\varphi\| \geq 0$ per ogni $\varphi \in X$; (positività)
- b. $\|\varphi\| = 0$ se e solo se $\varphi = 0$; (definitezza)
- c. $\|\alpha\varphi\| = |\alpha| \|\varphi\|$ per $\alpha \in \mathbb{F}$ e $\varphi \in X$; (omogeneità)
- d. $\|\varphi + \psi\| \leq \|\varphi\| + \|\psi\|$ per $\varphi, \psi \in X$. (disuguaglianza triangolare)

Dalle (c)-(d) segue subito che

- e. $|\|\varphi\| - \|\psi\|| \leq \|\varphi - \psi\|$ per $\varphi, \psi \in X$.

Per *distanza* tra φ e ψ si intende la $\|\varphi - \psi\|$.

Una successione $\{\varphi_n\}_{n=1}^{\infty}$ di elementi di X è detta *convergente* al vettore $\varphi \in X$ se $\lim_{n \rightarrow \infty} \|\varphi_n - \varphi\| = 0$, ossia se, per ogni $\varepsilon > 0$, esiste un intero $n(\varepsilon)$ tale che $\|\varphi_n - \varphi\| < \varepsilon$ per ogni $n > n(\varepsilon)$.

Una successione $\{\varphi_n\}_{n=1}^{\infty}$ di elementi di uno spazio normato X si dice *successione di Cauchy* se per ogni $\varepsilon > 0$ esiste un intero $n(\varepsilon)$ tale che $\|\varphi_n - \varphi_m\| < \varepsilon$

per $n, m > n(\varepsilon)$, ossia se $\lim_{n, m \rightarrow \infty} \|\varphi_n - \varphi_m\| = 0$. La norma in X si dice *completa* se ogni successione di Cauchy in X è convergente in X . Uno spazio normato con norma completa si dice *spazio di Banach*.

Siano X e Y due spazi normati, $U \subset X$ e $f : U \rightarrow Y$. Allora f si dice *continua* in $\psi \in U$ se $\{f(\varphi_n)\}_{n=1}^{\infty}$ converge a $f(\varphi)$ in Y per ogni successione $\{\varphi_n\}_{n=1}^{\infty}$ in U che converge a φ . La funzione f si dice continua se è continua in ogni punto $\varphi \in U$.

Discutiamo ora alcuni esempi di spazi di Banach, trascurando la dimostrazione della completezza della norma.

1. Per ogni sottoinsieme chiuso e limitato Ω di \mathbb{R}^n , sia $C(\Omega)$ lo spazio vettoriale di tutte le funzioni scalari (reali o complesse) continue in Ω . Allora la funzione $\|\cdot\|_{\infty} : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$,

$$\|f\|_{\infty} = \max_{z \in \Omega} |f(z)|,$$

introduce una norma completa in $C(\Omega)$. Si verifica che $\|f_n - f\|_{\infty} \rightarrow 0$ se e solo se $f_n(x) \rightarrow f(x)$ uniformemente in $x \in \Omega$.

2. Sia Ω un sottoinsieme misurabile in \mathbb{R}^n . Con $L^2(\Omega)$ si indica lo spazio vettoriale di tutte le funzioni al quadrato sommabili (nel senso di Lebesgue) in Ω , dove due funzioni per cui i valori sono diversi soltanto in un sottoinsieme di Ω di misura zero, vengono considerate uguali. Allora la funzione $\|\cdot\|_2 : L^2(\Omega) \rightarrow \mathbb{R}$,

$$\|f\|_2 = \left(\int_{\Omega} |f(x)|^2 dx \right)^{1/2},$$

è una norma completa in $L^2(\Omega)$.

3. Sia ℓ^2 lo spazio vettoriale di tutte le successioni $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ scalari (reali o complesse) per cui la serie $\sum_{n=1}^{\infty} |x_n|^2$ è convergente. Allora la funzione $\|\cdot\|_2 : \ell^2 \rightarrow \mathbb{R}$,

$$\|\{x_n\}_{n=1}^{\infty}\|_2 = \left(\sum_{n=1}^{\infty} |x_n|^2 \right)^{1/2},$$

è una norma completa in ℓ^2 .

4. Sia Ω un sottoinsieme misurabile in \mathbb{R}^n . Con $L^1(\Omega)$ si indica lo spazio vettoriale di tutte le funzioni sommabili (nel senso di Lebesgue) in Ω , dove due funzioni per cui i valori sono diversi soltanto in un sottoinsieme

di Ω di misura zero, vengono considerate uguali. Allora la funzione $\|\cdot\|_1 : L^1(\Omega) \rightarrow \mathbb{R}$,

$$\|f\|_1 = \int_{\Omega} |f(x)| dx,$$

è una norma completa in $L^1(\Omega)$.

Per un elemento φ di uno spazio normato X e $r > 0$, l'insieme

$$B(\varphi; r) = \{\psi \in X : \|\varphi - \psi\| < r\}$$

è definito la *sfera aperta* di raggio r e centro φ . Un sottoinsieme U si dice *aperto* se per ogni $\varphi \in U$ esiste $r > 0$ (che dipende da φ) tale che $B(\varphi; r) \subset U$. Dato il sottoinsieme U di X , la *parte interna* U^0 di U è l'insieme aperto più grande di X contenuto in U .

Un sottoinsieme U di X si dice *chiuso* se esso contiene tutti i limiti di tutte le successioni con termini in U e limiti in X . Dato il sottoinsieme U di X , la sua *chiusura* \bar{U} è il sottoinsieme chiuso più piccolo di X che contiene U .

Dato il sottoinsieme U di X , la *frontiera* ∂U di U è l'insieme dei punti di X che possono essere il limite sia di una successione in U sia di una successione in $X \setminus U$. Si dimostra facilmente che

$$\partial U = \bar{U} \cap \overline{(X \setminus U)}.$$

Un sottoinsieme U di X si dice *limitato* se il diametro

$$\text{diam}(U) = \sup\{\|\varphi - \psi\| : \varphi, \psi \in U\}$$

è finito. In tal caso esiste $r > 0$ (con $r > \frac{1}{2}\text{diam}(U)$) tale che $U \subset B(\varphi; r)$ per ogni vettore $\varphi \in U$.

Un sottoinsieme D di X si dice *denso* in X se ogni vettore $\varphi \in X$ è il limite di una successione con termini in D . Uno spazio di Banach si dice *separabile* se ha un sottoinsieme denso finito o infinito numerabile.

2 Spazi di Hilbert

Sia X uno spazio vettoriale reale o complesso (cioè, $\mathbb{F} = \mathbb{R}$ oppure $\mathbb{F} = \mathbb{C}$). Allora una funzione $(\cdot, \cdot) : X \times X \rightarrow \mathbb{F}$ che soddisfa le seguenti proprietà:

- a. $(\varphi, \varphi) \geq 0$, (positività)
- b. $(\varphi, \varphi) = 0$ se e solo se $\varphi = 0$, (definitezza)
- c. $(\varphi, \psi) = \overline{(\psi, \varphi)}$ per ogni $\varphi, \psi \in X$, (simmetria)

d. $(\alpha\varphi + \beta\psi, \chi) = \alpha(\varphi, \chi) + \beta(\psi, \chi)$ per $\alpha, \beta \in \mathbb{F}$ e $\varphi, \psi, \chi \in X$, (linearità)

è definita *prodotto scalare* (oppure *prodotto interna*, oppure, nel caso $\mathbb{F} = \mathbb{C}$, *prodotto sesquilineare*). Nella (c) il soprasegno indica il coniugato complesso se $\mathbb{F} = \mathbb{C}$. Dalle (c)-(d) segue subito che

e. $(\chi, \alpha\varphi + \beta\psi) = \overline{\alpha}(\chi, \varphi) + \overline{\beta}(\chi, \psi)$ per $\alpha, \beta \in \mathbb{F}$ e $\varphi, \psi, \chi \in X$.

Ogni prodotto scalare induce la cosiddetta *norma indotta*

$$\|\varphi\| = \sqrt{(\varphi, \varphi)}.$$

Inoltre vale la *disuguaglianza di Schwartz*¹

$$|(\varphi, \psi)| \leq \|\varphi\| \|\psi\| \quad \text{per } \varphi, \psi \in X,$$

che è un'uguaglianza se e solo se φ e ψ sono proporzionali. La disuguaglianza di Schwartz implica la disuguaglianza triangolare²

$$\|\varphi + \psi\| \leq \|\varphi\| + \|\psi\|, \quad \varphi, \psi \in X.$$

Uno spazio vettoriale con prodotto scalare si chiama *spazio pre-Hilbert*. Uno spazio pre-Hilbert con norma indotta completa si dice *spazio di Hilbert*.

Uno spazio di Hilbert soddisfa all'*identità del parallelogramma*

$$\|\varphi + \psi\|^2 + \|\varphi - \psi\|^2 = 2(\|\varphi\|^2 + \|\psi\|^2).$$

Vice versa, se la norma di uno spazio di Banach soddisfa all'identità del parallelogramma, essa è la norma indotta di uno spazio di Hilbert.

Il prodotto scalare può essere espresso nella norma tramite la cosiddetta *formula di polarizzazione*:

$$(\varphi, \psi) = \begin{cases} \frac{1}{4}(\|\varphi + \psi\|^2 - \|\varphi - \psi\|^2), & \mathbb{F} = \mathbb{R}, \\ \frac{1}{4}(\|\varphi + \psi\|^2 - \|\varphi - \psi\|^2 + i\|\varphi + i\psi\|^2 - i\|\varphi - i\psi\|^2), & \mathbb{F} = \mathbb{C}. \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Discutiamo ora alcuni esempi di spazi di Hilbert.

¹Dim: Sia ξ un numero complesso di modulo 1 tale che $\xi(\varphi, \psi) = |(\varphi, \psi)|$ e sia $\chi = \xi\psi$. In tal caso $\|\chi\| = \|\psi\|$, mentre per ogni $t \in \mathbb{R}$ si ha $0 \leq \|\varphi + t\chi\|^2 = \|\varphi\|^2 + 2t(\varphi, \chi) + t^2\|\chi\|^2$. Quindi il discriminante di questo polinomio reale quadrato è non positivo. Dunque $4|(\varphi, \chi)|^2 - 4\|\varphi\|^2\|\chi\|^2 \leq 0$ e quindi $|(\varphi, \psi)| \leq \|\varphi\|\|\psi\|$.

²Dim: $\|\varphi + \psi\|^2 = \|\varphi\|^2 + \|\psi\|^2 + 2\text{Re}(\varphi, \psi) \leq \|\varphi\|^2 + \|\psi\|^2 + 2\|\varphi\|\|\psi\| = (\|\varphi\| + \|\psi\|)^2$.

1. Sia Ω un sottoinsieme misurabile in \mathbb{R}^n . Con $L^2(\Omega)$ si indica lo spazio vettoriale di tutte le funzioni al quadrato sommabili (nel senso di Lebesgue) in Ω , dove due funzioni per cui i valori sono diversi soltanto in un sottoinsieme di Ω di misura zero, vengono considerate uguali. Allora la funzione $(\cdot, \cdot) : L^2(\Omega) \times L^2(\Omega) \rightarrow \mathbb{C}$,

$$(f, g) = \left(\int_{\Omega} f(x) \overline{g(x)} dx \right)^{1/2},$$

è un prodotto scalare in $L^2(\Omega)$ che induce la solita norma.

2. Sia ℓ^2 lo spazio vettoriale di tutte le successioni $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ scalari (reali o complesse) per cui la serie $\sum_{n=1}^{\infty} |x_n|^2$ è convergente. Allora la funzione $(\cdot, \cdot) : \ell^2 \times \ell^2 \rightarrow \mathbb{C}$,

$$(\{x_n\}_{n=1}^{\infty}, \{y_n\}_{n=1}^{\infty}) = \left(\sum_{n=1}^{\infty} x_n \overline{y_n} \right)^{1/2},$$

è un prodotto scalare in ℓ^2 che induce la solita norma.

3 Basi ortonormali in spazi di Hilbert

Consideriamo prima uno spazio vettoriale di dimensione N con prodotto scalare. Tale spazio ha una base ortonormale $\{\varphi_n\}_{n=1}^N$ di vettori di lunghezza 1 ortogonali tra loro. Partendo da una base (i.e., un sistema linearmente indipendente massimale) $\{\psi_n\}_{n=1}^N$ qualsiasi, si può costruire una base ortonormale utilizzando il *processo di Gram-Schmidt*:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \frac{\psi_1}{\|\psi_1\|} \\ \varphi_2 = \frac{\psi_2 - (\psi_2, \varphi_1)\varphi_1}{\|\psi_2 - (\psi_2, \varphi_1)\varphi_1\|} \\ \varphi_3 = \frac{\psi_3 - (\psi_3, \varphi_1)\varphi_1 - (\psi_3, \varphi_2)\varphi_2}{\|\psi_3 - (\psi_3, \varphi_1)\varphi_1 - (\psi_3, \varphi_2)\varphi_2\|} \\ \vdots \\ \varphi_N = \frac{\psi_N - (\psi_N, \varphi_1)\varphi_1 - \dots - (\psi_N, \varphi_{N-1})\varphi_{N-1}}{\|\psi_N - (\psi_N, \varphi_1)\varphi_1 - \dots - (\psi_N, \varphi_{N-1})\varphi_{N-1}\|}. \end{array} \right.$$

È facile controllare induttivamente che φ_j è ortogonale ai vettori $\varphi_1, \dots, \varphi_{j-1}$ e ha norma 1 ($j = 1, 2, \dots, N$).

Appena trovata una base ortonormale $\{\varphi_n\}_{n=1}^N$, si ottengono subito le cosiddette *identità di Parseval*:

$$\|\varphi\|^2 = \sum_{n=1}^N |(\varphi, \varphi_n)|^2,$$

$$(\varphi, \psi) = \sum_{n=1}^N (\varphi, \varphi_n)(\varphi_n, \psi).$$

Consideriamo ora uno spazio di Hilbert **separabile** X a dimensione infinita. Estrahendo da un sottoinsieme denso e infinito numerabile D un sistema di vettori linearmente indipendente massimale e applicando il processo di Gram-Schmidt senza fermarsi ad un indice superiore N , si ottiene una base ortonormale **e infinita numerabile** $\{\varphi_n\}_{n=1}^\infty$. D'altra parte, l'insieme di tutte le combinazioni lineari dei vettori di una base ortonormale infinita numerabile di X è denso in X . Concludiamo dunque che uno spazio di Hilbert separabile a dimensione infinita viene caratterizzato dall'esistenza di una base ortonormale infinita numerabile.

Data una base ortonormale $\{\varphi_n\}_{n=1}^\infty$ in X , risultano le *identità di Parseval*:

$$\|\varphi\|^2 = \sum_{n=1}^{\infty} |(\varphi, \varphi_n)|^2,$$

$$(\varphi, \psi) = \sum_{n=1}^{\infty} (\varphi, \varphi_n)(\varphi_n, \psi).$$

Inoltre, vale lo sviluppo

$$\varphi = \sum_{n=1}^{\infty} (\varphi, \varphi_n)\varphi_n$$

nel senso che

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \left\| \varphi - \sum_{n=1}^N (\varphi, \varphi_n)\varphi_n \right\| = 0.$$

Introducendo la successione crescente di sottospazi

$$E_N = \text{span}\{\varphi_1, \dots, \varphi_N\}$$

di dimensione N , si può leggere quest'ultima relazione limite nella seguente maniera: La distanza (ortogonale) tra φ e il sottospazio E_N tende a zero se

$N \rightarrow \infty$.³ Quindi

$$\varphi \mapsto \sum_{n=1}^N (\varphi, \lambda_n) \lambda_n$$

definisce la *proiezione ortogonale* di φ in E_N .

Dato lo spazio di Hilbert separabile X con base ortonormale $\{\varphi_n\}_{n=1}^{\infty}$, si definisce la trasformazione lineare $U : X \rightarrow \ell^2$ da

$$U\varphi = \{(\varphi, \varphi_n)\}_{n=1}^{\infty},$$

ossia $U\varphi$ è la successione dei coefficienti (φ, φ_n) vista come vettore in ℓ^2 . Allora, applicando la definizione della norma in ℓ^2 ,

$$\|U\varphi\|^2 = \sum_{n=1}^{\infty} |(\varphi, \varphi_n)|^2 = \|\varphi\|^2,$$

secondo l'identità di Parseval. Si verifica facilmente che U definisce una corrispondenza biunivoca tra X e ℓ^2 . Costruendo la U per $X = \ell^2$ e la sua base ortonormale canonica, si vede subito che U coincide con la trasformazione identità in ℓ^2 . Concludiamo che, tranne per una trasformazione unitaria della base ortonormale, esiste un singolo spazio di Hilbert separabile.

4 Applicazioni

1. In $X = L^2(-\pi, \pi)$ le funzioni

$$\varphi_n(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{inx}, \quad n \in \mathbb{Z},$$

formano una base ortonormale. Data una funzione $f \in L^2(-\pi, \pi)$ e introducendo i suoi coefficienti di Fourier

$$c_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) e^{-inx} dx,$$

si vede subito che $c_n = (2\pi)^{1/2}(\varphi, \varphi_n)$ per $n \in \mathbb{Z}$. Secondo l'identità di Parseval segue

$$\|f\|_2^2 = 2\pi \sum_{n=-\infty}^{\infty} |c_n|^2,$$

³Sia $\sum_{n=1}^N \lambda_n \varphi_n$ un vettore arbitrario in E_N e $F(\lambda_1, \dots, \lambda_N) = \left\| \varphi - \sum_{n=1}^N \lambda_n \varphi_n \right\|^2$ la distanza tra φ e E_N al quadrato. Si può dimostrare che il minimo viene assunto per $\lambda_n = (\varphi, \varphi_n)$ ($n = 1, \dots, N$).

ossia

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |f(x)|^2 dx = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |c_n|^2.$$

Inoltre, vale la convergenza della sua serie di Fourier

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{inx}$$

nel senso che

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \int_{-\pi}^{\pi} \left| f(x) - \sum_{n=1}^N c_n e^{inx} \right|^2 dx = 0.$$

2. In $X = L^2(-\pi, \pi)$ le funzioni

$$\varphi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}, \quad \varphi_n^c(x) = \frac{\cos(nx)}{\sqrt{\pi}}, \quad \varphi_n^s(x) = \frac{\sin(nx)}{\sqrt{\pi}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

formano una base ortonormale. Data una funzione $f \in L^2(-\pi, \pi)$ e introducendo i suoi coefficienti di Fourier

$$\begin{cases} a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx, & n = 0, 1, 2, \dots, \\ b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx, & n = 1, 2, 3, \dots, \end{cases}$$

si applichi l'identità di Parseval per trovare l'uguaglianza

$$\frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |f(x)|^2 dx = \frac{|a_0|^2}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (|a_n|^2 + |b_n|^2).$$

Inoltre, vale la convergenza della sua serie di Fourier

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx))$$

nel senso che

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \int_{-\pi}^{\pi} \left| f(x) - \frac{a_0}{2} - \sum_{n=1}^N (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)) \right|^2 dx = 0.$$

5 Operatori lineari

Siano X e Y due spazi di Banach. Un'applicazione $T : X \rightarrow Y$ si dice operatore lineare se

$$T(\lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2) = \lambda_1 T(x_1) + \lambda_2 T(x_2), \quad x_1, x_2 \in X, \lambda_1, \lambda_2 \in F,$$

dove $F = \mathbb{R}$ oppure $F = \mathbb{C}$. Molto spesso scriviamo Tx invece di $T(x)$. Gli esempi principali degli operatori lineari sono le matrici $n \times m$ (come rappresentazioni degli operatori lineari da F^m in F^n) e gli operatori differenziali lineari. L'immagine di tale T è l'insieme $\text{Im}(T) = \{Tx : x \in X\}$; quest'insieme è un sottospazio lineare di Y . Il kernel di T è il sottospazio lineare di X definito da $\text{Ker } T = \{x \in X : Tx = 0\}$.

5.1 Proprietà generali

Un operatore lineare $T : X \rightarrow Y$ si dice *invertibile* se è una corrispondenza biunivoca tra X e Y . Un operatore lineare $T : X \rightarrow Y$ è invertibile se e solo se $\text{Im } T = Y$ e $\text{Ker } T = \{0\}$.

Siano X e Y spazi di Banach. Un operatore lineare $T : X \rightarrow Y$ si dice *limitato* se $\sup_{\|x\|=1} \|Tx\| < +\infty$. In tal caso il numero

$$\|T\| = \sup_{x \in X, \|x\|=1} \|Tx\| = \sup_{0 \neq x \in X} \frac{\|Tx\|}{\|x\|}$$

si dice *norma* di T . Se $X = F^n$ (dove $F = \mathbb{R}$ oppure $F = \mathbb{C}$) ha dimensione finita, ogni operatore lineare $T : X \rightarrow Y$ è limitato.

- a. Sia $\{e_1, \dots, e_n\}$ la base canonica di F^n . Allora ogni operatore limitato $T : F^n \rightarrow Y$ può essere rappresentato come

$$T \left(\sum_{i=1}^n x_i e_i \right) = \sum_{i=1}^n x_i T e_i.$$

Se si applica ad una matrice, la norma si chiama *norma spettrale*.⁴ Utilizzando questa rappresentazione, si dimostri la limitatezza di T .

- b. Siano X, Y, Z tre spazi di Banach e siano $T : X \rightarrow Y$ e $S : Y \rightarrow Z$ due operatori lineari limitati. Allora $ST : X \rightarrow Z$ è un operatore lineare limitato e $\|ST\| \leq \|S\| \|T\|$.

⁴La norma spettrale di una matrice è uguale al suo numero singolare più grande.

Proposizione II.3 *Siano X, Y spazi di Banach e sia $T : X \rightarrow Y$ un operatore lineare. Le seguenti affermazioni sono equivalenti:*

- a. T è un operatore limitato.
- b. $T : X \rightarrow Y$ è una funzione uniformemente continua.
- c. $T : X \rightarrow Y$ è una funzione continua.
- d. $T : X \rightarrow Y$ è continua in 0.

Dimostrazione. [(a) \implies (b)] Per $x_1, x_2 \in X$ si ha grazie alla limitatezza di T : $\|Tx_1 - Tx_2\| \leq \|T\|\|x_1 - x_2\|$. Quindi, se $\|x_1 - x_2\| < (\varepsilon/\|T\|)$, allora $\|Tx_1 - Tx_2\| < \varepsilon$. Allora T è uniformemente continuo.

[(b) \implies (c) \implies (d)] Ovvio.

[(d) \implies (a)] Sia T continuo in 0. Allora esiste $\delta > 0$ tale che $\|x\| < \delta$ implica $\|Tx\| < 1$. Quindi per qualsiasi $x \in X$ con $\|x\| = 1$ si ha $\|(\delta/2)x\| < \delta$ e dunque $(\delta/2)\|Tx\| = \|T(\delta/2)x\| < 1$. Allora $\|x\| = 1$ implica $\|Tx\| < (2/\delta)$. Di conseguenza T è limitato con norma $\leq (2/\delta)$. \square

Consideriamo adesso lo spazio di Banach $\mathcal{L}(X, Y)$ di tutti gli operatori lineari e limitati da X in Y , dove X e Y sono spazi di Banach. Scriviamo $\mathcal{L}(X)$ se $X = Y$. Per $X = F^m$ e $Y = F^n$ (per $F = \mathbb{R}$ o $F = \mathbb{C}$) lo spazio $\mathcal{L}(X, Y)$ coincide con quello delle matrici $n \times m$.

Teorema II.4 (Teorema dell'Operatore Inverso) *Siano X e Y spazi di Banach e sia $T \in \mathcal{L}(X, Y)$ invertibile. Allora l'operatore inverso $T^{-1} \in \mathcal{L}(Y, X)$.*

Teorema II.5 *Siano $T, S \in \mathcal{L}(X)$, e sia T invertibile. Allora S è invertibile se $\|T - S\| < \|T^{-1}\|^{-1}$. In particolare, S è invertibile se $\|I - S\| < 1$.*

Dimostrazione. L'equazione $Sx = y$ può essere scritta nella forma equivalente $x = F(x)$, dove

$$F(x) = T^{-1}y + T^{-1}(T - S)x.$$

Siccome

$$\|F(x_1) - F(x_2)\| \leq \|T^{-1}\| \|T - S\| \|x_1 - x_2\|, \quad (\text{II.2})$$

dove $\|T^{-1}\| \|T - S\| < 1$, si può risolvere l'equazione $x = F(x)$ per iterazione, secondo il cosiddetto Teorema delle Contrazioni. Infatti, sia $x_0 \in X$ un vettore

iniziale e poniamo $x_{n+1} = F(x_n)$ per $n = 0, 1, 2, \dots$. Allora

$$\begin{aligned} \|x_2 - x_1\| &= \|F(x_1) - F(x_0)\| \leq \|T^{-1}\| \|T - S\| \|x_1 - x_0\|, \\ \|x_3 - x_2\| &= \|F(x_2) - F(x_1)\| \leq \|T^{-1}\| \|T - S\| \|x_2 - x_1\| \\ &\leq [\|T^{-1}\| \|T - S\|]^2 \|x_1 - x_0\|, \\ &\vdots \quad \vdots \\ \|x_{n+1} - x_n\| &= \|F(x_n) - F(x_{n-1})\| \leq \|T^{-1}\| \|T - S\| \|x_n - x_{n-1}\| \\ &\leq [\|T^{-1}\| \|T - S\|]^n \|x_1 - x_0\|. \end{aligned}$$

Quindi

$$\begin{aligned} \|x_{n+p} - x_{n+1}\| &\leq \sum_{j=0}^{p-1} \|x_{n+j+1} - x_{n+j}\| \leq \|x_1 - x_0\| \sum_{j=0}^{p-1} [\|T^{-1}\| \|T - S\|]^{n+j} \\ &\leq \|x_1 - x_0\| \sum_{j=0}^{\infty} [\|T^{-1}\| \|T - S\|]^{n+j} \\ &= \|x_1 - x_0\| \frac{[\|T^{-1}\| \|T - S\|]^n}{1 - \|T^{-1}\| \|T - S\|}. \end{aligned}$$

Quest'ultima espressione tende a zero se $n \rightarrow \infty$. Dunque $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ è una successione di Cauchy in X e quindi ha limite $x \in X$. Utilizzando la continuità della $F : X \rightarrow X$ [vedi la (B.2)], otteniamo

$$x = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} F(x_n) = F(\lim_{n \rightarrow \infty} x_n) = F(x).$$

L'unicità della soluzione è immediata. □

5.2 Proprietà spettrali

Sia X uno spazio di Banach complesso e sia $T \in \mathcal{L}(X)$. Per ogni $\lambda \in \mathbb{C}$ consideriamo gli operatori lineari $\lambda - T$ (cioè, $\lambda I_X - T$ scritto male). Studiamo l'invertibilità di $\lambda - T$ al variare di λ .

Il numero $\lambda \in \mathbb{C}$ si dice *autovalore* di T se esiste $0 \neq x \in X$ tale che $(\lambda - T)x = 0$ (cioè, tale che $Tx = \lambda x$). Il vettore x si chiama un corrispondente *autovettore*. In tal caso $\text{Ker}(\lambda - T) = \{x \in X : (\lambda - T)x = 0\}$ è l'insieme di tutti gli autovettori corrispondenti all'autovalore λ , più il vettore zero. La definizione generalizza quella per le matrici quadrate. Infatti, come per le matrici quadrate l'esistenza dell'autovettore $0 \neq x \in X$ tale che $Tx = \lambda x$ implica che $\lambda - T$ non è invertibile. Per le matrici quadrate T basta risolvere l'equazione $\det(\lambda - T) = 0$ per trovare tutti gli autovalori di T . Nel caso di uno spazio X a dimensione infinita la situazione è molto più complicata.

Sia X uno spazio di Banach complesso e sia $T \in \mathcal{L}(X)$. Il numero complesso λ appartiene allo spettro di T , $\sigma(T)$, se $\lambda - T$ NON è invertibile. Quindi tutti gli autovalori di T appartengono allo spettro di T . Il numero complesso λ appartiene al risolvente di T , $\rho(T)$, se $\lambda - T$ è invertibile. Dunque $\rho(T)$ è il complementare di $\sigma(T)$.

Teorema II.6 *Sia $T \in \mathcal{L}(X)$. Allora lo spettro $\sigma(T)$ di T è un sottoinsieme chiuso, limitato e non vuoto di \mathbb{C} , mentre il risolvente $\rho(T)$ di T è un aperto.*

Dimostrazione. Se $|\lambda| > \|T\|$, $\|\lambda^{-1}T\| < 1$ implica l'invertibilità dell'operatore $\lambda - T = \lambda(I_X - \lambda^{-1}T)$. Inoltre

$$(\lambda - T)^{-1} = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{T^j}{\lambda^j} = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{T^j}{\lambda^{j+1}}, \quad (\text{II.3})$$

dove la serie è convergente nella norma di $\mathcal{L}(X)$. Quindi lo spettro è contenuto nella palla di centro zero e raggio $\|T\|$.

Inoltre, se $\lambda \in \rho(T)$ e $|\mu - \lambda| < \|(\lambda - T)^{-1}\|^{-1}$, allora $\|(\lambda - T) - (\mu - T)\| < \|(\lambda - T)^{-1}\|^{-1}$ e quindi $\mu \in \rho(T)$, dove abbiamo applicato il Teorema B.4. Di conseguenza, $\rho(T)$ è aperto e quindi il suo complementare $\sigma(T)$ è chiuso.

Infine, se $\sigma(T) = \emptyset$ e quindi $\rho(T) = \mathbb{C}$, per ogni $x, y \in X$ la funzione $((\lambda - T)^{-1}x, y)$ è analitica nell'intero piano complesso e tende a zero se $|\lambda| \rightarrow \infty$.⁵ Secondo il Teorema di Liouville,⁶ segue che $((\lambda - T)^{-1}x, y) = 0$ per ogni $\lambda \in \mathbb{C}$ e $x, y \in X$. Di conseguenza, $(\lambda - T)^{-1} = 0$, un'impossibilità per un operatore invertibile. Quindi $\sigma(T) \neq \emptyset$. \square

Sia $r(T)$, il raggio spettrale di T , il minimo di tutti gli r per cui la serie (B.3) è assolutamente convergente per ogni $\lambda \in \mathbb{C}$ con $|\lambda| > r$. Allora $r(T) \leq \|T\|$ e $\sigma(T)$ è contenuto nel disco di centro 0 e raggio $r(T)$. Infatti quel disco è il disco di centro 0 più piccolo che contiene lo spettro di T . Utilizzando l'espressione per il raggio di convergenza di una serie di potenze, troviamo

$$r(T) = \lim_{n \rightarrow \infty} \|T^n\|^{1/n}.$$

Sia $T \in \mathcal{L}(X)$. La formula $\mathbb{C} = \sigma(T) \cup \rho(T)$ rappresenta una partizione del piano complesso in due insiemi disgiunti. Adesso discutiamo un'ulteriore suddivisione di \mathbb{C} in quattro insiemi due a due disgiunti.

a. Se $\lambda - T$ è invertibile, $\lambda \in \rho(T)$. Altrimenti, $\lambda \in \sigma(T)$.

⁵In modo implicito abbiamo supposto che X sia uno spazio di Hilbert. La dimostrazione si adatta facilmente al caso di uno spazio di Banach generale.

⁶Una funzione analitica e limitata in tutto il piano complesso è necessariamente costante.

- b. Se $\text{Ker}(\lambda - T) = \{0\}$, $\text{Im}(\lambda - T)$ è un sottospazio lineare denso in X e $\text{Im}(\lambda - T) \neq X$, si ha $\lambda \in \sigma_c(T)$. Tali punti λ appartengono allo *spettro continuo* di T . In tal caso ogni $x \in X$ si può approssimare da vettori $(\lambda - T)z$ per qualche $z \in X$. Purtroppo esistono $x \in X$ tale che l'equazione $(\lambda - T)z = x$ non ha nessuna soluzione $z \in X$.
- c. Se $\text{Ker}(\lambda - T) = \{0\}$ e $\text{Im}(\lambda - T)$ è un sottospazio NON denso in X , si ha $\lambda \in \sigma_r(T)$ [lo *spettro residuo* di T].
- d. Se $\text{Ker}(\lambda - T) \neq \{0\}$, λ è un autovalore di T . L'insieme degli autovalori si scrive come $\sigma_p(T)$ [inglese: point spectrum]. Gli autovettori corrispondenti all'autovalore λ sono tutti i vettori in $\text{Ker}(\lambda - T) \setminus \{0\}$.

Abbiamo ottenuto la partizione

$$\mathbb{C} = \rho(T) \cup \underbrace{\sigma_c(T) \cup \sigma_r(T) \cup \sigma_p(T)}_{\sigma(T)}$$

del piano complesso in quattro insiemi due a due disgiunti.

5.3 Operatori autoaggiunti e unitari

Discutiamo ora gli operatori lineari su uno spazio di Hilbert. Sia X uno spazio di Hilbert e sia $T \in \mathcal{L}(X)$. Si definisce l'operator aggiunto T^* dall'uguaglianza

$$(T^*x, y) = (x, Ty), \quad x, y \in X.$$

Si dimostra facilmente che

$$\begin{aligned} \|T^*\| &= \sup_{\|x\|=1} \|T^*x\| = \sup_{\|x\|=\|y\|=1} | \langle T^*x, y \rangle | \\ &= \sup_{\|x\|=\|y\|=1} | \langle x, Ty \rangle | = \sup_{\|y\|=1} \|Ty\| = \|T\|. \end{aligned}$$

Quindi $T^* \in \mathcal{L}(X)$ e $\|T^*\| = \|T\|$. Valgono le seguenti proprietà: $(\lambda T)^* = \bar{\lambda}T^*$ [$(\lambda T)^* = \lambda T^*$ in uno spazio di Hilbert reale], $(T+S)^* = T^*+S^*$, $(TS)^* = S^*T^*$, $(T^*)^* = T$.

Sia X uno spazio di Hilbert e sia $T \in \mathcal{L}(X)$. Introduciamo le seguenti classi di operatori lineari:

- a. Gli operatori *autoaggiunti*: $T^* = T$.
- b. Gli operatori *unitari*: T invertibile e $T^{-1} = T^*$.

In uno spazio di Hilbert *complesso* T un operatore $T \in \mathcal{L}(X)$ è autoaggiunto se e solo se (Tx, x) è un numero reale per ogni $x \in X$.

Teorema II.7 Sia $T \in \mathcal{L}(X)$ un operatore autoaggiunto. Allora

$$\sigma(T) \subset \{(Tx, x) : \|x\| = 1\} \subset \mathbb{R}.$$

Inoltre, $\sigma_r(T) = \emptyset$.

Dimostrazione. Prima dimostriamo che $\sigma_p(T) \subset \mathbb{R}$. Infatti se $\lambda \in \mathbb{R}$ e $0 \neq x \in X$ è il corrispondente autovettore tale che $Tx = \lambda x$, allora $\lambda\|x\|^2 = \lambda(x, x) = (Tx, x) \in \mathbb{R}$ e dunque $\lambda \in \mathbb{R}$.

Sia $\lambda \in \sigma_r(T)$. Siccome $\text{Im}(\lambda - T)$ è un sottospazio lineare non denso in X , esiste $0 \neq x \in X$ tale che $((\lambda - T)z, x) = 0$ per ogni $z \in X$. In tal caso ne segue, per $z = x$,

$$\lambda = \frac{(Tx, x)}{(x, x)} \in \mathbb{R}.$$

Quindi $\sigma_r(T) \subset \mathbb{R}$. Da questo fatto si trova per ogni $z \in X$

$$0 = ((\lambda - T)z, x) = (z, (\bar{\lambda} - T)x),$$

e quindi $(\bar{\lambda} - T)x = 0$ mentre $x \neq 0$. Risulta che $\bar{\lambda} \in \sigma_p(T)$. Siccome $\sigma_p(T) \subset \mathbb{R}$, si ha $\lambda \in \sigma_p(T)$. Contraddizione. Ne segue allora che $\sigma_r(T) = \emptyset$.

Sia $\lambda \in \sigma_p(T) \cup \sigma_c(T)$. Allora esiste una successione $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ in X tale che $\|x_n\| = 1$ ($n \in \mathbb{N}$) e $\|(\lambda - T)x_n\| \rightarrow 0$ se $n \rightarrow \infty$.⁷ Allora la stima $|((\lambda - T)x_n, x_n)| \leq \|(\lambda - T)x_n\| \|x_n\|$ con $\|x_n\| = 1$ implica che

$$\lambda - (Tx_n, x_n) = ((\lambda - T)x_n, x_n) \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty. \quad (\text{II.4})$$

Siccome $(Tx_n, x_n) \in \mathbb{R}$ per $n \in \mathbb{N}$, ne segue $\lambda \in \mathbb{R}$. Dunque $\sigma_p(T) \cup \sigma_c(T) \subset \mathbb{R}$.

Infine, $\sigma(T) = \sigma_p(T) \cup \sigma_c(T)$ e la relazione (B.4) [dove $\|x_n\| = 1$ per ogni $n \in \mathbb{N}$] implicano che lo spettro di T è contenuto nell'intervallo chiuso e limitato più piccolo che contiene l'insieme $\{(Tx, x) : \|x\| = 1\}$. Infatti, sia $\{(Tx, x) : \|x\| = 1\} \subset [m, M]$. Allora

$$m\|x\|^2 \leq (Tx, x) \leq M\|x\|^2, \quad x \in X.$$

Dunque per ogni $x \in X$

$$\begin{cases} \lambda > M : & (\lambda - M)\|x\|^2 \geq ((\lambda - T)x, x) \geq (\lambda - m)\|x\|^2 \\ \lambda < m : & (m - \lambda)\|x\|^2 \leq ((T - \lambda)x, x) \leq (M - \lambda)\|x\|^2. \end{cases}$$

Di conseguenza, se $\lambda \in \mathbb{R} \setminus [m, M]$, non esiste nessuna successione $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ tale che $\|x_n\| = 1$ ($n \in \mathbb{N}$) e $\|(\lambda - T)x_n\| \rightarrow 0$. Quindi $\sigma(T) \subset [m, M]$. \square

⁷Se non esistesse, avremmo $\|(\lambda - T)x\| \geq \varepsilon > 0$ per ogni vettore x di norma 1, il che esclude $\lambda \in \sigma_p(T)$ e implica la limitatezza di $(\lambda - T)^{-1}$. Siccome $\sigma_r(T) = \emptyset$ implica che $(\lambda - T)^{-1}$ può essere definito su uno sottospazio denso, la sua definizione si estende a tutto lo spazio X e quindi $\lambda \in \rho(T)$.

Si può infatti dimostrare che per un operatore lineare autoaggiunto l'insieme $\{(Tx, x) : \|x\| = 1\}$ è l'intervallo chiuso e limitato reale più piccolo che contiene lo spettro di T . In particolare, gli estremi di quell'intervallo appartengono a $\sigma(T)$. Purtroppo la dimostrazione non è elementare.

Teorema II.8 *Sia $T \in \mathcal{L}(X)$ un operatore autoaggiunto. Allora il suo raggio spettrale coincide con la sua norma: $r(T) = \|T\|$.*

Dimostrazione. Sia $T \in \mathcal{L}(X)$ autoaggiunto. Allora

$$\|Tx\|^2 = (Tx, Tx) = (T^2x, x) \leq \|T^2x\|\|x\|, \quad x \in X,$$

dove è stata applicata la disuguaglianza di Schwartz. Passando all'estremo superiore per gli $x \in X$ con $\|x\| = 1$ si ottiene $\|T\|^2 \leq \|T^2\|$ e dunque

$$\|T^2\| = \|T\|^2.$$

Questo implica

$$\|T^{2^n}\|^{1/2^n} = \|T\|, \quad n \in \mathbb{N}.$$

Passando al limite se $n \rightarrow \infty$ si trova $r(T) = \|T\|$. □

Passiamo ora agli operatori unitari. Utilizzando la formula di polarizzazione si può dimostrare che un'isometria (cioè, un operatore lineare U su uno spazio di Hilbert X tale che $\|U\varphi\| = \|\varphi\|$ per ogni $\varphi \in X$) ha la proprietà

$$(U\varphi, U\psi) = (\varphi, \psi), \quad \varphi, \psi \in X,$$

e quindi la proprietà

$$(U^*U\varphi, U\psi) = (\varphi, \psi), \quad \varphi, \psi \in X.$$

Quest'ultimo implica che U è un'isometria in X se e solo se $U^*U = I_X$. Nella stessa maniera si vede che un operatore U ha la proprietà che U^* è un'isometria se e solo se $UU^* = I_X$. Conclusione: U è un operatore unitario se e solo se U e U^* sono ambedue isometrie se e solo se U è un'isometria invertibile. Siccome in tal caso anche U^n e $U^{-n} = (U^{-1})^n$ sono isometrie ($n = 1, 2, 3, \dots$) se U è unitario, risulta

$$\|U^n\| = \|U^{-n}\| = 1, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Di conseguenza,

$$r(U) = r(U^{-1}) \leq 1,$$

e quindi $\sigma(U) \subset \{z \in \mathbb{C} : |z| = 1\}$.

5.4 Operatori autoaggiunti non limitati

Ci vuole una teoria degli operatori lineari autoaggiunti non limitati in uno spazio di Hilbert. Siano H uno spazio di Hilbert complesso e T un operatore lineare con dominio $D(T)$ denso in H . Allora T si dice *hermitiano* [oppure *simmetrico*] se

$$(Tx, y) = (x, Ty), \quad x, y \in D(T).$$

Per un operatore hermitiano T , definiamo l'operatore T^* da

$$\left\{ \begin{array}{l} D(T^*) = \left\{ y \in H : \begin{array}{l} \exists c = c(y) > 0 : \\ |(Tx, y)| \leq c(y)\|x\|, \quad x \in D(T) \end{array} \right\}, \\ \text{In tal caso } \exists! z \in H : (Tx, y) = (x, z); \text{ Poniamo } T^*y = z. \end{array} \right.$$

Ovviamente,

$$\left\{ \begin{array}{l} D(T) \subset D(T^*), \\ T^*x = Tx, \quad x \in D(T), \end{array} \right.$$

cioè T^* estende T (scritto: $T \subset T^*$).

Un operatore lineare T si dice *autoaggiunto* se $D(T)$ è denso in H , T è hermitiano e $T^* = T$. Quindi T è autoaggiunto se T è hermitiano e il suo dominio è denso e soddisfa

$$D(T) = \left\{ y \in H : \begin{array}{l} \exists c = c(y) > 0 : \\ |(Tx, y)| \leq c(y)\|x\|, \quad x \in D(T) \end{array} \right\}.$$

In tal caso l'insieme risolvente $\rho(T)$ di tutti i punti $\lambda \in \mathbb{C}$ per cui

$$\left\{ \begin{array}{l} (\lambda - T)[D(T)] = H, \\ \text{Ker}(\lambda - T) \stackrel{\text{def}}{=} \{x \in D(T) : Tx = \lambda x\} = \{0\}, \\ \exists c(\lambda) > 0 : \|(\lambda - T)^{-1}x\| \leq c(\lambda)\|x\| \text{ per } x \in H, \end{array} \right.$$

contiene $\mathbb{C} \setminus \mathbb{R}$. Quindi il suo complementare, lo spettro $\sigma(T) = \mathbb{C} \setminus \rho(T)$, è un sottoinsieme chiuso (ma non necessariamente limitato⁸) della retta reale. Inoltre, lo spettro residuo $\sigma_r(T)$ è vuoto.

Non tutti gli operatori simmetrici hanno un'estensione autoaggiunta. Inoltre, se esiste, ne esistono molte. Senza dimostrazione enunciamo il seguente risultato.

Teorema II.9 (Friedrichs) *Sia T un operatore hermitiano in H tale che per un'opportuna costante q*

$$(Tx, x) \geq q\|x\|^2, \quad x \in D(T).$$

⁸Infatti $\sigma(T)$ è limitato se e solo se $D(T) = H$ se e solo se T è limitato.

Allora esiste un'unica estensione autoaggiunta \bar{T} di T , la cosiddetta estensione di Friedrichs, tale che

$$(\bar{T}x, x) \geq q\|x\|^2, \quad x \in D(\bar{T}).$$

Sotto le ipotesi del Teorema B.8 potrebbero esistere moltissime estensioni autoaggiunte di T , ma soltanto quella di Friedrichs ha la proprietà di essere limitata inferiormente.

Nei Cap. IV e V discuteremo l'estensione autoaggiunta \bar{L} di un operatore di Sturm-Liouville L . Essendo q_{\min} il minimo del coefficiente $q(x)$ dell'operatore differenziale, quest'operatore L è simmetrico nel senso che $(Lf, g) = (f, Lg)$ per f, g nel dominio \mathcal{M}_L di L e soddisfa $(Lf, f) \geq q_{\min}\|f\|_2^2$ per $f \in \mathcal{M}_L$. In tal caso un'estensione \bar{L} definita in un dominio denso $D(\bar{L})$ tale che $\bar{L}[D(\bar{L})] = L^2(\Omega)$ e $G \stackrel{\text{def}}{=} \bar{L}^{-1}$ è un operatore integrale con nucleo hermitiano continuo $\mathcal{G}(x, y)$, la cosiddetta funzione di Green, tutto quanto sotto l'ipotesi che $\lambda = 0$ non sia autovalore del problema di Sturm-Liouville. Nel caso unidimensionale abbiamo infatti dimostrato tutti i passaggi. L'abbiamo lasciato in sospeso nel caso multidimensionale.

Capitolo III

EQUAZIONI DIFFERENZIALI E FUNZIONI SPECIALI

In questo capitolo iniziamo a discutere le equazioni differenziali lineari di secondo ordine, in particolare la teoria di Frobenius. Poi discutiamo le cosiddette funzioni speciali. Tali funzioni vengono utilizzate spesso nelle applicazioni e loro proprietà vengono tabellate. Tra i libri di tabellazione più utilizzati ci trovano i classici libri di Abramowitz e Stegun [1], di Gradshteyn e Ryzik [8], di Watson [21] (che è specializzato nelle funzioni di Bessel), e di Whittaker e Watson [22]. È più moderno il libro di Varshalovich, Moskalev e Khersonskii [19]. La teoria dei polinomi ortogonali si trova nel classico libro di Szegő [17].

1 Equazioni Differenziali di Secondo Ordine

Consideriamo l'equazione differenziale lineare non omogenea

$$y'' + a_1(x)y' + a_0(x)y = g(x), \quad x \in I, \quad (\text{III.1})$$

dove a_0 , a_1 e g sono funzioni reali continue di $x \in I$, essendo I un intervallo aperto della retta reale. Allora per ogni $x_0 \in I$ e per ogni coppia di numeri $(y_0, y_1) \in \mathbb{R}^2$ esiste una soluzione unica della (II.1) tale che

$$y(x_0) = y_0, \quad y'(x_0) = y_1. \quad (\text{III.2})$$

Ponendo y_p per la soluzione particolare dell'equazione non omogenea (II.1) che soddisfa alle condizioni $y_p(x_0) = y_p'(x_0) = 0$, la soluzione del problema a valori iniziali (II.1)-(II.2) ha la seguente forma:

$$y(x) = y_0 Y_1(x) + y_1 Y_2(x) + y_p(x), \quad (\text{III.3})$$

dove Y_0 e Y_1 sono le soluzioni della corrispondente equazione omogenea

$$y'' + a_1(x)y' + a_0(x)y = 0, \quad x \in I, \quad (\text{III.4})$$

tali che

$$Y_0(x_0) = 1, \quad Y_0'(x_0) = 0, \quad (\text{III.5})$$

$$Y_1(x_0) = 0, \quad Y_1'(x_0) = 1. \quad (\text{III.6})$$

Quindi le soluzioni dell'equazione omogenea (II.4) costituiscono uno spazio vettoriale reale di dimensione 2.

La mappa $(y_0, y_1) \mapsto y$, con y la soluzione dell'equazione omogenea (II.4) che soddisfa la (II.2), è una corrispondenza biunivoca lineare tra \mathbb{R}^2 e lo spazio vettoriale delle soluzioni dell'equazione omogenea (II.4). Dunque due soluzioni y_1 e y_2 dell'equazione omogenea (II.4) sono linearmente indipendenti se e solo se sono linearmente indipendenti i loro vettori colonna dei dati iniziali $(y_j(x_0), y_j'(x_0))^T$ ($j = 1, 2$), cioè se e solo se il loro *Wronskiano*

$$w(x_0) \stackrel{\text{def}}{=} \det \begin{pmatrix} y_1(x_0) & y_2(x_0) \\ y_1'(x_0) & y_2'(x_0) \end{pmatrix} \neq 0. \quad (\text{III.7})$$

La matrice 2×2 nella (II.7) si dice *matrice Wronskiana*. Siccome la trasformazione lineare dai dati iniziali delle soluzioni della equazione omogenea in x_0 ai dati iniziali in un altro punto $\hat{x}_0 \in I$ è per forza una corrispondenza biunivoca, ne segue che il Wronskiano $w(x)$ si annulla da nessuna parte oppure si annulla dappertutto in I . Quest'ultima proprietà si dimostra anche nel seguente modo:

$$\begin{aligned} w'(x) &= \frac{d}{dx}(y_1 y_2' - y_2 y_1') = y_1 y_2'' - y_2 y_1'' \\ &= y_1(-a_1 y_2' - a_0 y_2) - y_2(-a_1 y_1' - a_0 y_1) \\ &= -a_1(y_1 y_2' - y_2 y_1') = -a_1 w. \end{aligned} \quad (\text{III.8})$$

Quindi, $w(x) = \text{cost.} \exp(-A_1(x))$, essendo A_1 una primitiva della funzione coefficiente a_1 . Di conseguenza, $w(x) = 0$ se e solo se si annulla la costante se e solo se $w(x) = 0$ per ogni $x \in I$.

Per risolvere l'equazione non omogenea (II.1) partendo da due soluzioni linearmente indipendenti y_1 e y_2 della corrispondente equazione omogenea (II.4), si utilizzi il *metodo della variazione dei parametri*. Ponendo

$$y(x) = c_1(x)y_1(x) + c_2(x)y_2(x) \quad (\text{III.9})$$

e facendo l'ipotesi che $c_1'(x)y_1(x) + c_2'(x)y_2(x) = 0$ per ogni $x \in I$, si arriva al seguente sistema lineare

$$\begin{pmatrix} y_1(x) & y_2(x) \\ y_1'(x) & y_2'(x) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1'(x) \\ c_2'(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ g(x) \end{pmatrix}. \quad (\text{III.10})$$

Essendo $w(x) \neq 0$ (per ogni $x \in I$) il determinante della matrice del sistema lineare (II.10) (cioè il Wronskiano), risulta la soluzione

$$\begin{pmatrix} c_1'(x) \\ c_2'(x) \end{pmatrix} = \frac{1}{w(x)} \begin{pmatrix} y_2'(x) & -y_2(x) \\ -y_1'(x) & y_1(x) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ g(x) \end{pmatrix} = \frac{g(x)}{w(x)} \begin{pmatrix} -y_2(x) \\ y_1(x) \end{pmatrix}, \quad (\text{III.11})$$

da cui si trovano $c_1(x)$ e $c_2(x)$ (e dunque la soluzione y) integrando.

2 Metodo di Frobenius

L'equazione differenziale ordinaria

$$\boxed{y'' + P(x)y' + Q(x)y = 0}, \quad (\text{III.12})$$

dove $P(x)$ e $Q(x)$ sono funzioni analitiche in un intorno di $x = 0$ e quindi ammettono uno sviluppo in potenze di x con raggio di convergenza strettamente positiva, può essere risolta sostituendo $y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n x^n$. Risulta una relazione di ricorrenza per i coefficienti c_n che ci consente a calcolare c_2, c_3, c_4, \dots in modo unico dai coefficienti iniziali $c_0 = y(0)$ e $c_1 = y'(0)$. Inoltre, il raggio di convergenza della serie di potenze per la $y(x)$ non è inferiore al minimo dei raggi di convergenza delle serie di potenze per $P(x)$ e $Q(x)$. Siccome $y(0)$ e $y'(0)$ determinano completamente la soluzione y , si trovano in tal modo tutte le soluzioni dell'equazione differenziale (II.12).

Esempio III.1 Il metodo di risoluzione sostituendo $y = \sum_{n=0}^{\infty} c_n x^n$ viene illustrato dall'*equazione di Airy*

$$\boxed{y'' = xy.}$$

Siccome $y''(0) = 0$, abbiamo $c_2 = 0$. Quindi $y'' = \sum_{n=0}^{\infty} n(n-1)c_n x^{n-2} = \sum_{n=0}^{\infty} (n+3)(n+2)c_{n+3} x^{n+1}$ e $xy = \sum_{n=0}^{\infty} c_n x^{n+1}$ implicano

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+3)(n+2)c_{n+3} x^{n+1} = \sum_{n=0}^{\infty} c_n x^{n+1},$$

e quindi si arriva alla relazione di ricorrenza

$$(n+2)(n+3)c_{n+3} = c_n, \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

partendo da $c_0 = y(0)$, $c_1 = y'(0)$ e $c_2 = 0$. Quindi

$$c_{3k} = \frac{c_0}{2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 8 \cdot 9 \cdot \dots \cdot (3k-1)(3k)}, \quad c_{3k+1} = \frac{c_1}{3 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 7 \cdot 9 \cdot 10 \cdot \dots \cdot (3k)(3k+1)},$$

e $c_2 = c_5 = c_8 = \dots = 0$. Di conseguenza

$$y(x) = y(0) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^{3k}}{2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 6 \cdot \dots \cdot (3k-1)(3k)} + y'(0) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^{3k+1}}{3 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 7 \cdot \dots \cdot (3k)(3k+1)},$$

dove ambedue le serie hanno raggio di convergenza $+\infty$.

Il **metodo di Frobenius** (1877) è stato sviluppato per risolvere certe equazioni differenziali ordinarie con coefficienti singolari utilizzando lo sviluppo della soluzione in serie di potenza. In tal caso l'equazione differenziale ha la forma (II.12), dove $p(x) \stackrel{\text{def}}{=} P(x)/x$ e $q(x) \stackrel{\text{def}}{=} Q(x)/x^2$ sono funzioni analitiche in un intorno di $x = 0$. Si dice che $x = 0$ è una *singularità regolare* [inglese: regular singularity] dell'equazione.

Consideriamo prima l'esempio più elementare di un'equazione differenziale con singularità regolare ad $x = 0$, la cosiddetta *equazione di Eulero*

$$\boxed{x^2 y'' + pxy' + qy = 0}, \quad (\text{III.13})$$

dove p e q sono coefficienti costanti reali. Per $(\pm x) > 0$ sostituiamo $x = \pm e^t$, dove $t \in \mathbb{R}$, e arriviamo all'equazione a coefficienti costanti

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + (p-1) \frac{dy}{dt} + qy = 0. \quad (\text{III.14})$$

La sua equazione caratteristica, ora detta *equazione indiciale*, è

$$\alpha(\alpha-1) + p\alpha + q = 0. \quad (\text{III.15})$$

Quest'equazione segue dalla (II.13) sostituendo $y = (\pm x)^\alpha$ per $(\pm x) > 0$.

Ci sono tre possibilità:

- a. Discriminante $= (p-1)^2 - 4q > 0$. L'equazione indiciale (II.15) ha due radici reali diverse α_1 e α_2 . In tal caso la soluzione della (II.13) è

$$y(x) = c_1 e^{\alpha_1 t} + c_2 e^{\alpha_2 t} = c_1 |x|^{\alpha_1} + c_2 |x|^{\alpha_2}.$$

- b. Discriminante $= (p-1)^2 - 4q = 0$. L'equazione indiciale (II.15) ha una singola radice reale α doppia. In tal caso la soluzione della (II.13) è

$$y(x) = c_1 e^{\alpha t} + c_2 t e^{\alpha t} = c_1 |x|^\alpha + c_2 |x|^\alpha \ln |x|.$$

- c. Discriminante $= (p-1)^2 - 4q < 0$. L'equazione indiciale (II.15) ha due radici complesse coniugate $\sigma \pm i\tau$ dove σ e τ sono reali. In tal caso la soluzione della (II.13) è

$$y(x) = e^{\sigma t} [c_1 \cos(\tau t) + c_2 \sin(\tau t)] = |x|^\sigma [c_1 \cos(\tau \ln |x|) + c_2 \sin(\tau \ln |x|)].$$

Spieghiamo ora il *Metodo di Frobenius* (1877). Si cerchi la generalizzazione della risoluzione dell'equazione di Eulero alle equazioni differenziali

$$\boxed{x^2 y''(x) + xp(x)y'(x) + q(x)y(x) = 0}, \quad (\text{III.16})$$

dove $p(x)$ e $q(x)$ sono funzioni analitiche in un intorno di $x = 0$ nel piano complesso. Ciò vuol dire che

$$p(x) = \sum_{n=0}^{\infty} p_n x^n, \quad q(x) = \sum_{n=0}^{\infty} q_n x^n, \quad (\text{III.17})$$

dove ambedue serie di potenze hanno un raggio di convergenza strettamente positiva. Sostituiamo ora nella (II.16)

$$y(x) = x^\alpha \sum_{n=0}^{\infty} c_n x^n = \sum_{n=0}^{\infty} c_n x^{n+\alpha}, \quad (\text{III.18})$$

dove, per ipotesi, la serie ha un raggio di convergenza $R > 0$.¹ Allora

$$xy'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n + \alpha) c_n x^{n+\alpha}, \quad x^2 y''(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n + \alpha)(n + \alpha - 1) c_n x^{n+\alpha}, \quad (\text{III.19})$$

dove abbiamo calcolato le derivate termine a termine. Sostituendo la (II.18) e la (II.19) nella (II.16) otteniamo

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left[(n + \alpha)(n + \alpha - 1) c_n + \sum_{j=0}^n p_{n-j} (j + \alpha) c_j + \sum_{j=0}^n q_{n-j} c_j \right] x^{n+\alpha} = 0.$$

Quindi tutti i coefficienti di questa serie si devono annullare:

$$(n + \alpha)(n + \alpha - 1) c_n + \sum_{j=0}^n p_{n-j} (j + \alpha) c_j + \sum_{j=0}^n q_{n-j} c_j = 0, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{III.20})$$

La (II.20) si può anche scrivere nella forma matriciale

$$\sum_{j=0}^n T(\alpha)_{nj} c_j = 0,$$

¹Si può dimostrare che il raggio di convergenza di questa serie di potenze non è inferiore al minimo dei raggi di convergenza delle serie di potenze nella (II.17).

dove la matrice semiinfinita $T(\alpha)$ con elementi

$$T(\alpha)_{nj} = \begin{cases} \Lambda(\alpha + n) \stackrel{\text{def}}{=} (\alpha + n)(\alpha + n - 1) + p_0(\alpha + n) + q_0, & n = j, \\ p_{n-j}(j + \alpha) + q_{n-j}, & n > j, \\ 0, & n < j. \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

è sottotriangolare. In particolare, abbiamo trovate la cosiddetta *equazione indiciale*

$$\boxed{\Lambda(\alpha) \stackrel{\text{def}}{=} \alpha(\alpha - 1) + p_0\alpha + q_0 = 0.} \quad (\text{III.22})$$

Affinchè $c_0 \neq 0$, α deve essere una radice della (II.22).

Teorema III.2 (Frobenius) *Supponiamo che l'equazione indiciale (II.20) ha due zeri diversi con una differenza non intera. Allora, scegliendo per α uno degli zeri, si ottengono due soluzioni linearmente indipendenti della (II.16) per $|x|$ inferiore al minimo dei raggi di convergenza delle serie di potenza (II.17).*

Scrivendo la (II.21) nella forma

$$\sum_{j=1}^n T(\alpha)_{nj}c_j = -c_0T(\alpha)_{n0}, \quad n = 1, 2, \dots, m, \dots,$$

dove α è uno zero dell'equazione indiciale (II.22) e

$$\det (T(\alpha)_{nj})_{n,j=1}^m = \Lambda(\alpha + 1)\Lambda(\alpha + 2) \dots \Lambda(\alpha + m),$$

troviamo in modo unico tutti i coefficienti $c_1, c_2, \dots, c_m, \dots$ se nessuno dei numeri $\alpha + 1, \alpha + 2, \dots, \alpha + m, \dots$ è uno zero dell'equazione indiciale (II.22). In tal caso risultano due soluzioni linearmente indipendenti, una per ciascuno zero della (II.22).

Se l'equazione indiciale (II.22) ha un singolo zero $\alpha \in \mathbb{R}$, allora la (II.18) conduce ad una singola soluzione linearmente indipendente della (II.16). Per trovare una seconda soluzione linearmente indipendente, si calcolino i coefficienti $c_n(\alpha)$ dal coefficiente c_0 utilizzando la (II.20) e inserendo α come fosse un parametro libero. La seconda soluzione linearmente indipendente ora ha la seguente forma:

$$\left[\frac{\partial}{\partial \alpha} \sum_{n=0}^{\infty} c_n(\alpha)x^{n+\alpha} \right]_{\alpha=\alpha_0}, \quad (\text{III.23})$$

dove α_0 è il singolo zeri dell'equazione indiciale.

Se l'equazione indiciale ha due zeri reali con differenza intera, α_0 e $\alpha_0 - N$ per un opportuno $N \in \mathbb{N}$, allora la situazione è abbastanza complicata,

poichè in alcuni casi si trovano due soluzioni linearmente indipendenti e negli altri casi due soluzioni proporzionali. Sostituendo $\alpha = \alpha_0$, **essendo** α_0 **lo zero maggiore**, si vede subito che si possono trovare tutti i coefficienti c_n dal coefficiente c_0 in modo unico. D'altra parte, sostituendo $\alpha = \alpha_0 - N$, essendo $\alpha_0 - N$ lo zero minore, si vede subito che si possono calcolare in modo unico i coefficienti $c_1, \dots, c_2, \dots, c_{N-1}$ dal coefficiente c_0 risolvendo il sistema di equazioni lineari

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \Lambda(\alpha+1) & 0 & \dots & 0 \\ T(\alpha)_{21} & \Lambda(\alpha+2) & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ T(\alpha)_{N-1,1} & \dots & \dots & \Lambda(\alpha+N-1) \end{pmatrix}}_{\text{determinante}=\Lambda(\alpha_0-N+1)\Lambda(\alpha_0-N+2)\dots\Lambda(\alpha_0-1)\neq 0} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_{N-1} \end{pmatrix} = -c_0 \begin{pmatrix} T(\alpha)_{10} \\ T(\alpha)_{20} \\ \vdots \\ T(\alpha)_{N-1,0} \end{pmatrix}, \quad (\text{III.24})$$

dove $\alpha = \alpha_0 - N$. Arriviamo così alla soluzione unica

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_{N-1} \end{pmatrix} = -c_0 M^{-1} \begin{pmatrix} T(\alpha_0 - N)_{10} \\ T(\alpha_0 - N)_{20} \\ \vdots \\ T(\alpha_0 - N)_{N-1,0} \end{pmatrix},$$

dove M è la matrice quadrata nella (II.24).

Estendiamo ora la (II.24) al sistema di equazioni (II.21) per $m = N$ e $\alpha = \alpha_0 - N$. In tal caso l'ultima equazione ha la forma

$$\sum_{j=0}^{N-1} [p_{N-j}(j + \alpha_0 - N) + q_{N-j}] c_j = 0,$$

oppure

$$c_0 \left\{ T(\alpha_0 - N)_{N,0} + (T(\alpha_0 - N)_{N,1} \dots T(\alpha_0 - N)_{N,N-1}) M^{-1} \begin{pmatrix} T(\alpha_0 - N)_{10} \\ \vdots \\ T(\alpha_0 - N)_{N-1,0} \end{pmatrix} \right\} = 0.$$

Ora ci sono due possibilità.

Prima: Se non si annulla l'espressione tra parentesi graffe, dobbiamo per forza scegliere $c_0 = 0$. In tal caso $c_0 = c_1 = \dots = c_{N-1} = 0$. Scegliamo ora un coefficiente c_N . Allora la (II.20) per $n \geq N + 1$ e $\alpha = \alpha_0 - N$ ci consentono a calcolare c_{N+1}, c_{N+2}, \dots da c_N in modo unico. Ponendo $d_n = c_{N+n}$ per

$n = 0, 1, 2, \dots$ e $n = N + m$ per $m = 0, 1, 2, \dots$, la (II.20) ha la forma

$$(m + \alpha_0)(m + \alpha_0 - 1)d_m + \sum_{l=0}^m p_{m-l}(l + \alpha_0)d_l + \sum_{l=0}^m q_{m-l}d_l = 0, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (\text{III.25})$$

e quindi per $\alpha = \alpha_0 - N$ si otterrà una soluzione proporzionale a quella ottenuta per $\alpha = \alpha_0$.

Seconda: Se si annulla l'espressione tra parentesi graffe, allora l'equazione per c_N risulta infatti la tautologia $0 = 0$, mentre per $n \geq N + 1$ e $\alpha = \alpha_0 - N$ la (II.20) conduce a valori per i coefficienti c_{N+1}, c_{N+2}, \dots che dipendono in modo unico e lineare dai coefficienti c_0 e c_N . Quindi si otterranno due soluzioni linearmente indipendenti.

Esempio III.3 Consideriamo l'equazione differenziale di Bessel

$$\boxed{x^2 y''(x) + xy'(x) + (x^2 - \nu^2)y(x) = 0}$$

di ordine $\nu \geq 0$, dove $p(x) \equiv 1$ e $q(x) = x^2 - \nu^2$. Quindi $p_0 = 1$, $q_0 = -\nu^2$ e $q_2 = 1$, e l'equazione indiciale

$$\Lambda(\alpha) = \alpha(\alpha - 1) + p_0\alpha + q_0 = \alpha^2 - \nu^2 = 0$$

ha gli zeri $\pm\nu$. Di conseguenza, se 2ν non è un intero, il metodo di Frobenius conduce a due soluzioni linearmente indipendenti. Supponiamo ora che $0 \neq 2\nu \in \mathbb{Z}$. Allora la (II.24) implica

$$\begin{cases} \Lambda(-\nu + 1)c_1 = 0, \\ \Lambda(-\nu + n)c_n + c_{n-2} = 0, \quad n = 2, \dots, \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

dove $0 \notin \{\Lambda(-\nu + n) : n = 1, 2, \dots, 2\nu - 1\} \cup \{\Lambda(-\nu + n) : n \geq 2\nu + 1\}$. È facile capire che per 2ν dispari si trovano due soluzioni linearmente indipendenti, mentre per 2ν si trova una singola soluzione linearmente indipendente. Infatti, se 2ν è pari, per $n = 2\nu$ si trova $c_{2\nu-2} = 0$; utilizzando la (II.26) per $n = 2, 4, \dots, 2\nu - 2$ pari, otteniamo $0 = c_{2\nu-2} = c_{2\nu-4} = \dots = c_2 = c_0$, mentre la (II.26) per $n = 1, 3, \dots, 2\nu - 1$ conduce a $0 = c_1 = c_3 = \dots = c_{2\nu-1} = 0$. Per 2ν dispari, lo stesso ragionamento conduce a $c_1 = c_3 = \dots = c_{2\nu} = \dots = 0$ direttamente.

3 Funzioni Ipergeometriche

Consideriamo ora la *funzione ipergeometrica*

$$\boxed{{}_2F_1(\alpha, \beta; \gamma; z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\alpha)_k (\beta)_k}{k! (\gamma)_k} z^k} \quad (\text{III.27})$$

per $|z|$ abbastanza piccola, dove il *simbolo di Pochhammer* $\alpha_0 = 1$ e

$$\boxed{(\alpha)_k \stackrel{\text{def}}{=} \alpha(\alpha+1)(\alpha+2)\dots(\alpha+k-1) = \frac{\Gamma(\alpha+k)}{\Gamma(\alpha)}}.$$

Ovviamente si ha la relazione di simmetria

$${}_2F_1(\alpha, \beta; \gamma; z) = {}_2F_1(\beta, \alpha; \gamma; z)$$

per $|z|$ abbastanza piccola. Ovviamente

$${}_2F_1(\alpha, \beta; \gamma; 0) = 1, \quad \left[\frac{d}{dz} {}_2F_1(\alpha, \beta; \gamma; z) \right]_{z=0} = \frac{\alpha\beta}{\gamma}. \quad (\text{III.28})$$

| α | β | γ | z | ${}_2F_1(\alpha, \beta; \gamma; z)$ |
|---------------|---------------|---------------|--------|-------------------------------------|
| α | β | β | z | $(1-z)^{-\alpha}$ |
| 1 | 1 | 2 | z | $-\log(1-z)/z$ |
| $\frac{1}{2}$ | 1 | $\frac{3}{2}$ | z^2 | $\frac{1}{2z} \log \frac{1+z}{1-z}$ |
| $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{3}{2}$ | z^2 | $\arcsin(z)/z$ |
| $\frac{1}{2}$ | 1 | $\frac{3}{2}$ | $-z^2$ | $\arctan(z)/z$ |

Per trovare un'espressione integrale per le funzioni ipergeometriche si ricorda prima che

$$\begin{aligned} \frac{(\beta)_k}{(\gamma)_k} &= \frac{\Gamma(\beta+k)\Gamma(\gamma)}{\Gamma(\beta)\Gamma(\gamma+k)} = \frac{B(\beta+k, \gamma-\beta)}{B(\beta, \gamma-\beta)} \\ &= \frac{1}{B(\beta, \gamma-\beta)} \int_0^1 (1-t)^{\gamma-\beta-1} t^{\beta+k-1} dt. \end{aligned}$$

Sostituendolo nella (II.27) otteniamo

$$\begin{aligned} {}_2F_1(\alpha, \beta; \gamma; z) &= \frac{1}{B(\beta, \gamma-\beta)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\alpha)_k}{k!} z^k \int_0^1 (1-t)^{\gamma-\beta-1} t^{\beta+k-1} dt \\ &= \frac{1}{B(\beta, \gamma-\beta)} \int_0^1 (1-t)^{\gamma-\beta-1} t^{\beta-1} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\alpha)_k}{k!} (zt)^k \right\} dt \\ &= \frac{1}{B(\beta, \gamma-\beta)} \int_0^1 (1-t)^{\gamma-\beta-1} t^{\beta-1} (1-zt)^{-\alpha} dt, \end{aligned}$$

valida per $|z| < 1$ e $\gamma > \beta > 0$, dove B è la funzione beta di Eulero [Vedi l'Appendice A]. Sostituendo $z = 1$ si ottiene

$${}_2F_1(\alpha, \beta; \gamma; 1) = \frac{1}{B(\gamma-\beta)} \int_0^1 (1-t)^{\gamma-\alpha-\beta-1} t^{\beta-1} dt = \frac{B(\beta, \gamma-\alpha-\beta)}{B(\beta, \gamma-\beta)}$$

per $\gamma - \alpha - \beta > 0$ e $\beta > 0$. Esprimendo le funzioni beta di Eulero in funzioni gamma (vedi l'Appendice A) otteniamo il *teorema di Gauss*

$${}_2F_1(\alpha, \beta; \gamma; 1) = \frac{\Gamma(\gamma)\Gamma(\gamma - \alpha - \beta)}{\Gamma(\gamma - \alpha)\Gamma(\gamma - \beta)}, \quad (\text{III.29})$$

dove $\gamma - \alpha - \beta > 0$ e $\beta > 0$.

La funzione ipergeometrica ${}_2F_1(\alpha, \beta; \gamma; z)$ soddisfa all'equazione differenziale ipergeometrica

$$\boxed{x(1-x)y''(x) + \{\gamma - (\alpha + \beta + 1)x\}y'(x) - \alpha\beta y = 0.} \quad (\text{III.30})$$

Tutti i punti $z \in \mathbb{C} \setminus \{0, 1, \infty\}$ sono punti regolari della (II.29) (cioè, esistono due soluzioni linearmente indipendenti in un intorno di ciascuno di questi punti), mentre 0, 1 e ∞ sono singolarità regolari.

Intorno a $x = 0$ la (II.30) ha la forma

$$y'' + \frac{\gamma - (\alpha + \beta + 1)x}{x(1-x)}y' - \frac{\alpha\beta}{x(1-x)}y = 0.$$

Quindi l'equazione indiciale è

$$\mu(\mu - 1) + \gamma\mu = \mu(\mu + \gamma - 1) = 0,$$

con gli zeri 0 e $1 - \gamma$. Quindi la sostituzione $y(x) = x^\mu \sum_{k=0}^{\infty} c_k x^k$ per $\mu \in \{0, 1 - \gamma\}$ conduce a due soluzioni linearmente indipendenti per $|x| < 1$ se $\gamma \notin \mathbb{Z}$.

Intorno a $x = 1$ l'equazione indiciale è

$$\mu(\mu - 1) + (\alpha + \beta - \gamma + 1)\mu = \mu(\mu + \alpha + \beta - \gamma) = 0,$$

con gli zeri 0 e $\gamma - \alpha - \beta$. Quindi la sostituzione $y(x) = (x-1)^\mu \sum_{k=0}^{\infty} c_k (x-1)^k$ per $\mu \in \{0, \gamma - \alpha - \beta\}$ conduce a due soluzioni linearmente indipendenti per $|x-1| < 1$ se $\gamma - \alpha - \beta \notin \mathbb{Z}$.

Intorno a $x = \infty$ possiamo trasformare la (II.30) ponendo $z = 1/x$ e considerando $z = 0$ come singolarità regolare. Si ottiene l'equazione differenziale

$$\begin{aligned} & \frac{1}{z} \left(1 - \frac{1}{z}\right) z^2 \frac{d}{dz} (z^2 y'(z)) - \left[\gamma - \frac{\alpha + \beta + 1}{z}\right] z^2 \frac{dy}{dz} - \alpha\beta y(z) \\ & = z^2(z-1)y''(z) - z[2(1-z) + \gamma z - \alpha - \beta - 1]y'(z) - \alpha\beta y(z) = 0. \end{aligned}$$

L'equazione indiciale è

$$\mu(\mu - 1) + \mu(1 - \alpha - \beta) + \alpha\beta = (\mu - \alpha)(\mu - \beta) = 0.$$

Quindi la sostituzione $y(x) = x^{-\mu} \sum_{k=0}^{\infty} c_k x^{-k}$ per $\mu \in \{\alpha, \beta\}$ conduce a due soluzioni linearmente indipendenti per $|x| > 1$ se $\alpha - \beta \notin \mathbb{Z}$.

Per passare all'equazione ipergeometrica confluyente osserviamo prima che la funzione ${}_2F_1(\alpha, \beta; \gamma; x/\beta)$ soddisfa all'equazione differenziale

$$\boxed{x \left(1 - \frac{x}{\beta}\right) \frac{d^2 y}{dx^2} + \left\{ \gamma - \left(1 + \frac{\alpha + 1}{\beta}\right) x \right\} \frac{dy}{dx} - \alpha y = 0.} \quad (\text{III.31})$$

Facendo tendere $\beta \rightarrow \infty$ si arriva alla cosiddetta *equazione ipergeometrica confluyente*

$$xy''(x) + (\gamma - x)y'(x) - \alpha y = 0. \quad (\text{III.32})$$

Siccome $(\beta)_k/\beta^k \rightarrow 1$ se $\beta \rightarrow \infty$ per k fissa, otteniamo come una delle soluzioni la *funzione ipergeometrica confluyente*

$$\boxed{{}_1F_1(\alpha; \gamma; x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\alpha)_k}{(\gamma)_k k!} x^k.} \quad (\text{III.33})$$

| α | γ | z | ${}_1F_1(\alpha; \gamma; z)$ |
|---------------|---------------|--------|---|
| α | α | z | e^z |
| $\alpha + 1$ | α | z | $\left(1 + \frac{\alpha}{z}\right) e^z$ |
| $\frac{1}{2}$ | $\frac{3}{2}$ | $-z^2$ | $\frac{\sqrt{\pi}}{2z} \operatorname{erf}(z)$ |

Tutti i punti in $\mathbb{C} \setminus \{0, \infty\}$ sono regolari, mentre zero e ∞ sono singolarità della (II.31). Infatti, intorno ad $x = 0$ si ottiene l'equazione indiciale

$$\mu(\mu - 1) + \gamma\mu = \mu(\mu + \gamma - 1) = 0,$$

con gli zeri 0 e $1 - \gamma$. Quindi la sostituzione $y(x) = x^\mu \sum_{k=0}^{\infty} c_k x^k$ per $\mu \in \{0, 1 - \gamma\}$ conduce a due soluzioni linearmente indipendenti per $|x| < 1$ se $\gamma \notin \mathbb{Z}$. Il punto all'infinito non è una singolarità regolare. Infatti, la sostituzione $z = (1/x)$ nella (II.32) conduce all'equazione differenziale

$$\frac{1}{z} z^2 \frac{d}{dz} \left(z^2 \frac{dy}{dz} \right) + \left(\gamma - \frac{1}{z} \right) \frac{dy}{dz} - \alpha y = 0$$

oppure

$$z^3 \frac{d^2 y}{dz^2} + ([2 + \gamma]z^2 - z) \frac{dy}{dz} - \alpha y = 0.$$

4 Funzioni di Bessel

Consideriamo l'equazione differenziale

$$\boxed{x^2 u'' + x u' + (x^2 - \nu^2) u = 0}, \quad (\text{III.34})$$

detta *equazione di Bessel*. Ogni soluzione di quest'equazione non identicamente nulla è detta *funzione cilindrica*.

4.1 Definizione e proprietà semplici

Consideriamo, per $\nu \in \mathbb{R}$, la funzione²

$$\boxed{J_\nu(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{\Gamma(k + \nu + 1)\Gamma(k + 1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+\nu}}, \quad (\text{III.35})$$

dove $\Gamma(z)$ è la funzione Gamma che soddisfa $\Gamma(z + 1) = z \Gamma(z)$ e $\Gamma(1) = 1$ [vedi l'Appendice A]. Si può rappresentare nella forma

$$J_\nu(x^2) = x^\nu f_\nu(x^2), \quad (\text{III.36})$$

dove $f_\nu(\zeta)$ è una funzione analitica in tutto il piano complesso,

$$f_\nu(\zeta) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \zeta^k}{2^{2k+\nu} \Gamma(k + \nu + 1)\Gamma(k + 1)}, \quad (\text{III.37})$$

con raggio di convergenza $R = +\infty$. Quindi la sua somma definisce una funzione analitica $f_\nu(\zeta)$ in tutto il piano complesso.

Verifichiamo che la funzione $J_\nu(x)$ soddisfa l'equazione (II.34). Utilizzando la relazione $\Gamma(z + 1) = z\Gamma(z)$, si ottiene

$$\begin{aligned} & x^2 J_\nu''(x) + x J_\nu'(x) - \nu^2 J_\nu(x) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k [(2k + \nu)(2k + \nu - 1) + (2k + \nu) - \nu^2]}{\Gamma(k + \nu + 1)\Gamma(k + 1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+\nu} \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k 4k(k + \nu)}{\Gamma(k + \nu + 1)\Gamma(k + 1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+\nu} = 4 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{\Gamma(k + \nu)\Gamma(k)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+\nu} \\ &= -x^2 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{\Gamma(k + \nu + 1)\Gamma(k + 1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+\nu} = -x^2 J_\nu(x), \end{aligned}$$

²La (II.35) si può anche derivare applicando il metodo di Frobenius.

come dovevasi dimostrare. La funzione cilindrica $J_\nu(x)$ si dice *funzione di Bessel di ordine ν* , dove $x^\nu > 0$ per $x > 0$. In particolare

$$\begin{cases} J_{1/2}(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)!} x^{2k+1} = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \sin x, \\ J_{-1/2}(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k)!} x^{2k} = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \cos x. \end{cases} \quad (\text{III.38})$$

Se $\nu > 0$ non è intero, le funzioni $J_\nu(x)$ e $J_{-\nu}(x)$ sono linearmente indipendenti. Ciò segue dalla (II.35) in virtù del fatto che

$$\boxed{J_\nu(x) = \frac{x^\nu}{2^\nu \Gamma(\nu+1)} [1 + O(x^2)], \quad x \rightarrow 0; \quad \nu \neq -1, -2, -3, \dots,} \quad (\text{III.39})$$

poichè $\Gamma(\nu+1)$ è finito. Se, invece, $\nu = n$ è intero, si utilizzi il fatto che $\Gamma(-k)$ è infinito per $k = 0, 1, 2, \dots$ [vedi l'Appendice A] e quindi la sommatoria nella serie (II.35) per $J_{-n}(x)$ inizia a $k = n$. Quindi per $n = 0, 1, 2, \dots$ si ha

$$\begin{aligned} J_{-n}(x) &= \sum_{k=n}^{\infty} \frac{(-1)^k}{\Gamma(k+n+1)\Gamma(k+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k-n} \\ &\stackrel{l=k-n}{=} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{(-1)^{l+n}}{\Gamma(l+1)\Gamma(l+n+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2l+n} = (-1)^n J_n(x). \end{aligned}$$

Dunque le funzioni $J_n(x)$ e $J_{-n}(x)$ sono linearmente dipendenti:

$$\boxed{J_{-n}(x) = (-1)^n J_n(x).} \quad (\text{III.40})$$

Sono valide le seguenti relazioni di ricorrenza:

$$\boxed{J'_\nu(x) = J_{\nu-1}(x) - \frac{\nu}{x} J_\nu(x) = -J_{\nu+1}(x) + \frac{\nu}{x} J_\nu(x).} \quad (\text{III.41})$$

Infatti, la prima formula (II.41) segue dalla (II.35):

$$\begin{aligned} &J'_\nu(x) - J_{\nu-1}(x) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{(-1)^k (2k+\nu)}{2\Gamma(k+\nu+1)\Gamma(k+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+\nu-1} - \frac{(-1)^k}{\Gamma(k+\nu)\Gamma(k+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+\nu-1} \right] \\ &= -\frac{\nu}{x} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{\Gamma(k+\nu+1)\Gamma(k+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+\nu} = -\frac{\nu}{x} J_\nu(x). \end{aligned}$$

Nello stesso modo si ottiene

$$\begin{aligned}
& J'_\nu(x) + J_{\nu+1}(x) \\
&= \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{(-1)^k (2k + \nu)}{2\Gamma(k + \nu + 1)\Gamma(k + 1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+\nu-1} + \frac{(-1)^k}{\Gamma(k + \nu)\Gamma(k + 1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+\nu+1} \right] \\
&= \frac{\nu}{2\Gamma(\nu + 1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{\nu-1} \\
&\quad - \sum_{l=0}^{\infty} \left[\frac{(-1)^l (2l + \nu + 2)}{2\Gamma(l + \nu + 2)\Gamma(l + 2)} - \frac{(-1)^l}{\Gamma(l + \nu + 2)\Gamma(l + 1)} \right] \left(\frac{x}{2}\right)^{2l+\nu+1} \\
&= \frac{\nu}{2\Gamma(\nu + 1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{\nu-1} - \frac{\nu}{x} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{(-1)^l}{\Gamma(l + \nu + 2)\Gamma(l + 2)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2l+\nu+1} = \frac{\nu}{x} J_\nu(x).
\end{aligned}$$

Le formule (II.41) si possono riscrivere nella forma

$$\frac{d}{dx} [x^\nu J_\nu(x)] = x^\nu J_{\nu-1}(x), \quad \frac{d}{dx} [x^{-\nu} J_\nu(x)] = -x^{-\nu} J_{\nu+1}(x).$$

In particolare per $\nu = 0$ si trova

$$\boxed{J'_0(x) = -J_1(x)}.$$

Infine, sottraendo le formule (II.41), si ottiene ancora una relazione di ricorrenza:

$$\boxed{J_{\nu+1}(x) - \frac{2\nu}{x} J_\nu(x) + J_{\nu-1}(x) = 0.}$$

4.2 Funzioni di Bessel di seconda specie

Il Wronskiano $W[u, v] = uv' - u'v$ di due soluzioni u e v dell'equazione di Bessel soddisfa all'equazione differenziale di primo ordine

$$W'[u, v](x) + \frac{1}{x} W[u, v](x) = 0,$$

e quindi $W[u, v](x)$ è proporzionale alla funzione $1/x$. Per trovare la costante di proporzionalità basta studiare l'andamento del Wronskiano se $x \rightarrow 0$. Per $\nu \notin \mathbb{Z}$ si vede subito che

$$\begin{cases} J_\nu(x) = \frac{1}{\Gamma(\nu + 1)} \left(\frac{x}{2}\right)^\nu + O(x^{\nu+2}), \\ xJ'_\nu(x) = \frac{\nu}{\Gamma(\nu + 1)} \left(\frac{x}{2}\right)^\nu + O(x^{\nu+2}), \\ J_{-\nu}(x) = \frac{1}{\Gamma(-\nu + 1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{-\nu} + O(x^{-\nu+2}), \\ xJ'_{-\nu}(x) = \frac{-\nu}{\Gamma(-\nu + 1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{-\nu} + O(x^{-\nu+2}), \end{cases}$$

e dunque [vedi la (A.10) nell'Appendice A]

$$\begin{aligned} W[J_\nu, J_{-\nu}](x) &= \frac{-2\nu}{x\Gamma(\nu+1)\Gamma(-\nu+1)} + \underbrace{O(x)}_{=0} \\ &= \frac{-2\nu}{x\Gamma(\nu+1)\Gamma(-\nu+1)} = \frac{-2 \sin(\nu\pi)}{\pi x}. \end{aligned}$$

Quindi $J_\nu(x)$ e $J_{-\nu}(x)$ sono linearmente indipendenti [cioè, il Wronskiano non si annulla per $x \neq 0$] se e solo se ν non è un intero. Se $\nu \in \mathbb{Z}$, risulta $J_{-\nu}(x) = (-1)^\nu J_\nu(x)$.

Per $\nu = n$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) esiste una soluzione dell'equazione di Bessel linearmente indipendente della $J_n(x)$. Per trovarla definiamo la *funzione di Bessel di seconda specie*

$$Y_\nu(x) = \frac{J_\nu(x) \cos(\nu\pi) - J_{-\nu}(x)}{\sin(\nu\pi)}$$

per $\nu \notin \mathbb{Z}$. Siccome sia il numeratore che il denominatore sono funzioni analitiche di $\nu \in \mathbb{C}$ e $(d/d\nu) \sin(\nu\pi) = \pi \cos(\nu\pi) \neq 0$ per $\nu = 0, 1, 2, \dots$, il limite di $Y_\nu(x)$ per $\nu \rightarrow n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$ esiste ed è uguale all'espressione

$$Y_n(x) = \frac{1}{\pi} \left[\frac{\partial J_\nu(x)}{\partial \nu} \right]_{\nu=n} - (-1)^n \left[\frac{\partial J_{-\nu}(x)}{\partial \nu} \right]_{\nu=n}.$$

Calcolando la derivata della serie di potenza per $J_\nu(x)$ rispetto a ν ed introducendo la funzione $\psi(z) = \Gamma'(z)/\Gamma(z)$ otteniamo per $x \geq 0$

$$\begin{aligned} Y_0(x) &= \frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (x/2)^{2k}}{(k!)^2} \left[\log \frac{x}{2} - \psi(k+1) \right] \\ &= \frac{2}{\pi} J_0(x) \log \frac{x}{2} - \frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (x/2)^{2k}}{(k!)^2} \psi(k+1), \\ Y_n(x) &= -\frac{1}{\pi} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(n-k-1)!}{k!} \left(\frac{x}{2} \right)^{2k-n} \\ &\quad + \frac{1}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (x/2)^{n+2k}}{k!(n+k)!} \left[2 \log \frac{x}{2} - \psi(k+1) - \psi(k+n+1) \right] \\ &= \frac{2}{\pi} J_n(x) \log \frac{x}{2} - \frac{1}{\pi} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(n-k-1)!}{k!} \left(\frac{x}{2} \right)^{2k-n} \\ &\quad - \frac{1}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (x/2)^{n+2k}}{k!(n+k)!} [\psi(k+1) + \psi(k+n+1)]. \end{aligned}$$

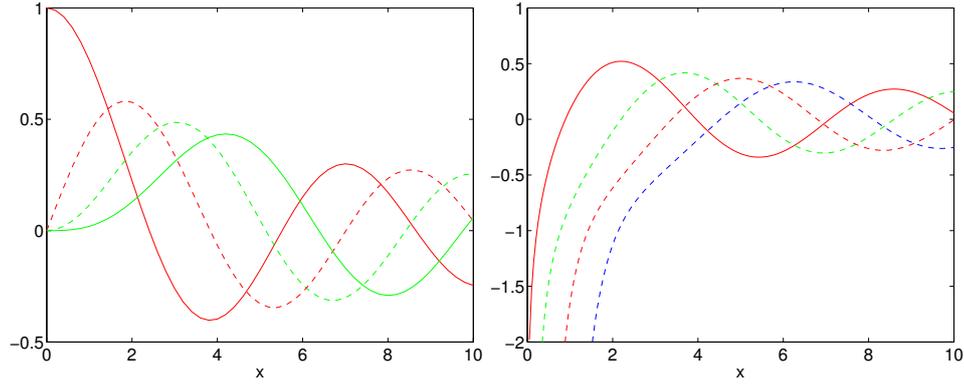


Figura III.1: Pannello sinistro: le funzioni di Bessel $J_\nu(x)$, $\nu = 0, 1, 2, 3$.
Pannello destro: le funzioni di Neumann $Y_\nu(x)$, $\nu = 0, 1, 2, 3$.

Quest'espressione conduce alle rappresentazioni asintotiche per $x \rightarrow 0^+$

$$Y_n(x) \sim \begin{cases} \frac{2}{\pi} \log \frac{x}{2}, & n = 0 \\ -\frac{(n-1)!}{\pi} \left(\frac{x}{2}\right)^{-n}, & n = 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (\text{III.42})$$

implicando che $|Y_n(x)| \rightarrow +\infty$ se $x \rightarrow 0$.

Per ragioni di linearità le funzioni di Bessel di seconda specie soddisfano alle stesse formule di ricorrenza di quelle di prima specie. In particolare

$$Y'_\nu(x) = Y_{\nu-1}(x) - \frac{\nu}{x} Y_\nu(x) = -Y_{\nu+1}(x) + \frac{\nu}{x} Y_\nu(x);$$

$$\frac{d}{dx} [x^\nu Y_\nu(x)] = x^\nu Y_{\nu-1}(x), \quad \frac{d}{dx} [x^{-\nu} Y_\nu(x)] = -x^{-\nu} Y_{\nu+1}(x);$$

$$Y'_0(x) = -Y_1(x); \quad Y_{\nu+1}(x) - \frac{2\nu}{x} Y_\nu(x) + Y_{\nu-1}(x) = 0.$$

4.3 Ortogonalità e zeri

La seguente proposizione ci importa nei casi $\alpha = 1$ e $\beta = 0$ (cercando gli zeri) e $\alpha = 0$ e $\beta = 1$ (cercando i valori estremi).

Proposizione III.4 Per $\alpha, \beta \geq 0$ con $\alpha + \beta > 0$, siano μ_1 e μ_2 zeri reali dell'equazione

$$\alpha J_\nu(\mu) + \beta \mu J'_\nu(\mu) = 0, \quad (\text{III.43})$$

dove $\nu > -1$. Allora

$$\int_0^1 x J_\nu(\mu_1 x) J_\nu(\mu_2 x) dx = \begin{cases} 0, & \mu_1^2 \neq \mu_2^2, \\ \frac{1}{2} [J'_\nu(\mu_1)]^2 + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\nu^2}{\mu_1^2}\right) J_\nu(\mu_1)^2, & \mu_1 = \mu_2, \\ -\frac{1}{2} J'_\nu(\mu_1) J'_\nu(-\mu_1) + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\nu^2}{\mu_1^2}\right) J_\nu(\mu_1) J_\nu(-\mu_1), & \mu_1 = -\mu_2. \end{cases} \quad (\text{III.44})$$

Dimostrazione. Siano $\mu_1, \mu_2 \in \mathbb{R}$. In virtù della (II.34), le funzioni $J_\nu(\mu_1 x)$ e $J_\nu(\mu_2 x)$ soddisfano le equazioni

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \left[x \frac{dJ_\nu(\mu_1 x)}{dx} \right] + \left(\mu_1^2 x - \frac{\nu^2}{x} \right) J_\nu(\mu_1 x) &= 0, \\ \frac{d}{dx} \left[x \frac{dJ_\nu(\mu_2 x)}{dx} \right] + \left(\mu_2^2 x - \frac{\nu^2}{x} \right) J_\nu(\mu_2 x) &= 0. \end{aligned}$$

Moltiplichiamo la prima per $J_\nu(\mu_2 x)$ e la seconda per $J_\nu(\mu_1 x)$, poi sottraiamo termine a termine la prima dalla seconda ed integriamo da 0 a 1. Si ottiene

$$\begin{aligned} & (\mu_2^2 - \mu_1^2) \int_0^1 x J_\nu(\mu_1 x) J_\nu(\mu_2 x) dx \\ &= \int_0^1 \left[J_\nu(\mu_2 x) \frac{d}{dx} \left(x \frac{dJ_\nu(\mu_1 x)}{dx} \right) - J_\nu(\mu_1 x) \frac{d}{dx} \left(x \frac{dJ_\nu(\mu_2 x)}{dx} \right) \right] dx \\ &= [\mu_1 x J_\nu(\mu_2 x) J'_\nu(\mu_1 x) - \mu_2 x J_\nu(\mu_1 x) J'_\nu(\mu_2 x)]_{x=0}^1. \end{aligned} \quad (\text{III.45})$$

Dalla (II.35) [vedi anche la (II.39)] abbiamo per $x \rightarrow 0^+$

$$J_\nu(\mu x) = \frac{1}{\Gamma(\nu + 1)} \left(\frac{\mu x}{2} \right)^\nu + O(x^{\nu+2}), \quad \mu x J'_\nu(\mu x) = \frac{\nu}{\Gamma(\nu + 1)} \left(\frac{\mu x}{2} \right)^\nu + O(x^{\nu+2}),$$

e perciò

$$\mu_1 x J_\nu(\mu_2 x) J'_\nu(\mu_1 x) - \mu_2 x J_\nu(\mu_1 x) J'_\nu(\mu_2 x) = O(x^{2\nu+2}), \quad x \rightarrow 0^+.$$

Quindi, grazie alla condizione $\nu > -1$, il primo membro della (II.45) si annulla per $x = 0$ e si ottiene

$$\int_0^1 x J_\nu(\mu_1 x) J_\nu(\mu_2 x) dx = \frac{\mu_1 J_\nu(\mu_2) J'_\nu(\mu_1) - \mu_2 J_\nu(\mu_1) J'_\nu(\mu_2)}{\mu_2^2 - \mu_1^2}. \quad (\text{III.46})$$

Se μ_1 e μ_2 sono zeri reali dell'equazione (II.43) dove $\alpha, \beta \geq 0$ e $\alpha + \beta > 0$, il determinante del sistema lineare

$$\alpha J_\nu(\mu_1) + \beta \mu_1 J'_\nu(\mu_1) = 0, \quad \alpha J_\nu(\mu_2) + \beta \mu_2 J'_\nu(\mu_2) = 0,$$

per (α, β) si annulla, cioè il numeratore della frazione nella (II.46) si annulla. Di conseguenza, se $\mu_1^2 \neq \mu_2^2$, segue la proprietà di ortogonalità (cioè, si annulla la parte a sinistra della (II.46)).

Per dimostrare la (II.44) se $\mu_1 = \mu_2$, si passi al limite per $\mu_2 \rightarrow \mu_1$ nella (II.46) utilizzando la regola di De L'Hôpital:

$$\begin{aligned} \int_0^1 x J_\nu(\mu_1 x)^2 dx &= \lim_{\mu_2 \rightarrow \mu_1} \frac{\mu_1 J_\nu(\mu_2) J'_\nu(\mu_1) - \mu_2 J_\nu(\mu_1) J'_\nu(\mu_2)}{\mu_2^2 - \mu_1^2} \\ &= \frac{1}{2} [J'_\nu(\mu_1)]^2 - \frac{1}{2\mu_1} J_\nu(\mu_1) [J'_\nu(\mu_1) + \mu_1 J''_\nu(\mu_1)] \\ &= \frac{1}{2} [J'_\nu(\mu_1)]^2 + \frac{1}{2} J_\nu(\mu_1)^2 \left(1 - \frac{\nu^2}{\mu_1^2}\right). \end{aligned}$$

Abbiamo dimostrato la (II.44) per $\mu_1 = \mu_2$. La dimostrazione per $\mu_1 = -\mu_2$ è analoga. \square

Dimostriamo ora le seguenti proprietà degli zeri dell'equazione (II.43) per $\nu > -1$. Per $\beta = 0$ quest'equazione definisce gli zeri delle funzioni di Bessel.

Teorema III.5 *Gli zeri dell'equazione (II.43) per $\nu > -1$ sono reali, semplici, ad eccezione, forse, dello 0; questi zeri sono simmetricamente disposte rispetto all'origine e non hanno punti di accumulazione.*

Dimostrazione. Dalla (II.35), in virtù del fatto che α, β e $\Gamma(\xi)$ sono reali, per ξ reali, si ottiene $J_\nu(x) = \overline{J_\nu(\bar{x})}$. Quindi

$$\overline{\alpha J_\nu(\bar{\mu}) + \beta \bar{\mu} J'_\nu(\bar{\mu})} = \alpha J_\nu(\mu) + \beta \mu J'_\nu(\mu).$$

Per questa ragione, se μ è uno zero dell'equazione (II.43), $\bar{\mu}$ è anche esso uno suo zero. Se $\mu^2 \neq \bar{\mu}^2$, applicando la formula (II.44) per $\mu_1 = \mu$ e $\mu_2 = \bar{\mu}$, si arriva ad una contraddizione:

$$0 = \int_0^1 x J_\nu(\mu x) J_\nu(\bar{\mu} x) dx = \int_0^1 x |J_\nu(\mu x)|^2 dx.$$

Ciò significa che $\mu^2 = \bar{\mu}^2$, cioè μ è un numero reale o immaginario. Ma quest'ultimo caso non ha luogo, poichè, in virtù della (II.35) e del fatto che $\Gamma(\xi) > 0$ per $\xi > 0$, si ha per $0 \neq a \in \mathbb{R}$

$$\alpha J_\nu(ia) + i \beta a J'_\nu(ia) = \left(\frac{ia}{2}\right)^\nu \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\alpha + \beta(2k + \nu)}{\Gamma(k + \nu + 1)\Gamma(k + 1)} \left(\frac{a}{2}\right)^{2k} \neq 0.$$

Siccome $\mu^{-\nu} [\alpha J_\nu(\mu) + \beta \mu J'_\nu(\mu)]$ è una funzione analitica di μ in tutto il piano complesso, i suoi zeri non si possono accumulare ad un punto finito.

Dimostriamo ora la semplicità degli zeri. Sia $\mu_0 > 0$ uno zero della (II.43) di molteplicità 2, in modo che

$$\begin{cases} \alpha J_\nu(\mu_0) + \beta \mu_0 J'_\nu(\mu_0) = 0, \\ \alpha J'_\nu(\mu_0) + \beta J'_\nu(\mu_0) + \beta \mu_0 J''_\nu(\mu_0) = -\beta \left(\mu_0 - \frac{\nu^2}{\mu_0} \right) J_\nu(\mu_0) + \alpha J'_\nu(\mu_0) = 0, \end{cases} \quad (\text{III.47})$$

in virtù dell'equazione (II.34). Dalla (II.47) [che è un sistema di equazioni lineari per $J_\nu(\mu_0)$ e $J'_\nu(\mu_0)$] concludiamo che a) $J_\nu(\mu_0) = J'_\nu(\mu_0) = 0$, oppure b) $\alpha^2 + \beta^2(\mu_0^2 - \nu^2) = 0$. Il caso a) è impossibile grazie al teorema sull'unicità della soluzione della (II.34), poichè $\mu_0 > 0$ non è un punto singolare dell'equazione (II.34). Dimostriamo che è anche impossibile il caso b). Per realizzare il caso b) ci vuole $\beta > 0$ e $(\alpha/\beta) = \sqrt{\nu^2 - \mu_0^2}$, dove $0 < \mu_0 \leq |\nu|$. Sostituendo quest'equazione nella (II.47) si ottiene

$$[J'_\nu(\mu_0)]^2 = \left(\frac{\nu^2}{\mu_0^2} - 1 \right) J_\nu(\mu_0)^2,$$

il che, in virtù della (II.44), porta all'uguaglianza contraddittoria

$$\int_0^1 x J_\nu(\mu_0 x)^2 dx = \frac{1}{2} \left\{ [J'_\nu(\mu_0)]^2 + \left(1 - \frac{\nu^2}{\mu_0^2} \right) J_\nu(\mu_0)^2 \right\} = 0.$$

Il teorema è stato dimostrato. \square

In base al teorema dimostrato si possono numerare gli zeri dell'equazione (II.43), disponendole in ordine crescente:

$$\boxed{0 < \mu_1^{(\nu)} < \mu_2^{(\nu)} < \mu_3^{(\nu)} < \dots}$$

Se $\nu > 0$, $J_\nu(x)$ si annulla per $x = 0$.

Abbiamo la seguente espressione asintotica per la funzione $J_\nu(x)$:³

$$\boxed{J_\nu(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \cos \left(x - \frac{\pi}{2} \nu - \frac{\pi}{4} \right) + O(x^{-3/2}), \quad x \rightarrow +\infty.} \quad (\text{III.48})$$

Ne segue la formula approssimativa per gli zeri di $J_\nu(x)$:

$$\mu_k^{(\nu)} \approx \frac{3\pi}{4} + \frac{\pi}{2} \nu + k\pi, \quad k \rightarrow +\infty.$$

La dimostrazione della formula asintotica (II.48) si trova nell'Appendice C.

³Vedi l'Appendice C per le dimostrazioni.

4.4 Altre funzioni cilindriche

Insieme con le funzioni di Bessel $J_\nu(x)$, sono importanti per le applicazioni altri tipi di funzioni cilindriche. Queste funzioni sono le seguenti:

1. *Le funzioni di Neumann o le funzioni di Bessel di seconda specie*

$$Y_\nu(x) = \begin{cases} \frac{J_\nu(x) \cos(\nu\pi) - J_{-\nu}(x)}{\sin(\nu\pi)}, & \nu \notin \mathbb{Z} \\ \frac{1}{\pi} \left[\frac{\partial J_\nu(x)}{\partial \nu} - (-1)^n \frac{\partial J_{-\nu}(x)}{\partial \nu} \right]_{\nu=n}, & \nu = n = 0, 1, 2, \dots \\ (-1)^n Y_n(-x), & \nu = -n = -1, -2, \dots \end{cases}$$

Spesso si vede la notazione $N_\nu(x)$ invece di $Y_\nu(x)$.

2. *Le funzioni di Hankel di prima specie*

$$\boxed{H_\nu^{(1)}(x) = J_\nu(x) + i Y_\nu(x)} \quad (\text{III.49})$$

e le funzioni di Hankel di seconda specie

$$\boxed{H_\nu^{(2)}(x) = J_\nu(x) - i Y_\nu(x)}. \quad (\text{III.50})$$

3. *Le funzioni di Bessel di argomento immaginario*

$$\boxed{I_\nu(x) = e^{-\nu\pi i/2} J_\nu(ix),} \quad \boxed{K_\nu(x) = \frac{\pi i}{2} e^{\pi\nu i/2} H_\nu^{(1)}(ix)}. \quad (\text{III.51})$$

Le funzioni $I_\nu(x)$ si chiamano funzioni di Bessel modificate di prima specie (modified Bessel functions of the first kind), mentre le funzioni $K_\nu(x)$ si chiamano funzioni di MacDonald.⁴

Utilizzando l'espressione asintotica (II.48) per $J_\nu(x)$, si ha per $x \rightarrow +\infty$

$$H_\nu^{(1)}(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} e^{i\left(x - \frac{\pi}{2}\nu - \frac{\pi}{4}\right)} + O(x^{-3/2}), \quad (\text{III.52})$$

$$H_\nu^{(2)}(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} e^{-i\left(x - \frac{\pi}{2}\nu - \frac{\pi}{4}\right)} + O(x^{-3/2}), \quad (\text{III.53})$$

$$Y_\nu(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \sin\left(x - \frac{\pi}{2}\nu - \frac{\pi}{4}\right) + O(x^{-3/2}), \quad (\text{III.54})$$

$$I_\nu(x) = \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}} [1 + O(x^{-1})], \quad (\text{III.55})$$

$$K_\nu(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2x}} e^{-x} [1 + O(x^{-1})]. \quad (\text{III.56})$$

⁴Nella letteratura ci sono diversi nomi e notazioni per queste funzioni. In particolare, in [22] si utilizza una definizione diversa della nostra.

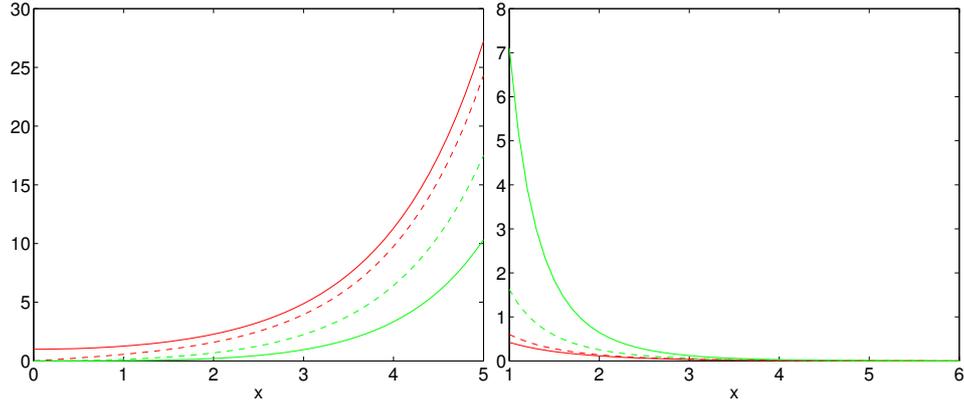


Figura III.2: Pannello sinistro: le funzioni di Bessel immaginarie $I_\nu(x)$ per $\nu = 0, 1, 2, 3$. Pannello destro: le funzioni di MacDonald $K_\nu(x)$ per $\nu = 0, 1, 2, 3$.

Le dimostrazioni delle formule asintotiche (II.52)-(II.56) si trovano nell'Appendice C. Analogamente, utilizzando la (II.39), si ottiene per $x \rightarrow 0^+$

$$\begin{cases} H_0^{(1)}(x) \approx -\frac{2i}{\pi} \ln \frac{1}{x}, & H_0^{(2)}(x) \approx \frac{2i}{\pi} \ln \frac{1}{x}, \\ Y_0(x) \approx -\frac{2}{\pi} \ln \frac{1}{x}, & K_0(x) \approx \ln \frac{1}{x}. \end{cases}$$

Calcoliamo ora

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{2} (I_{-\nu}(z) - I_\nu(z)) &= \frac{\pi}{2} (e^{\nu\pi i/2} J_{-\nu}(iz) - e^{-\nu\pi i/2} J_\nu(iz)) \\ &= \frac{\pi}{2} e^{\nu\pi i/2} (J_{-\nu}(iz) - e^{-\nu\pi i} J_\nu(iz)) \\ &= \frac{\pi}{2} e^{\nu\pi i/2} (-[J_\nu(iz) \cos(\nu\pi) - J_{-\nu}(iz)] + i \sin(\nu\pi) J_\nu(iz)) \\ &= \frac{\pi}{2} e^{\nu\pi i/2} \sin(\nu\pi) (J_\nu(iz) + iY_\nu(iz)) \\ &= \frac{\pi i}{2} e^{\nu\pi i/2} H_\nu^{(1)}(iz) \sin(\nu\pi) = K_\nu(z) \sin(\nu\pi), \end{aligned}$$

implicando che⁵

$$K_\nu(z) = \frac{\pi}{2} \frac{I_{-\nu}(z) - I_\nu(z)}{\sin(\nu\pi)}.$$

⁵In [22, Sec. 17.71] la funzione di MacDonald $K_\nu(z)$ viene definita in modo diverso: $K_\nu(z) = \frac{\pi}{2} (I_{-\nu}(z) - I_\nu(z)) \cot(\nu\pi)$.

Per $\nu = n \in \mathbb{Z}$ bisogna calcolare il limite se $\nu \rightarrow n$.

Troviamo ora le equazioni differenziali per le funzioni $I_\nu(x)$ e $K_\nu(x)$. Sostituendo $x \mapsto ix$ nella (II.34), otteniamo l'equazione differenziale

$$\boxed{x^2 u'' + xu' - (x^2 + \nu^2)u = 0.} \quad (\text{III.57})$$

Dal Teorema II.5 segue che per $\nu > -1$ le funzioni di Bessel immaginarie $I_\nu(x)$ e le loro derivate prime non hanno zeri reali (con l'eccezione di $x = 0$ se $\nu > 0$).

4.5 Funzioni sferiche di Bessel

Le funzioni di Bessel $J_{\pm(l+\frac{1}{2})}(x)$, dove $l = 0, 1, 2, \dots$, appaiono nello studio dello scattering quantistico e dello scattering della luce. Per questo motivo vengono introdotte le seguenti funzioni:

$$j_l(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2z}} J_{l+\frac{1}{2}}(z), \quad (\text{III.58})$$

$$y_l(z) = (-1)^{l+1} n_l(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2z}} Y_{l+\frac{1}{2}}(z), \quad (\text{III.59})$$

$$h_l^{(1)}(z) = j_l(z) + iy_l(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2z}} H_{l+\frac{1}{2}}^{(1)}(z), \quad (\text{III.60})$$

$$h_l^{(2)}(z) = j_l(z) - iy_l(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2z}} H_{l+\frac{1}{2}}^{(2)}(z). \quad (\text{III.61})$$

Le funzioni $j_l(z)$, $y_l(z) = (-1)^{l+1} n_l(z)$ e $h_l^{(1,2)}(z)$ si dicono *funzioni sferiche di Bessel* di prima, seconda e terza specie. Quindi

$$\begin{aligned} j_0(z) &= \frac{\sin(z)}{z}, \\ j_1(z) &= \frac{\sin(z)}{z^2} - \frac{\cos(z)}{z}, \\ j_2(z) &= \left(\frac{3}{z^3} - \frac{1}{z} \right) \sin(z) - \frac{3}{z^2} \cos(z), \\ y_0(z) &= -n_0(z) = -\frac{\cos(z)}{z}, \\ y_1(z) &= n_1(z) = -\frac{\cos(z)}{z^2} - \frac{\sin(z)}{z}, \\ y_2(z) &= -n_2(z) = \left(-\frac{3}{z^3} + \frac{1}{z} \right) \cos(z) - \frac{3}{z^2} \sin(z). \end{aligned}$$

Si vede facilmente che

$$y_l(z) = (-1)^{l+1} n_l(z) = (-1)^{l+1} j_{-l-1}(z). \quad (\text{III.62})$$

È anche abbastanza facile trovare le seguenti espressioni esplicite:

$$j_l(z) = z^l \left(-\frac{1}{z} \frac{d}{dz} \right)^l \frac{\sin(z)}{z}, \quad y_l(z) = (-1)^{l+1} n_l(z) = -z^l \left(-\frac{1}{z} \frac{d}{dz} \right)^l \frac{\cos(z)}{z}. \quad (\text{III.63})$$

Asintoticamente (se $x \rightarrow +\infty$) abbiamo le seguenti espressioni:

$$j_l(x) \simeq \begin{cases} (-1)^{l/2} \frac{\sin(x)}{x}, & l \text{ pari,} \\ (-1)^{\frac{l+1}{2}} \frac{\cos(x)}{x}, & l \text{ dispari,} \end{cases} \quad (\text{III.64})$$

$$y_l(x) = (-1)^{l+1} n_l(z) \simeq \begin{cases} (-1)^{(l+2)/2} \frac{\cos(x)}{x}, & l \text{ pari,} \\ (-1)^{\frac{l+1}{2}} \frac{\sin(x)}{x}, & l \text{ dispari,} \end{cases} \quad (\text{III.65})$$

$$h_l^{(1)}(x) \simeq \begin{cases} -i(-1)^{l/2} \frac{e^{ix}}{x}, & l \text{ pari,} \\ (-1)^{\frac{l+1}{2}} \frac{e^{ix}}{x}, & l \text{ dispari,} \end{cases} \quad (\text{III.66})$$

$$h_l^{(2)}(x) \simeq \begin{cases} i(-1)^{l/2} \frac{e^{-ix}}{x}, & l \text{ pari,} \\ (-1)^{\frac{l+1}{2}} \frac{e^{-ix}}{x}, & l \text{ dispari.} \end{cases} \quad (\text{III.67})$$

Sostituendo $y = \sqrt{x} Y$ nell'equazione di Bessel di ordine $\nu = l + \frac{1}{2}$ si arriva all'equazione differenziale

$$\boxed{Y'' + \frac{2}{x} Y' + \left(1 - \frac{l(l+1)}{x^2} \right) Y = 0} \quad (\text{III.68})$$

per le funzioni $j_l, y_l = (-1)^{l+1} n_l, h_l^{(1)}$ e $h_l^{(2)}$. Ponendo $Y = Z/x$ si ha inoltre

$$Z'' + \left(1 - \frac{l(l+1)}{x^2} \right) Z = 0 \quad (\text{III.69})$$

per le funzioni $xj_l(x), xy_l(x) = (-1)^{l+1} xn_l(x), xh_l^{(1)}(x)$ e $xh_l^{(2)}(x)$.

5 Funzioni sferiche

Consideriamo adesso una classe di funzioni speciali molto importante per la fisica matematica.

5.1 Funzioni sferiche

Si dice *funzione sferica* di ordine $l = 0, 1, 2, \dots$ ogni polinomio armonico⁶ omogeneo di grado l considerato sulla sfera unitaria $S^{n-1} \subset \mathbb{R}^n$. Dunque, tra le funzioni sferiche $Y_l(s)$, $s \in S^{n-1}$, di ordine l ed i polinomi armonici omogenei $u_l(x)$, $x \in \mathbb{R}^n$, stabilisce una corrispondenza biunivoca l'identità

$$Y_l(s) = u_l\left(\frac{x}{|x|}\right) = \frac{u_l(x)}{|x|^l}, \quad s = \frac{x}{|x|}, \quad (\text{III.70})$$

dove $\Delta u_l = 0$.

Le funzioni sferiche Y_l e $Y_{l'}$, di ordini diversi sono ortogonali in $L^2(S^{n-1})$, cioè

$$(Y_l, Y_{l'}) = \int_{S^{n-1}} Y_l(s) Y_{l'}(s) ds = 0, \quad l \neq l'.$$

Infatti, applicando per la sfera la formula di Green (V.16) ai polinomi armonici

$$u_l(x) = |x|^l Y_l\left(\frac{x}{|x|}\right), \quad u_{l'}(x) = |x|^{l'} Y_{l'}\left(\frac{x}{|x|}\right),$$

si ottiene

$$\begin{aligned} 0 &= \int_{\mathbb{R}^n} \left[|x|^{l'} Y_{l'} \Delta(|x|^l Y_l) - |x|^l Y_l \Delta(|x|^{l'} Y_{l'}) \right] dx \\ &= \int_{S^{n-1}} \left[|x|^{l'} Y_{l'} \frac{\partial(|x|^l Y_l)}{\partial n} - |x|^l Y_l \frac{\partial(|x|^{l'} Y_{l'})}{\partial n} \right] ds \\ &= \int_{S^{n-1}} \left[Y_{l'} \frac{\partial(r^l Y_l)}{\partial r} - Y_l \frac{\partial(r^{l'} Y_{l'})}{\partial r} \right] ds = (l - l') \int_{S^{n-1}} Y_l(s) Y_{l'}(s) ds, \end{aligned}$$

come volevasi dimostrare.

Consideriamo ora le funzioni sferiche sulla circonferenza S^1 ($n = 2$). In coordinate polari abbiamo

$$u_l(x) = r^l Y_l(\theta), \quad x = (r \cos \theta, r \sin \theta),$$

dove $\Delta u_l = 0$. Risulta l'equazione differenziale

$$Y_l''(\theta) + l^2 Y_l(\theta) = 0,$$

da cui seguono le funzioni trigonometriche

$$Y_l(\theta) = \begin{cases} \text{costante}, & l = 0 \\ c_1 \cos(l\theta) + c_2 \sin(l\theta), & l = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

⁶Una funzione $v = v(x_1, \dots, x_n)$ di classe C^2 si dice *armonica* se $\Delta v = \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 v}{\partial x_j^2} = 0$.

Consideriamo ora le funzioni sferiche sulla sfera S^2 ($n = 3$). In coordinate sferiche abbiamo per $y_l(x) = r^l Y_l(\theta, \varphi)$

$$\frac{1}{\sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{1}{\sin \varphi} \frac{\partial Y_l}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{\sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 Y_l}{\partial \theta^2} + l(l+1)Y_l(\theta, \varphi) = 0, \quad (\text{III.71})$$

dove $\theta \in [0, 2\pi]$, $\varphi \in [0, \pi]$ e $l = 0, 1, 2, \dots$. Cerchiamo le soluzioni della (II.71) in $C^\infty(S^2)$. Introduciamo prima $\xi = \cos \varphi$ e scriviamo (II.71) nella forma

$$\frac{1}{1-\xi^2} \frac{\partial^2 Y_l}{\partial \theta^2} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left((1-\xi^2) \frac{\partial Y_l}{\partial \xi} \right) + l(l+1)Y_l(\theta, \xi) = 0. \quad (\text{III.72})$$

Applicando la separazione delle variabili

$$Y_l(\theta, \varphi) = \mathcal{P}(\xi)\Theta(\theta),$$

otteniamo

$$\Theta(\theta) = \begin{cases} \text{costante}, & m = 0 \\ c_1 \cos m\theta + c_2 \sin m\theta, & m = 1, 2, 3, \dots, \end{cases}$$

dove abbiamo sfruttato la periodicit  della $\Theta(\theta)$: $\Theta(\theta + 2\pi) \equiv \Theta(\theta)$. Dunque $\Theta''(\theta) = -m^2\Theta(\theta)$. Risulta l'equazione differenziale

$$\frac{d}{d\xi} \left((1-\xi^2) \frac{d\mathcal{P}}{d\xi} \right) + \left[l(l+1) - \frac{m^2}{1-\xi^2} \right] \mathcal{P}(\xi) = 0. \quad (\text{III.73})$$

Quest'equazione si pu  scrivere nella forma

$$- [(1-\xi^2)\mathcal{P}']' + \frac{m^2}{1-\xi^2}\mathcal{P} = l(l+1)\mathcal{P}.$$

Le soluzioni di quest'equazione nei punti ± 1 debbono assumere valori finiti.

5.2 Polinomi di Legendre

I polinomi di Legendre $P_l(\xi)$ si possono definire nei seguenti modi:

1. tramite la formula generatrice

$$\frac{1}{\sqrt{1-2\xi h+h^2}} = \sum_{l=0}^{\infty} P_l(\xi)h^l, \quad |h| < 1,$$

2. tramite l'equazione differenziale,

$$\boxed{-[(1-x^2)P_l']'(x) = l(l+1)P_l(x)}, \quad -1 < x < +1; \quad \boxed{P_l(1) = 1},$$

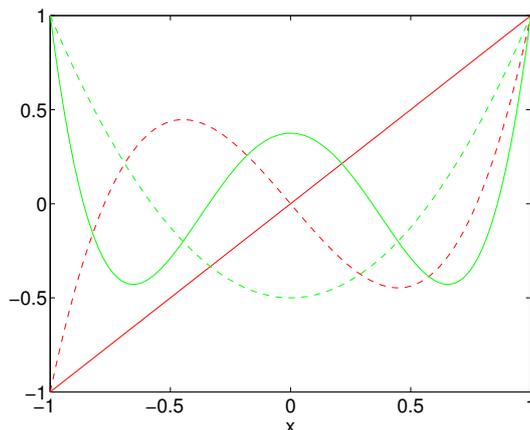


Figura III.3: I polinomi di Legendre di grado 1, 2, 3 e 4. Si osservi che il numero degli zeri è uguale al grado del polinomio.

3. tramite l'ortogonalità: $P_l(\xi)$ sono i polinomi in ξ di grado l con coefficiente principale positivo tali che

$$\int_{-1}^1 P_l(\xi)P_{l'}(\xi) d\xi = \delta_{ll'} \frac{2}{2l+1},$$

4. tramite la formula di Rodrigues

$$P_l(\xi) = \frac{1}{2^l l!} \left(\frac{d}{d\xi} \right)^l (\xi^2 - 1)^l,$$

5. tramite la formula di ricorrenza

$$(2l+1)\xi P_l(\xi) = (l+1)P_{l+1}(\xi) + lP_{l-1}(\xi), \quad P_0(\xi) = 1, \quad P_1(\xi) = \xi.$$

Noi dimostriamo l'equivalenza tra queste definizioni.

4 \Rightarrow **2**. Consideriamo l'equazione differenziale

$$-[(1-x^2)u']'(x) = \lambda u(x), \quad -1 < x < +1, \quad (\text{III.74})$$

sotto le condizioni iniziali che i limiti di $u(x)$ per $x \rightarrow \pm 1$ esistano finiti. Questo problema al contorno ha soluzioni polinomiali per $\lambda = l(l+1)$ dove $l = 0, 1, 2, \dots$. Verifichiamo se i polinomi

$$P_l(x) = \frac{1}{2^l l!} \left(\frac{d}{dx} \right)^l (x^2 - 1)^l, \quad l = 0, 1, 2, \dots, \quad (\text{III.75})$$

soddisfano la (II.74) per $\lambda = l(l+1)$. Questi polinomi (di grado l) sono detti *polinomi di Legendre* e la (II.75) si dice *formula di Rodrigues*. Infatti,⁷ ponendo $W_l(x) = (x^2 - 1)^l$ e derivando l'identità

$$(x^2 - 1)W_l'(x) - 2lxW_l(x) = 0$$

$l+1$ volte, si ottiene

$$(x^2 - 1)W_l^{(l+2)}(x) + 2xW_l^{(l+1)}(x) - l(l+1)W_l^{(l)}(x) = 0.$$

Dunque la funzione $W_l^{(l)}(x) = 2^l(l!)P_l(x)$ soddisfa l'equazione (II.74). Inoltre,

$$\begin{aligned} P_l(x) &= \frac{1}{2^l l!} \sum_{s=0}^l \binom{l}{s} \left(\left(\frac{d}{dx} \right)^s (x-1)^l \right) \left(\left(\frac{d}{dx} \right)^{l-s} (x+1)^l \right) \\ &= \frac{1}{2^l l!} \sum_{s=0}^l \left(\frac{l!}{(l-s)!} (x-1)^{l-s} \right) \left(\frac{l!}{s!} (x+1)^s \right), \end{aligned}$$

il quale implica che $P_l(1) = 1$ e $P_l(-1) = (-1)^l$.

2 \Rightarrow **4**. Sostituendo $u(x) = P_l(x)z(x)$ e $w(x) = z'(x)$ nella (II.74) con $\lambda = l(l+1)$, otteniamo l'equazione separabile

$$\frac{w'(x)}{w(x)} = -2 \frac{P_l'(x)}{P_l(x)} + \frac{2x}{1-x^2},$$

implicando che

$$y(x) = c_1 P_l(x) + c_2 P_l(x) \int_0^x \frac{dt}{(1-t^2)P_l(t)^2}.$$

L'integrale nell'ultima espressione è divergente in $x = \pm 1$ (poichè $P_l(\pm 1)^2 = 1$). Quindi $P_l(x)$ è l'unica soluzione dell'equazione differenziale (II.74) con $\lambda = l(l+1)$ che soddisfa $P_l(1) = 1$. Siccome la formula di Rodrigues rappresenta una tale soluzione, si ottiene questa formula dalla proprietà 2.

(2 + 4) \Rightarrow 3. Si dimostra facilmente che i polinomi di Legendre sono ortogonali nello spazio $L^2(-1, 1)$. Infatti, utilizzando la (II.74) si ha

$$\begin{aligned} & [l(l+1) - k(k+1)] \int_{-1}^1 P_l(x)P_k(x) dx \\ &= \int_{-1}^1 \left[P_l(k) [(1-x^2)P_k']' - P_k(x) [(1-x^2)P_l']' \right] dx \\ &= - \int_{-1}^1 \left[P_l'(k)(1-x^2)P_k'(x) - P_k'(x)(1-x^2)P_l'(x) \right] dx = 0, \end{aligned}$$

⁷Vale la *formula di Leibnitz* $(fg)^{(m)} = \sum_{j=0}^m \binom{m}{j} f^{(j)}g^{(m-j)}$. Quindi $(xf)^{(m)} = xf^{(m)} + mf^{(m-1)}$ e $((x^2-1)f)^{(m)} = (x^2-1)f^{(m)} + 2mx f^{(m-1)} + m(m-1)f^{(m-2)}$.

dopo un'integrazione per parti. Quindi $(P_l, P_k) = \int_{-1}^1 P_l(x)P_k(x) dx = 0$ se $l \neq k$. Per trovare il fattore di normalizzazione, calcoliamo (P_l, P_l) tramite l integrazioni per parti consecutive. Otteniamo

$$\begin{aligned}
(P_l, P_l) &= \frac{1}{2^l l!} \int_{-1}^1 P_l(x) \left(\frac{d}{dx} \right)^l (x^2 - 1)^l \\
&= \frac{1}{2^l l!} \left\{ \left[P_l(x) \left(\frac{d}{dx} \right)^{l-1} (x^2 - 1)^l \right]_{-1}^1 - \int_{-1}^1 P_l'(x) \left(\frac{d}{dx} \right)^{l-1} (x^2 - 1)^l dx \right\} \\
&= \frac{1}{2^l l!} \left\{ \sum_{k=1}^l \left[(-1)^{k-1} P_l^{(k-1)}(x) \underbrace{\left(\frac{d}{dx} \right)^{l-k} (x^2 - 1)^l}_{\text{contiene il fattore } (x^2-1)^k} \right]_{-1}^1 \right. \\
&\quad \left. + (-1)^l \int_{-1}^1 \underbrace{P_l^{(l)}(x)}_{\text{costante}} (x^2 - 1)^l dx \right\} = \frac{1}{2^l l!} P_l^{(l)} \int_{-1}^1 (1 - x^2)^l dx.
\end{aligned}$$

Inoltre,

$$P_l^{(l)}(x) = \frac{1}{2^l l!} \left(\frac{d}{dx} \right)^{2l} (x^2 - 1)^l = \frac{1}{2^l l!} \left(\frac{d}{dx} \right)^{2l} x^{2l} = \frac{(2l)!}{2^l l!}.$$

Applicando la formula di ricorrenza $(I_{l-1}/I_l) = 1 + (1/2l)$ and $I_0 = 2$ per l'integrale $I_l = \int_{-1}^1 (1 - x^2)^l dx$ per arrivare all'espressione $I_l = 2^{l+1} l! / (2l + 1)!!$ [essendo $(2l + 1)!! \stackrel{\text{def}}{=} 1.3.5. \dots (2l - 1)(2l + 1)$], si ottiene infine

$$(P_l, P_l) = \frac{1}{2^l l!} \frac{(2l)!}{2^l l!} \frac{2^{l+1} l!}{(2l + 1)!!} = \frac{2}{2l + 1}. \quad (\text{III.76})$$

Quindi $\sqrt{l + \frac{1}{2}} P_l(x)$ ha norma 1 in $L^2(-1, 1)$.

(3 + 4) \Rightarrow 5. Per trovare una formula di ricorrenza per i polinomi di Legendre calcoliamo prima il prodotto scalare (P_{l+1}, xP_l) . Infatti, dopo $l + 1$ integrazioni per parti consecutive e utilizzando $(x f)^{(l+1)} = x f^{(l+1)} + (l + 1) f^{(l)}$

si ottiene

$$\begin{aligned}
(P_{l+1}, xP_l) &= \frac{(-1)^{l+1}}{2^{2l+1} \cdot ((l+1)!(l!))} \int_{-1}^1 (x^2 - 1)^{l+1} \times \\
&\times \left[x \left(\frac{d}{dx} \right)^{2l+1} (x^2 - 1)^l + (l+1) \left(\frac{d}{dx} \right)^{2l} (x^2 - 1)^l \right] dx \\
&= \frac{(-1)^{l+1}}{2^{2l+1} \cdot (l!)^2} \int_{-1}^1 (x^2 - 1)^{l+1} \left(\frac{d}{dx} \right)^{2l} (x^2 - 1)^l dx \\
&= \frac{1}{2^{2l+1} \cdot (l!)^2} \int_{-1}^1 (1 - x^2)^{l+1} \left(\frac{d}{dx} \right)^{2l} (x^2 - 1)^l dx \\
&= \frac{(2l)!}{2^{2l+1} \cdot (l!)^2} \frac{2^{l+2} \cdot (l+1)!}{(2l+3)(2l+1) \cdots 3 \cdot 1} = \frac{2(l+1)}{(2l+1)(2l+3)}.
\end{aligned}$$

Siccome i polinomi di Legendre sono ortogonali, essi sono linearmente indipendenti. Dunque

$$(2l+1)xP_l(x) = \sum_{j=0}^{\infty} a_j P_j(x),$$

dove $a_j = 0$ per $j > l+1$ [poichè $xP_l(x)$ ha grado $l+1$]. Risultano $(2l+1)(xP_l, P_j) = (2l+1)(P_l, xP_j) = 0$ per $l < j-1$ [poichè $xP_j(x)$ ha grado $< l$] e $(2l+1)(xP_l, P_l) = 0$ [poichè $xP_l(x)^2$ è una funzione dispari]. Quindi

$$(2l+1)xP_l(x) = a_{l+1}P_{l+1}(x) + a_{l-1}P_{l-1}(x).$$

Infine troviamo

$$\begin{aligned}
(2l+1)(xP_l, P_{l+1}) &= a_{l+1}(P_{l+1}, P_{l+1}) = a_{l+1}(2/(2l+3)); \\
(2l+1)(xP_l, P_{l-1}) &= a_{l-1}(P_{l-1}, P_{l-1}) = a_{l-1}(2/(2l-1)).
\end{aligned}$$

Quindi $a_{l+1} = l+1$ e $a_{l-1} = l$. Risulta la *formula di ricorrenza*

$$(2l+1)xP_l(x) = (l+1)P_{l+1}(x) + lP_{l-1}(x), \quad P_0(x) = 1, \quad P_1(x) = x. \quad (\text{III.77})$$

Per induzione matematica si dimostrano facilmente

$$\begin{aligned}
P_l(1) &= 1, \quad P_l(-1) = (-1)^l, \quad P_l(-x) = (-1)^l P_l(x); \\
-1 &\leq P_l(x) \leq +1, \quad -1 \leq x \leq +1.
\end{aligned} \quad (\text{III.78})$$

5 \Rightarrow **1**. Dimostriamo ora la *formula generatrice*

$$\sum_{l=0}^{\infty} P_l(x)h^l = \frac{1}{\sqrt{1-2xh+h^2}}, \quad |h| < 1. \quad (\text{III.79})$$

Infatti, scriviamo $F(x, h)$ per la parte a sinistra della (II.79). Per $|h| < 1$ è permessa la derivazione termine a termine rispetto ad h , grazie alla (II.78). Si trovano facilmente le seguenti espressioni:

$$\begin{aligned} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1)xP_l(x)h^l &= xF(x, h) + 2xh \sum_{l=0}^{\infty} lP_l(x)h^{l-1} = xF(x, h) + 2xh \frac{\partial F}{\partial h}; \\ \sum_{l=0}^{\infty} (l+1)P_{l+1}(x)h^l &= \sum_{l=1}^{\infty} lP_l(x)h^{l-1} = \sum_{l=0}^{\infty} lP_l(x)h^{l-1} = \frac{\partial F}{\partial h}; \\ \sum_{l=1}^{\infty} lP_{l-1}(x)h^l &= h^2 \sum_{l=1}^{\infty} (l-1)P_{l-1}(x)h^{l-2} + h \sum_{l=1}^{\infty} P_{l-1}(x)h^{l-1} \\ &= h^2 \frac{\partial F}{\partial h} + hF(x, h). \end{aligned}$$

Applicando la (II.77) si ha

$$xF(x, h) = (1 - 2xh + h^2) \frac{\partial F}{\partial h} + hF(x, h),$$

dove $F(x, 0) = P_0(x) = 1$. Oppure:

$$\frac{\partial F / \partial h}{F(x, h)} = \frac{x - h}{1 - 2xh + h^2}, \quad F(x, 0) = 1.$$

La soluzione unica di questo problema di Cauchy è la funzione $F(x, h)$ data dalla parte a destra della (II.79).

1 \Rightarrow **2**. Scrivendo $F(x, h)$ per la parte a destra nella (II.79) risulta (dopo alcuni calcoli)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left((1 - x^2) \frac{\partial F}{\partial x} \right) = -h \left(\frac{\partial}{\partial h} \right)^2 (hF(x, h)).$$

In altre parole,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left((1 - x^2) \frac{\partial}{\partial x} \sum_{l=0}^{\infty} P_l(x)h^l \right) = - \sum_{l=0}^{\infty} l(l+1)P_l(x)h^l.$$

Ciò implica l'equazione differenziale. Infine, sostituendo $x = 1$ nella (II.79) si ha

$$\sum_{l=0}^{\infty} P_l(1)h^l = \frac{1}{\sqrt{(1-h)^2}} = \frac{1}{1-h},$$

implicando $P_l(1) = 1$.

4 \Rightarrow 5. Prima di concludere la discussione dei polinomi di Legendre presentiamo un'altra derivazione della relazione di ricorrenza (II.77) e delle costanti di normalizzazione nella (II.76). Calcoliamo ora

$$\begin{aligned}
2^{n+1}(n+1)! P_{n+1}(x) &= \left(\frac{d}{dx}\right)^{n-1} \frac{d^2}{dx^2} (x^2 - 1)^{n+1} \\
&= 2(n+1) \left(\frac{d}{dx}\right)^{n-1} \frac{d}{dx} \{x(x^2 - 1)^n\} \\
&= 2(n+1) \left(\frac{d}{dx}\right)^{n-1} \{(x^2 - 1)^n + 2nx^2(x^2 - 1)^{n-1}\} \\
&= 2(n+1) \left(\frac{d}{dx}\right)^{n-1} \{(2n+1)(x^2 - 1)^n + 2n(x^2 - 1)^{n-1}\},
\end{aligned}$$

implicando che

$$\begin{aligned}
P_{n+1}(x) &= \frac{2n+1}{2^n n!} \left(\frac{d}{dx}\right)^{n-1} (x^2 - 1)^n + \frac{2n}{2^n n!} \left(\frac{d}{dx}\right)^{n-1} (x^2 - 1)^{n-1} \\
&= \frac{2n+1}{2^n n!} \left(\frac{d}{dx}\right)^{n-1} (x^2 - 1)^n + P_{n-1}(x). \tag{III.80}
\end{aligned}$$

D'altra parte, utilizzando la formula di Leibnitz al terzo passaggio, si ha

$$\begin{aligned}
P_{n+1}(x) &= \frac{1}{2^{n+1}(n+1)!} \left(\frac{d}{dx}\right)^n \frac{d}{dx} (x^2 - 1)^{n+1} \\
&= \frac{2(n+1)}{2^{n+1}(n+1)!} \left(\frac{d}{dx}\right)^n \{x(x^2 - 1)^n\} \\
&= \frac{1}{2^n n!} \left(x \left(\frac{d}{dx}\right)^n (x^2 - 1)^n + n \left(\frac{d}{dx}\right)^{n-1} (x^2 - 1)^n \right) \\
&= xP_n(x) + \frac{1}{2^n(n-1)!} \left(\frac{d}{dx}\right)^{n-1} (x^2 - 1)^n. \tag{III.81}
\end{aligned}$$

5 più ortogonalità \Rightarrow 3. Eliminando la derivata $(n-1)$ -esima dalle identità (II.80) e (II.81) arriviamo alla relazione di ricorrenza (II.77). Sostituendo $n-1$ al posto di n nella (II.77) abbiamo invece

$$(2n-1)xP_{n-1}(x) = nP_n(x) + (n-1)P_{n-1}(x), \tag{III.82}$$

dove $n = 2, 3, 4, \dots$. Prendendo il prodotto scalare nella prima uguaglianza (II.77) e utilizzando l'ortogonalità e la seconda uguaglianza (II.82) otteniamo

$$\begin{aligned}
n(P_{n-1}, P_{n-1}) &= (2n+1)(xP_n, P_{n-1}) = (2n+1)(xP_{n-1}, P_n) \\
&= (2n+1) \frac{n}{2n-1} (P_n, P_n).
\end{aligned}$$

Siccome $(P_0, P_0) = 2$, otteniamo infine la (II.76).

5.3 Funzioni di Legendre associate

Sostituiamo $\mathcal{P}(\xi) = (1 - \xi^2)^{m/2} z(\xi)$ nella (II.73). Risulta

$$\boxed{(1 - \xi^2)z''(\xi) - 2(m+1)\xi z'(\xi) + (l-m)(l+m+1)z(\xi) = 0.} \quad (\text{III.83})$$

Moltiplicando la (II.83) per $(1 - \xi^2)^m$, otteniamo per $\mathcal{P} = \mathcal{P}_l$

$$[(1 - \xi^2)^{m+1}\mathcal{P}'_l]' = -(l-m)(l+m+1)(1 - \xi^2)^m \mathcal{P}_l. \quad (\text{III.84})$$

Per $m = 0$ risulta l'equazione differenziale per il polinomio di Legendre di grado l :

$$(1 - \xi^2)P''_l(\xi) - 2\xi P'_l(\xi) + l(l+1)P_l(\xi) = 0.$$

Calcolando la derivata m -esima $z = P_l^{(m)}$ di quest'equazione otteniamo

$$(1 - \xi^2)z''(\xi) - 2(m+1)z'(\xi) + (l-m)(l+m+1)z(\xi) = 0.$$

Quindi le funzioni $(d/d\xi)^m P_l(\xi)$ sono soluzioni della (II.83). Moltiplicando la (II.84) per $P_{l'}(\xi)$ e la (II.84) con l' invece di l per $P_l(\xi)$ e sottraendo, otteniamo

$$[(l-l')(l+l'+1)](1 - \xi^2)^m \mathcal{P}_l(\xi)\mathcal{P}_{l'}(\xi) = \mathcal{P}_l(\xi) [(1 - \xi^2)^{m+1}\mathcal{P}'_{l'}]' - \mathcal{P}_{l'}(\xi) [(1 - \xi^2)^{m+1}\mathcal{P}'_l]'$$

Integrando quest'equazione tra -1 e $+1$ e applicando l'integrazione per parti risulta

$$[(l-l')(l+l'+1)] \int_{-1}^1 (1 - \xi^2)^m \mathcal{P}_l(\xi)\mathcal{P}_{l'}(\xi) d\xi = 0.$$

Quindi, se $P_l(\xi)$ sono i polinomi di Legendre, i polinomi $(d/d\xi)^m P_{l+m}(\xi)$ ($l = 0, 1, 2, \dots$) costituiscono un sistema di polinomi ortogonali (di grado l) rispetto al peso $w(\xi) = (1 - \xi^2)^m$.

Troviamo ora la costante di normalizzazione. Si ha

$$\begin{aligned} & \boxed{\int_{-1}^1 (1 - \xi^2)^m P_l^{(m)}(\xi) P_{l'}^{(m)}(\xi) d\xi} \\ &= \left[(1 - \xi^2)^m P_l^{(m)}(\xi) P_{l'}^{(m-1)}(\xi) \right]_{-1}^1 - \int_{-1}^1 P_{l'}^{(m-1)}(\xi) \left[(1 - \xi^2)^m P_l^{(m)}(\xi) \right]' d\xi \\ &= (l-m-1)(l+m) \int_{-1}^1 (1 - \xi^2)^{m-1} P_l^{(m-1)}(\xi) P_{l'}^{(m-1)}(\xi) d\xi \\ &= (l+m)(l-m+1)(l+m-1)(l-m+2) \times \\ & \times \int_{-1}^1 (1 - \xi^2)^{m-2} P_l^{(m-2)}(\xi) P_{l'}^{(m-2)}(\xi) d\xi \\ &= \frac{(l+m)!}{(l-m)!} \int_{-1}^1 P_l(\xi) P_{l'}(\xi) d\xi = \boxed{\frac{2}{2l+1} \frac{(l+m)!}{(l-m)!} \delta_{l,l'}}. \end{aligned}$$

Quindi

$$\left(\frac{2(l+m)+1}{2} \frac{l!}{(l+2m)!} \right)^{1/2} \left(\frac{d}{d\xi} \right)^m P_{l+m}(\xi), \quad l = 0, 1, 2, \dots,$$

è il sistema ortonormale dei polinomi rispetto al peso $(1-\xi^2)^m$ [con coefficiente di ξ^l positivo].

5.4 Le funzioni sferiche per $n = 3$: Completezza

Nella letteratura ci sono diverse normalizzazioni delle funzioni sferiche in \mathbb{R}^3 . Qui ne scegliamo una. Poniamo

$$Y_l^m(\varphi, \theta) = \begin{cases} P_l^m(\cos \varphi)(\sin \varphi)^m \cos(m\theta), & m = 0, 1, \dots, l; \\ P_l^{|m|}(\cos \varphi)(\sin \varphi)^{|m|} \sin(|m|\theta), & m = -1, -2, \dots, -l, \end{cases}$$

dove $l = 0, 1, 2, \dots$. Le funzioni sferiche Y_l^m ($m = 0, \pm 1, \dots, \pm l$) di ordine l sono linearmente indipendenti e le loro combinazioni lineari

$$Y_l(s) = \sum_{m=-l}^l a_l^{(m)} Y_l^m(s)$$

a coefficienti arbitrari $a_l^{(m)}$ sono anch'esse funzioni sferiche di ordine l .

Le funzioni sferiche $\{Y_l^m\}$ formano un sistema ortogonale e completo in $L^2(S^2)$, ed inoltre

$$\|Y_l^m\|_{L^2(S^2)}^2 = 2\pi \frac{1 + \delta_{0,m}}{2l+1} \frac{(l+|m|)!}{(l-|m|)!}.$$

Infatti,

$$\begin{aligned} \|Y_l^m\|^2 &= \int_0^\pi \int_0^{2\pi} |Y_l^m(\theta, \varphi)|^2 d\theta d\varphi \\ &= \int_{-1}^1 P_l^{|m|}(\xi)^2 (1-\xi^2)^m d\xi \int_0^{2\pi} \left\{ \begin{array}{l} \cos^2 m\theta \\ \sin^2 m\theta \end{array} \right\} d\theta = 2\pi \frac{1 + \delta_{0,m}}{2l+1} \frac{(l+|m|)!}{(l-|m|)!}. \end{aligned}$$

La completezza di un sistema ortogonale di funzioni sferiche $\{Y_l^m\}$ significa che ogni funzione f appartenente a $L^2(S^2)$ può essere sviluppata in serie di Fourier di queste funzioni:

$$f(s) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_l^{(m)} Y_l^m(s) = \sum_{l=0}^{\infty} Y_l(s),$$

convergente in $L^2(S^2)$. I coefficienti $a_l^{(m)}$ sono calcolati mediante la formula

$$a_l^{(m)} = \frac{2l+1}{2\pi(1+\delta_{0,m})} \frac{(l-|m|)!}{(l+|m|)!} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} f(\theta, \varphi) Y_l^m(\theta, \varphi) \operatorname{sen} \varphi \, d\theta \, d\varphi.$$

Le funzioni sferiche Y_l^m , $m = 0, \pm 1, \dots, \pm l$, sono le autofunzioni del cosiddetto *operatore di Beltrami*,

$$L_B \stackrel{\text{def}}{=} -\frac{1}{\operatorname{sen} \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\operatorname{sen} \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \right) - \frac{1}{\operatorname{sen}^2 \varphi} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2},$$

che corrisponde all'autovalore $\lambda = l(l+1)$ di molteplicità $2l+1$.

6 Polinomi di Hermite

Studiamo ora l'equazione

$$u'' + (2\nu + 1 - z^2)u = 0, \quad (\text{III.85})$$

dove u , z e ν non hanno più lo stesso significato come prima. Sostituendo

$$u = e^{-z^2/2} v, \quad (\text{III.86})$$

risulta l'equazione

$$v'' - 2zv' + 2\nu v = 0. \quad (\text{III.87})$$

Per $\nu = 0, 1, 2, \dots$ la (II.87) si dice *equazione differenziale di Hermite*. Le soluzioni della (II.85) si dicono funzioni parabolico-cilindriche.

Sostituendo $v(z) = \sum_{l=0}^{\infty} c_l z^l$ nella (II.87) si trova la seguente espressione per il coefficiente di z^l :

$$(l+2)(l+1)c_{l+2} + 2(\nu-l)c_l = 0. \quad (\text{III.88})$$

La (II.88) è una relazione di ricorrenza che ci consente a calcolare tutti i coefficienti c_l dai coefficienti $c_0 = v(0)$ e $c_1 = v'(0)$. Si vede facilmente che esistono soluzioni polinomiali se e solo se $\nu = n = 0, 1, 2, \dots$. Tali soluzioni hanno la proprietà $v(-z) = (-1)^n v(z)$ e hanno il grado n (cioè, $c_{n+2} = c_{n+4} = c_{n+6} = \dots = 0$).

Definiamo ora

$$H_n(z) = (-1)^n e^{z^2} \left(\frac{d}{dz} \right)^n \{ e^{-z^2} \}. \quad (\text{III.89})$$

Allora $H_n(z)$ è un polinomio di grado n , ha il coefficiente principale positivo e soddisfa $H_n(-z) = (-1)^n H_n(z)$. Derivando l'equazione $w' + 2zw = 0$ (che ha la soluzione $w(z) \sim e^{-z^2}$) $n + 1$ volte e ponendo $u = w^{(n)}$ risulta

$$\boxed{u'' + 2zu' + 2(n+1)u = 0.}$$

Poi si sostituisca $u = e^{-z^2} v$. Infine risulta l'equazione (II.87) per $\nu = n$:

$$v'' - 2zv' + 2nv = 0. \quad (\text{III.90})$$

In altre parole, il polinomio di Hermite $H_n(z)$ soddisfa l'equazione differenziale di Hermite (II.90). La (II.89) si dice formula di Rodriguez.

Scriviamo ora la (II.87) nella forma

$$(e^{-z^2} v')' = -2n e^{-z^2} v.$$

Allora

$$2(n-m)H_n(z)H_m(z)e^{-z^2} = (e^{-z^2} H'_m)' H_n(z) - (e^{-z^2} H'_n)' H_m(z).$$

Calcolando l'integrale rispetto a z si ottiene

$$\begin{aligned} 2(n-m) \int_{-\infty}^{\infty} H_n(z)H_m(z)e^{-z^2} dz &= \left[e^{-z^2} (H'_m(z)H_n(z) - H'_n(z)H_m(z)) \right]_{z=-\infty}^{\infty} \\ &- \int_{-\infty}^{\infty} \left(e^{-z^2} H'_m(z)H'_n(z) - e^{-z^2} H'_n(z)H'_m(z) \right) dz = 0. \end{aligned}$$

Quindi i polinomi di Hermite formano un sistema ortogonale nello spazio di Hilbert $L^2(\mathbb{R}; e^{-z^2} dz)$. Per calcolare la costante di normalizzazione si applichino la formula di Rodriguez (II.89) e n integrazioni per parti, risultando nella seguente successione di passaggi:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} H_n(z)^2 e^{-z^2} dz &= \sum_{j=1}^n (-1)^{n-j+1} \left[H_n^{(j-1)}(z) \left(\frac{d}{dz} \right)^{n-j} \{e^{-z^2}\} \right]_{z=-\infty}^{\infty} \\ &+ \int_{-\infty}^{\infty} \left(\left(\frac{d}{dz} \right)^n H_n(z) \right) e^{-z^2} dz \\ &= \underbrace{\left[p(z)e^{-z^2} \right]_{z=-\infty}^{\infty}}_{=0} + c_n n! \int_{-\infty}^{\infty} e^{-z^2} dz = c_n n! \sqrt{\pi}, \end{aligned}$$

dove $p(z)$ è un polinomio e c_n è il coefficiente principale di $H_n(z)$ (cioè, $H_n(z) = c_n z^n + \dots$). Calcoliamo ora i coefficienti c_n . Derivando la formula di Rodriguez (II.89) si arriva all'identità

$$\boxed{H'_n(z) = 2zH_n(z) - H_{n+1}(z).} \quad (\text{III.91})$$

Confrontando i coefficienti di z^{n+1} nella (II.91) otteniamo $0 = 2c_n - c_{n+1}$, mentre $c_0 = 1$. Quindi $c_n = 2^n$. Infine si arriva alla seguente formula di ortogonalità:

$$\int_{-\infty}^{\infty} H_n(z)H_m(z)e^{-z^2} dz = 2^n(n!)\sqrt{\pi} \delta_{n,m}, \quad (\text{III.92})$$

dove $\delta_{n,m}$ è la delta di Kronecker.

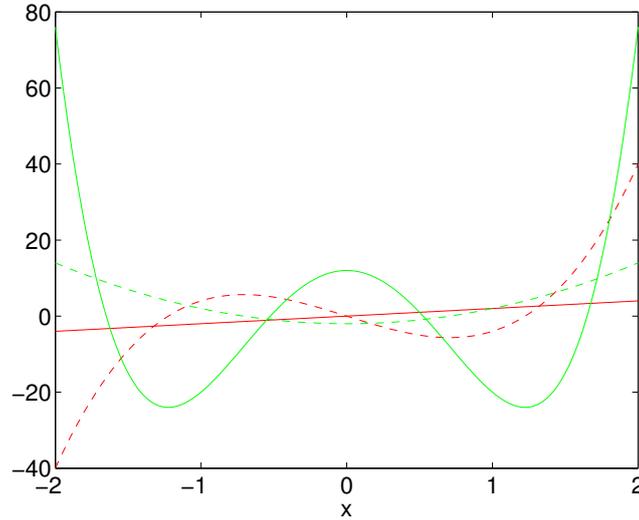


Figura III.4: I polinomi di Hermite di grado 1, 2, 3 e 4. Osserviamo che il numero degli zeri è uguale al grado del polinomio.

Derivando la (II.90) rispetto a z e scrivendo il risultato come un'equazione differenziale per v' si ottiene

$$(v')'' - 2z(v')' + 2(n-1)(v') = 0.$$

Dunque $H'_n(z)$ e $H_{n-1}(z)$ sono soluzioni della stessa equazione differenziale che ha soltanto una singola soluzione polinomiale linearmente indipendente. Di conseguenza, $H'_n(z) = \text{cost.}H_{n-1}(z)$. Siccome $H_n(z) = 2^n z^n + \dots$ e $H_{n-1}(z) = 2^{n-1} z^{n-1} + \dots$, risulta $n 2^n = \text{cost.}2^{n-1}$ e quindi $\text{cost.} = 2n$. In altre parole,

$$H'_n(z) = 2n H_{n-1}(z). \quad (\text{III.93})$$

Dalle equazioni (II.91) e (II.93) arriviamo alla formula di ricorrenza

$$2zH_n(z) = H_{n+1}(z) + 2nH_{n-1}(z), \quad (\text{III.94})$$

dove $H_0(z) = 1$ e $H_1(z) = 2z$.

Dimostriamo ora la formula generatrice

$$e^{2zt-t^2} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_n(z)}{n!} t^n, \quad t \in \mathbb{C}. \quad (\text{III.95})$$

Infatti, ponendo $F(z, t) = e^{2zt-t^2}$ e scrivendo

$$F(z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{h_n(z)}{n!} t^n \quad (\text{III.96})$$

per opportuni coefficienti $h_n(z)$, risultano

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial z} &= 2tF(z, t), \\ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{h'_n(z)}{n!} t^n &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2h_{n-1}(z)}{(n-1)!} t^n. \end{aligned}$$

Quindi $h_n(z)$ è un polinomio in z di grado n e

$$h'_n(z) = 2nh_{n-1}(z). \quad (\text{III.97})$$

Dalla (II.96) risulta che $h_n(0)$ coincide con la derivata n -esima di e^{-t^2} per $t = 0$, cioè con 0 se n è dispari, e con $(-1)^{n/2}(n!)/(n/2)!$ se n è pari. Dalla formula di Rodriguez (II.89) si vede facilmente che $H_n(0) = h_n(0)$ per $n = 0, 1, 2, \dots$. Utilizzando le espressioni (II.93) e (II.97) arriviamo alla identità $H_n(z) = h_n(z)$ e quindi alla formula generatrice (II.95).

7 Polinomi di Laguerre

I *polinomi di Laguerre* si definiscono tramite la seguente formula di Rodriguez:

$$L_n^{(\alpha)}(x) = \frac{x^{-\alpha} e^x}{n!} \left(\frac{d}{dx} \right)^n \{x^{n+\alpha} e^{-x}\}. \quad (\text{III.98})$$

Si dimostra facilmente che la (II.98) rappresenta un polinomio di grado n per ogni $\alpha \in \mathbb{R}$. La regola di Leibnitz ci dà subito la rappresentazione $L_n^{(\alpha)}(x) = (-1)^n (x^n/n!) + \dots$. Ci limitiamo al caso $\alpha > -1$.

La funzione $w(x) = x^{n+\alpha} e^{-x}$ soddisfa l'equazione differenziale

$$xw' + (x - n - \alpha)w = 0. \quad (\text{III.99})$$

Derivando la (II.99) $n + 1$ volte e ponendo $u = w^{(n)}$ si arriva all'equazione differenziale

$$xu'' + (x + 1 - \alpha)u' + (n + 1)u = 0.$$

Sostituendo $u = x^\alpha e^{-x}v$ in quest'ultima equazione si ottiene la seguente *equazione differenziale di Laguerre*:

$$\boxed{xv'' + (\alpha + 1 - x)v' + nv = 0.} \quad (\text{III.100})$$

Di conseguenza, $L_n^{(\alpha)}(x)$ è una soluzione dell'equazione (II.100).

Consideriamo ora l'equazione differenziale

$$xv'' + (\alpha + 1 - x)v' + \nu v = 0. \quad (\text{III.101})$$

Sostituendo $v(x) = \sum_{l=0}^{\infty} c_l x^l$ si trova la seguente espressione per il coefficiente di x^l :

$$(l + 1)(l + \alpha + 1)c_{l+1} + (\nu - l)c_l = 0.$$

Quindi abbiamo trovato la formula di ricorrenza

$$\frac{c_{l+1}}{c_l} = \frac{l - \nu}{(l + 1)(l + \alpha + 1)}, \quad (\text{III.102})$$

che ci consente a calcolare tutti i coefficienti c_l dal coefficiente iniziale $c_0 = v(0)$; bisogna richiedere $\alpha > -1$ per garantire la positività del denominatore nella parte a destra della (II.102). Risulta una soluzione polinomiale di grado $n = 0, 1, 2, \dots$ se e solo se $\nu = n$.

Scrivendo la (II.100) nella forma

$$(x^{\alpha+1}e^{-x}v')' + nx^\alpha e^{-x}v = 0, \quad (\text{III.103})$$

otteniamo

$$(n-m)x^\alpha e^{-x}L_n^{(\alpha)}(x)L_m^{(\alpha)}(x) = L_n^{(\alpha)}(x) \left(x^{\alpha+1}e^{-x}L_m^{(\alpha)'} \right)' - L_m^{(\alpha)}(x) \left(x^{\alpha+1}e^{-x}L_n^{(\alpha)'} \right)'$$

Calcolando l'integrale sull'intervallo $(0, \infty)$ [dove l'ipotesi $\alpha > -1$ serve per la convergenza dell'integrale] si ottiene

$$\begin{aligned} & (n-m) \int_0^\infty L_n^{(\alpha)}(x)L_m^{(\alpha)}(x)x^\alpha e^{-x} dx \\ &= \left[L_n^{(\alpha)}(x)x^{\alpha+1}e^{-x}L_m^{(\alpha)'}(x) - L_m^{(\alpha)}(x)x^{\alpha+1}e^{-x}L_n^{(\alpha)'}(x) \right]_{x=0}^\infty \\ & - \int_0^\infty \left\{ L_n^{(\alpha)'}(x)x^{\alpha+1}e^{-x}L_m^{(\alpha)'}(x) - L_m^{(\alpha)'}(x)x^{\alpha+1}e^{-x}L_n^{(\alpha)'}(x) \right\} dx = 0, \end{aligned}$$

dove abbiamo utilizzato $x^{\alpha+1} \rightarrow 0$ per $x \rightarrow 0^+$. Quindi per $\alpha > -1$ i polinomi di Laguerre $\{L_n^{(\alpha)}(x)\}_{n=0}^{\infty}$ costituiscono un sistema ortogonale nello spazio di Hilbert $L^2(\mathbb{R}^+; x^\alpha e^{-x} dx)$.

Per calcolare la costante di normalizzazione facciamo i seguenti passaggi:

$$\begin{aligned}
\int_0^\infty L_n^{(\alpha)}(x)^2 x^\alpha e^{-x} dx &= \frac{1}{(n!)^2} \int_0^\infty L_n^{(\alpha)}(x) \left(\frac{d}{dx}\right)^n \{x^{n+\alpha} e^{-x}\} dx \\
&= \left[\frac{1}{(n!)^2} \sum_{j=1}^n (-1)^{j-1} (L_n^{(\alpha)})^{(j-1)}(x) \left(\frac{d}{dx}\right)^{n-j} \{x^{n+\alpha} e^{-x}\} \right]_{x=0}^\infty \\
&+ \frac{(-1)^n}{(n!)^2} \int_0^\infty \left(\left(\frac{d}{dx}\right)^n L_n^{(\alpha)}(x) \right) x^{n+\alpha} e^{-x} dx \\
&= \left[\frac{1}{(n!)^2} \sum_{j=1}^n (-1)^{j-1} (L_n^{(\alpha)})^{(j-1)}(x) x^{\alpha+j} e^{-x} L_{n-j}^{(\alpha+j)}(x) \right]_{x=0}^\infty \\
&+ \frac{(-1)^n}{(n!)^2} \left(\left(\frac{d}{dx}\right)^n L_n^{(\alpha)}(x) \right) \int_0^\infty x^{n+\alpha} e^{-x} dx = \frac{\Gamma(n + \alpha + 1)}{n!},
\end{aligned}$$

dove abbiamo fatto n integrazioni per parti, utilizzato la (II.98) con $\alpha + j$ al posto di α , applicato l'espressione $L_n^{(\alpha)}(x) = (-1)^n (x^n/n!) + \dots$ e l'identità (A.1). In altre parole,

$$\boxed{\int_0^\infty L_n^{(\alpha)}(x) L_m^{(\alpha)}(x) x^\alpha e^{-x} dx = \frac{\Gamma(n + \alpha + 1)}{n!} \delta_{n,m}}, \quad (\text{III.104})$$

dove $\delta_{n,m}$ è la delta di Kronecker.

Derivando la (II.100) si ottiene la seguente equazione differenziale:

$$x(v')'' + (\alpha + 2 - x)(v')' + (n - 1)(v') = 0.$$

Quindi $L_n^{(\alpha)'}(x)$ è proporzionale a $L_{n-1}^{(\alpha+1)}(x)$. Siccome

$$L_n^{(\alpha)'}(x) = \frac{(-1)^n x^{n-1}}{(n-1)!} + \dots, \quad L_{n-1}^{(\alpha+1)}(x) = \frac{(-1)^{n-1} x^{n-1}}{(n-1)!} + \dots,$$

risulta per $\alpha > -1$

$$L_n^{(\alpha)'}(x) = -L_{n-1}^{(\alpha+1)}(x). \quad (\text{III.105})$$

L'ortogonalità di $L_n^{(\alpha)}(x)$ a tutti i polinomi di grado minore di n nello spazio di Hilbert $L^2(\mathbb{R}^+; x^\alpha e^{-x} dx)$ conduce all'identità

$$xL_n^{(\alpha)}(x) = A_n^{(\alpha)} L_{n+1}^{(\alpha)}(x) + B_n^{(\alpha)} L_n^{(\alpha)}(x) + C_n^{(\alpha)} L_{n-1}^{(\alpha)}(x), \quad (\text{III.106})$$

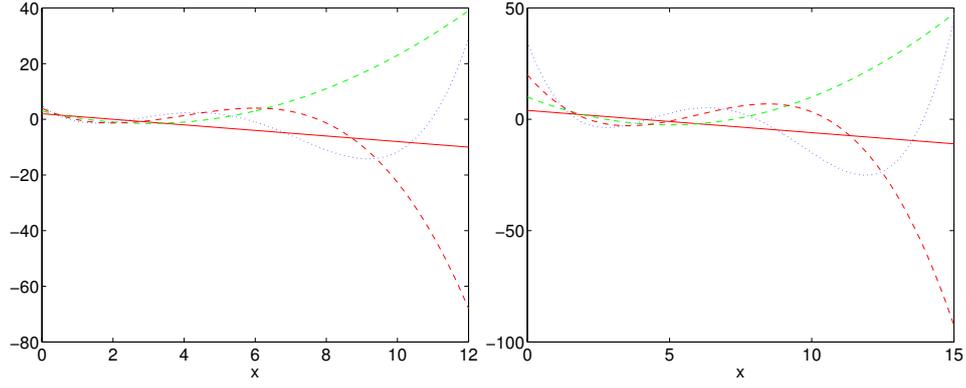


Figura III.5: I polinomi di Laguerre di grado 1, 2, 3 e 4 per $\alpha = 1$ (panello sinistro) e $\alpha = 3$ (panello destro). Osserviamo che il numero degli zeri è uguale al grado del polinomio.

dove $n = 1, 2, 3, \dots$ e A_n, B_n e C_n sono opportune costanti da determinare. Calcoliamo ora il seguente integrale:

$$\begin{aligned}
C_n^{(\alpha)} &= \int_0^\infty x L_n^{(\alpha)}(x) L_{n+1}^{(\alpha)}(x) x^\alpha e^{-x} dx \\
&= \frac{1}{(n+1)!} \int_0^\infty x L_n^{(\alpha)}(x) \left(\frac{d}{dx} \right)^{n+1} \{x^{n+1+\alpha} e^{-x}\} dx \\
&= \left[\frac{1}{(n+1)!} \sum_{j=1}^{n+1} (-1)^{j-1} (x L_n^{(\alpha)})^{(j-1)}(x) \left(\frac{d}{dx} \right)^{n+1-j} \{x^{n+1+\alpha} e^{-x}\} \right]_{x=0}^\infty \\
&\quad + \frac{(-1)^{n+1}}{(n+1)!} \int_0^\infty \left(\left(\frac{d}{dx} \right)^{n+1} \{x L_n^{(\alpha)}(x)\} \right) x^{n+1+\alpha} e^{-x} dx \\
&= \left[\frac{(-1)^n}{(n+1)!} \sum_{j=1}^{n+1} (x L_n^{(\alpha)})^{(j-1)}(x) (n+1-j)! x^{\alpha+j} e^{-x} L_{n+1-j}^{(\alpha+j)}(x) \right]_{x=0}^\infty \\
&\quad + \frac{(-1)^{n+1}}{(n+1)!} \left(\left(\frac{d}{dx} \right)^{n+1} \{x L_n^{(\alpha)}(x)\} \right) \int_0^\infty x^{n+1+\alpha} e^{-x} dx \\
&= -\frac{\Gamma(n+\alpha+2)}{n!},
\end{aligned}$$

dove abbiamo utilizzato $x L_n^{(\alpha)}(x) = (-1)^n (x^{n+1}/n!) + \dots$. Poi calcoliamo l'integrale:

$$D_n^{(\alpha)} = \int_0^\infty x L_n^{(\alpha)}(x)^2 x^\alpha e^{-x} dx$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{n!} \int_0^\infty x L_n^{(\alpha)}(x) \left(\frac{d}{dx} \right)^n \{x^{n+\alpha} e^{-x}\} dx \\
&= \left[\frac{1}{n!} \sum_{j=1}^n (-1)^{j-1} (x L_n^{(\alpha)})^{(j-1)}(x) \left(\frac{d}{dx} \right)^{n-j} \{x^{n+\alpha} e^{-x}\} \right]_{x=0}^\infty \\
&+ \frac{(-1)^n}{n!} \int_0^\infty \left(\left(\frac{d}{dx} \right)^n \{x L_n^{(\alpha)}(x)\} \right) x^{n+\alpha} e^{-x} dx \\
&= \left[\frac{1}{n!} \sum_{j=1}^n (-1)^{j-1} (x L_n^{(\alpha)})^{(j-1)}(x) (-1)^{n-j} (n-j)! x^{\alpha+j} e^{-x} L_{n-j}^{(\alpha+j)}(x) \right]_{x=0}^\infty \\
&+ \frac{(-1)^n}{n!} \int_0^\infty \left(\left(\frac{d}{dx} \right)^n \{x L_n^{(\alpha)}(x)\} \right) x^{n+\alpha} e^{-x} dx \\
&= \frac{(-1)^n}{n!} \int_0^\infty ((n+1)! x - n(n+\alpha)n!) x^{n+\alpha} e^{-x} dx \\
&= \frac{(n+1)\Gamma(n+\alpha+2) - n(n+\alpha)\Gamma(n+\alpha+1)}{n!} \\
&= \frac{(2n+1+\alpha)\Gamma(n+\alpha+1)}{n!},
\end{aligned}$$

dove abbiamo utilizzato $x L_n^{(\alpha)}(x) = (-1)^n ((x^{n+1} - n(n+\alpha)x^n)/n!) + \dots$. Dalla (II.106) e le espressioni per $C_n^{(\alpha)}$ e $D_n^{(\alpha)}$ seguono $A_n^{(\alpha)} = -(n+1)$, $B_n^{(\alpha)} = 2n+1+\alpha$ e $C_n^{(\alpha)} = -(n+\alpha)$. Dunque risulta la formula di ricorrenza

$$\boxed{(2n+1+\alpha-x)L_n^{(\alpha)}(x) = (n+1)L_{n+1}^{(\alpha)}(x) + (n+\alpha)L_{n-1}^{(\alpha)}(x)}, \quad (\text{III.107})$$

dove $L_0^{(\alpha)}(x) = 1$ e $L_1^{(\alpha)}(x) = 1 + \alpha - x$.

Per dimostrare la validità della formula generatrice

$$(1-t)^{-(1+\alpha)} \exp\left(-\frac{xt}{1-t}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} L_n^{(\alpha)}(x) t^n, \quad |t| < 1, \quad (\text{III.108})$$

partiamo dalla serie di funzioni

$$F(x, t) = (1-t)^{-(1+\alpha)} \exp\left(-\frac{xt}{1-t}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n(x) t^n, \quad |t| < 1, \quad (\text{III.109})$$

dove $c_n(x) n!$ è la derivata parziale n -esima di $F(x, t)$ rispetto a t per $t = 0$. Sostituendo la serie (II.109) nella equazione

$$(1-t)^2 \frac{\partial F}{\partial t} + [x - (1+\alpha)(1-t)] F = 0,$$

otteniamo le seguenti espressioni per i coefficienti t^n ($n = 1, 2, 3, \dots$) e per il coefficiente di t^0 :

$$\begin{cases} (n+1)c_{n+1}(x) + (x-2n-\alpha-1)c_n(x) + (n+\alpha)c_{n-1}(x), \\ c_1(x) + (x-\alpha-1)c_0(x) = 0, \end{cases}$$

dove $c_0(x) = 1$. Quindi $c_n(x) = L_n^{(\alpha)}(x)$ per $n = 0, 1, 2, \dots$ (vedi la (II.107)).

Infine, per esprimere i polinomi di Hermite in quelli di Laguerre riscriviamo i prodotti scalari tra quest'ultimi utilizzando la trasformazione $x = t^2$:

$$\int_0^\infty L_n^{(\alpha)}(x)L_m^{(\alpha)}(x)x^\alpha e^{-x} dx = \int_{-\infty}^\infty L_n^{(\alpha)}(t^2)L_m^{(\alpha)}(t^2)|t|^{2\alpha+1}e^{-t^2} dt, \quad (\text{III.110})$$

$$\int_0^\infty L_n^{(\alpha)}(x)L_m^{(\alpha)}(x)x^\alpha e^{-x} dx = \int_{-\infty}^\infty tL_n^{(\alpha)}(t^2)tL_m^{(\alpha)}(t^2)|t|^{2\alpha-1}e^{-t^2} dt. \quad (\text{III.111})$$

Per fare scomparire i fattori $|t|^{2\alpha\pm 1}$ in (II.110) e (II.111) scegliamo $\alpha = -\frac{1}{2}$ in (II.110) e $\alpha = \frac{1}{2}$ in (II.111). Quindi $H_{2n}(t)$ è proporzionale a $L_n^{(-\frac{1}{2})}(t^2)$ e $H_{2n+1}(t)$ è proporzionale a $tL_n^{(\frac{1}{2})}(t^2)$. Confrontando i coefficienti principali otteniamo

$$H_{2n}(t) = 2^{2n} n! (-1)^n L_n^{(-\frac{1}{2})}(t^2), \quad (\text{III.112})$$

$$H_{2n+1}(t) = 2^{2n+1} n! (-1)^n t L_n^{(\frac{1}{2})}(t^2). \quad (\text{III.113})$$

8 Polinomi di Chebyshev

I polinomi di Chebyshev di prima specie $T_n(x)$ e di seconda specie $U_n(x)$ si definiscono nel seguente modo:⁸

$$\boxed{T_n(x) = \cos(nt)}, \quad \boxed{U_n(x) = \frac{\sin((n+1)t)}{\sin t}}, \quad (\text{III.114})$$

where $x = \cos(t)$. In tal caso $T_n(x)$ e $U_n(x)$ sono polinomi di x di grado n che hanno le seguenti proprietà:

$$\begin{aligned} T_0(x) &= 1, & T_1(x) &= x, & T_{n+1}(x) + T_{n-1}(x) &= 2xT_n(x), \\ U_0(x) &= 1, & U_1(x) &= 2x, & U_{n+1}(x) + U_{n-1}(x) &= 2xU_n(x). \end{aligned}$$

⁸Per $x \in \mathbb{R} \setminus [-1, 1]$ si hanno le definizioni alternative $T_n(x) = \cosh(nt)$ e $U_n(x) = \sinh((n+1)t)/\sinh t$ per $x = \cosh t$.

La formula di ricorrenza è facile da verificare:

$$\begin{aligned}
 T_{n+1}(x) + T_{n-1}(x) &= \cos((n+1)t) + \cos((n-1)t) \\
 &= 2 \cos(t) \cos(nt) = 2xT_n(x), \\
 U_{n+1}(x) + U_{n-1}(x) &= \frac{\sin((n+2)t)}{\sin(t)} + \frac{\sin(nt)}{\sin(t)} \\
 &= \frac{2 \cos(t) \sin((n+1)t)}{\sin(t)} = 2xU_n(x).
 \end{aligned}$$

Si vede subito che $-1 \leq T_n(x) \leq +1$ per $x \in [-1, 1]$, mentre $T_n(x) = 2^{n-1}x^n + \dots$ e $U_n(x) = 2^n x^n + \dots$ per $n \in \mathbb{N}$.

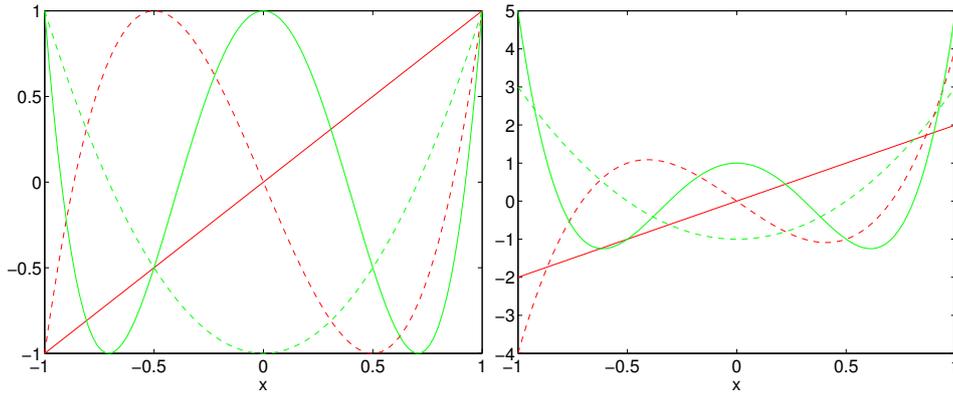


Figura III.6: I polinomi di Chebyshev di prima e seconda specie di grado 1, 2, 3 e 4. Nel pannello sinistro si trovano i grafici dei polinomi di Chebyshev di prima specie e nel pannello destro quelli di seconda specie. Osserviamo che il numero degli zeri è uguale al grado del polinomio. Inoltre, i polinomi di Chebyshev di prima specie hanno ± 1 come i loro valori estremi.

Sono verificate le relazioni di ortogonalità

$$\begin{aligned}
 \int_0^\pi \cos(nt) \cos(mt) dt &= \frac{\pi}{2} (1 + \delta_{n,0}) \delta_{n,m}, \\
 \int_0^\pi \sin((n+1)t) \sin((m+1)t) dt &= \frac{\pi}{2} \delta_{n,m}.
 \end{aligned}$$

Sostituendo $x = \cos(t)$ otteniamo

$$\boxed{\int_{-1}^1 T_n(x) T_m(x) \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \frac{\pi}{2} (1 + \delta_{n,0}) \delta_{n,m}} \quad (\text{III.115})$$

$$\boxed{\int_{-1}^1 U_n(x)U_m(x)\sqrt{1-x^2} dx = \frac{\pi}{2}\delta_{n,m}.} \quad (\text{III.116})$$

Quindi $\{T_n(x)\}_{n=0}^\infty$ sono i polinomi ortogonali su $[-1, 1]$ con peso $(1-x^2)^{-1/2}$ e $\{U_n(x)\}_{n=0}^\infty$ sono i polinomi ortogonali su $[-1, 1]$ con peso $(1-x^2)^{1/2}$, tranne per fattori costanti.

Le funzioni $\cos(nt)$ e $\sin(nt)$ soddisfano all'equazione differenziale $u''(t) + n^2u(t) = 0$. Sostituendo $x = \cos(t)$ e utilizzando le definizioni per $T_n(x)$ e $U_n(x)$ otteniamo

$$\boxed{\begin{cases} (1-x^2)T_n''(x) - xT_n'(x) + n^2T_n(x) = 0, \\ (1-x^2)U_n''(x) - 3xU_n'(x) + n^2U_n(x) = 0. \end{cases}}$$

In forma Sturm-Liouville abbiamo

$$\boxed{\begin{cases} \frac{d}{dx} ((1-x^2)^{1/2}T_n'(x)) = -n^2 \frac{T_n(x)}{\sqrt{1-x^2}}, \\ \frac{d}{dx} ((1-x^2)^{3/2}U_n'(x)) = -n^2 \sqrt{1-x^2} U_n(x). \end{cases}}$$

9 Polinomi Ortogonali Generali

Sia I un intervallo della retta reale e w una funzione positiva quasi ovunque su I tale che $\int_I |x|^{2n}w(x) dx < \infty$ ($n = 0, 1, 2, \dots$). Allora i polinomi sono tutti elementi dello spazio di Hilbert $L^2(I; w dx)$. Infatti, i polinomi costituiscono un sottospazio lineare denso in $L^2(I; w dx)$, un fatto che non dimostriamo. Applicando il processo di Gram-Schmidt al sistema $\{\psi_n\}_{n=0}^\infty$ dove $\psi_n(x) = x^n$, si ottengono i polinomi ortogonali $\{p_n\}_{n=0}^\infty$ rispetto al peso w , dove il grado di p_n è uguale ad n e i coefficienti principali sono tutti positivi. Data una funzione $f \in L^2(I; w dx)$ e definendo i coefficienti

$$c_n = \int_I f(x)p_n(x)w(x) dx, \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

otteniamo l'identità di Parseval

$$\int_I |f(x)|^2 w(x) dx = \sum_{n=0}^{\infty} |c_n|^2$$

e lo sviluppo

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n p_n(x)$$

convergente nel senso che

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \int_I \left| f(x) - \sum_{n=0}^N c_n p_n(x) \right|^2 w(x) dx = 0.$$

I polinomi ortogonali sono stati studiati nel libro di Szegő [17]. Alcune classi di polinomi ortogonali hanno la proprietà aggiuntiva che appaiono come le autofunzioni di un problema di Sturm-Liouville su un opportuno intervallo I della retta reale. Ce l'abbiamo già visto per quanto riguardano i polinomi di Legendre, i polinomi associati di Legendre, e quelli di Hermite, Laguerre e Chebyshev. A quelli si aggiungono i polinomi di Gegenbauer (anche detti polinomi ultrasferici⁹) e i polinomi di Jacobi.

| Nome dei polinomi | I | $w(x)$ |
|------------------------------------|---------------------|---|
| Legendre | $(-1, 1)$ | 1 |
| Chebyshev di 1 ^a specie | $(-1, 1)$ | $(1 - x^2)^{-1/2}$ |
| Chebyshev di 2 ^a specie | $(-1, 1)$ | $(1 - x^2)^{1/2}$ |
| Legendre associati | $(-1, 1)$ | $(1 - x^2)^m$ per $m = 1, 2, 3, \dots$ |
| Jacobi | $(-1, 1)$ | $(1 - x)^\alpha (1 + x)^\beta$ per $\alpha, \beta > -1$ |
| Gegenbauer o ultrasferici | $(-1, 1)$ | $(1 - x^2)^\lambda$ per $\lambda > -1$ |
| Laguerre | $(0, \infty)$ | $x^\alpha e^{-x}$ per $\alpha > -1$ |
| Hermite | $(-\infty, \infty)$ | e^{-x^2} |

Infine dimostriamo alcune proprietà degli zeri dei polinomi ortogonali.

Lemma III.1 *Si ha $(f, p_n)_{L^2(I; w dx)} = 0$ per ciascun polinomio f di grado $< n$.*

Dimostrazione. Sia f un polinomio di grado $< n$. Allora f è una combinazione lineare dei polinomi p_0, p_1, \dots, p_{n-1} . Siccome $(p_j, p_n) = 0$ in $L^2(I; w dx)$ per $j = 0, 1, \dots, n - 1$, risulta $(f, p_n) = 0$. \square

Teorema III.2 *Gli zeri del polinomio p_n sono tutti semplici e contenuti all'interno dell'intervallo I .*

Dimostrazione. Sia $I = (a, b)$ dove $-\infty \leq a < b \leq +\infty$. Supponiamo che p_n ha m (con $m < n$) zeri $\alpha_1, \dots, \alpha_m$ in (a, b) e $n - m$ zeri in $\mathbb{C} \setminus (a, b)$. Allora p_n ammette la rappresentazione

$$p_n(x) = (x - \alpha_1) \cdots (x - \alpha_m) q(x),$$

⁹I polinomi ortogonali su $I = (-1, 1)$ con $w(x) = (1 - x^2)^\lambda$ per cui $2\lambda \in \mathbb{N} \cup \{0\}$, appaiono come funzioni sferiche di dimensione $\geq 2\lambda + 3$.

dove q è un polinomio di grado $n - m$ che non cambia segno in (a, b) ; dunque $q(x) \geq 0$ per $x \in (a, b)$. Consideriamo il polinomio f definito da

$$f(x) = (x - \alpha_1) \cdots (x - \alpha_m).$$

Secondo il Lemma II.1 risulta $(f, p_n) = 0$. In particolare,

$$0 = (f, p_n) = c \int_I [(x - \alpha_1) \cdots (x - \alpha_m)]^2 q(x) w(x) dx,$$

dove la funzione sotto il segno dell'integrale è non negativa. Ciò implica che $c \int_I [(x - \alpha_1) \cdots (x - \alpha_m)]^2 q(x) w(x) = 0$ quasi ovunque. Contraddizione. Si conclude pertanto che tutti gli zeri di p_n appartengono ad (a, b) .

Per escludere l'esistenza di zeri multipli di p_n , rappresentiamo p_n come

$$p_n(x) = c(x - \beta_1)^{m_1} \cdots (x - \beta_r)^{m_r},$$

dove β_1, \dots, β_r sono gli zeri distinti di p_n e $m_1 + \dots + m_r = n$. Bisogna dimostrare che $r = n$, $m_1 = \dots = m_n = 1$ e $c > 0$. Se esiste un indice j con $m_j > 1$, definiamo $n_j = 0$ se m_j è pari e $n_j = 1$ se m_j è dispari (cioè, se $m_j = 3, 5, 7, \dots$). Poi consideriamo il polinomio g definito da

$$g(x) = (x - \beta_1)^{m_1} \cdots (x - \beta_{j-1})^{m_{j-1}} (x - \beta_j)^{n_j} (x - \beta_{j+1})^{m_{j+1}} \cdots (x - \beta_r)^{m_r}.$$

Siccome il grado di g è strettamente minore di n , si ha $(g, p_n) = 0$. In altre parole l'integrale

$$c \int_I \underbrace{(x - \beta_1)^{2m_1} \cdots (x - \beta_{j-1})^{2m_{j-1}} (x - \beta_j)^{m_j + n_j} (x - \beta_{j+1})^{2m_{j+1}} \cdots (x - \beta_r)^{2m_r}}_{\text{espressione non negativa, poichè } m_j + n_j \text{ è pari}} dx$$

vale zero. Quindi la funzione sotto il segno dell'integrale si annulla quasi ovunque. Contraddizione. Quindi tutti gli n zeri di p_n sono semplici. \square

I polinomi ortogonali soddisfano una relazione di ricorrenza a tre termini.

Teorema III.3 *Sia $\alpha_n = (xp_{n+1}, p_n)$, $c_n = (xp_n, p_n)$ e $\alpha_{-1} = 0$. Allora*

$$(x - c_n)p_n(x) = \alpha_n p_{n+1}(x) + \alpha_{n-1} p_{n-1}(x), \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Inoltre, se $I = (-h, h)$ e w è pari, allora $p_n(-x) = (-1)^n p_n(x)$ e $c_n = 0$.

Dimostrazione. Siccome $xp_n(x)$ è un polinomio di grado $n + 1$, è una combinazione lineare di $p_0, p_1, \dots, p_n, p_{n+1}$. Purtroppo

$$(xp_n, p_j) = \int_I p_n(x) \cdot xp_j(x) w(x) dx = 0, \quad j < n - 1,$$

poichè $xp_j(x)$ con $j < n - 1$ è un polinomio di grado $< n$. Quindi $xp_n(x)$ è una combinazione lineare di soltanto tre polinomi ortogonali: p_{n-1}, p_n, p_{n+1} . Scriviamo

$$xp_n(x) = c_n p_n(x) + \alpha_n p_{n+1}(x) + \beta_n p_{n-1}(x),$$

dove non c'è il terzo termine nella parte a destra per $n = 0$. Si vede facilmente che

$$\begin{cases} \alpha_n = (xp_n, p_{n+1}) \\ \beta_n = (xp_n, p_{n-1}) = (xp_{n-1}, p_n) = \alpha_{n-1} \\ c_n = (xp_n, p_n). \end{cases}$$

In generale, se $\{p_j\}_{j=0}^{\infty}$ sono i polinomi ortogonali rispetto al peso w su I , allora $\{(-1)^j p_j(-x)\}_{j=0}^{\infty}$ sono i polinomi ortogonali rispetto al peso $w(-x)$ su $-I$. Assumiamo ora che $I = (-h, h)$ (potenzialmente con $h = +\infty$) e w sia pari. Allora $p_n(-x) = (-1)^n p_n(x)$ e dunque

$$c_n = \int_I \underbrace{xp_n(x)^2}_{\text{dispari}} \underbrace{w(x)}_{\text{pari}} dx = 0,$$

il che conclude la dimostrazione. □

Introduciamo ora la funzione bivariata

$$K_n(x, y) = \sum_{j=0}^n p_j(x)p_j(y). \quad (\text{III.117})$$

Lemma III.4 *Vale la formula di Christoffel-Darboux*

$$K_n(x, y) = \alpha_n \frac{p_{n+1}(x)p_n(y) - p_n(x)p_{n+1}(y)}{x - y}, \quad (\text{III.118})$$

dove $\alpha_n = (xp_n, p_{n+1})$. Inoltre,

$$K_n(x, x) = \alpha_n (p'_{n+1}(x)p_n(x) - p'_n(x)p_{n+1}(x)). \quad (\text{III.119})$$

Dimostrazione. Il Teorema II.3 e la (II.117) implicano che

$$\begin{aligned}
(x-y)K_n(x,y) &= \sum_{j=0}^n (\alpha_j p_{j+1}(x) + \alpha_{j-1} p_{j-1}(x) + c_j p_j(x)) p_j(y) \\
&\quad - \sum_{j=0}^n p_j(x) (\alpha_j p_{j+1}(y) + \alpha_{j-1} p_{j-1}(y) + c_j p_j(y)) \\
&= \sum_{j=0}^n (\alpha_j p_{j+1}(x) p_j(y) - \alpha_{j-1} p_{j-1}(y) p_j(x)) \\
&\quad + \sum_{j=0}^n (\alpha_{j-1} p_{j-1}(x) p_j(y) - \alpha_j p_{j+1}(y) p_j(x)) \\
&\quad + \underbrace{\sum_{j=0}^n (c_j p_j(x) p_j(y) - c_j p_j(y) p_j(x))}_{=0} \\
&= \alpha_n (p_{n+1}(x) p_n(y) - p_n(x) p_{n+1}(y)).
\end{aligned}$$

La (II.119) ne segue utilizzando il Teorema di De L'Hôpital. \square

Il Lemma II.4 conduce alla seguente proprietà degli zeri dei polinomi ortogonali.

Teorema III.5 *Tra ogni coppia di zeri consecutivi del polinomio $p_{n+1}(x)$ cade esattamente uno zero del polinomio $p_n(x)$. In particolare, i polinomi $p_n(x)$ e $p_{n+1}(x)$ non hanno zeri in comune.*

Dimostrazione. Ci ricordiamo che gli zeri dei polinomi $p_n(x)$ e $p_{n+1}(x)$ sono tutti reali e semplici. Siano ora $\xi_1 < \xi_2 < \dots < \xi_n < \xi_{n+1}$ gli zeri del polinomio $p_{n+1}(x)$. Allora la (II.117) e (II.119) implicano che per $k = 1, 2, \dots, n$

$$\begin{aligned}
0 &< \sum_{j=0}^n p_j(\xi_k)^2 = \alpha_n p'_{n+1}(\xi_k) p_n(\xi_k), \\
0 &< \sum_{j=0}^n p_j(\xi_{k+1})^2 = \alpha_n p'_{n+1}(\xi_{k+1}) p_n(\xi_{k+1}).
\end{aligned}$$

Siccome ξ_k e ξ_{k+1} sono due zeri consecutivi (**e semplici**) del polinomio $p_{n+1}(x)$, risulta che $p'_{n+1}(\xi_k)$ e $p'_{n+1}(\xi_{k+1})$ non si annullano e hanno segni opposti. Poichè $\alpha_n \neq 0$, risulta che $p_n(\xi_k)$ e $p_n(\xi_{k+1})$ non si annullano e hanno segni opposti. Dunque i polinomi $p_n(x)$ e $p_{n+1}(x)$ non hanno zeri in comune e gli intervalli (ξ_k, ξ_{k+1}) ($k = 1, \dots, n$) contengono uno zero del polinomio $p_n(x)$. \square

Capitolo IV

EQUAZIONI INTEGRALI

1 Proprietà Elementari e Iterazione

Le equazioni contenenti la funzione incognita sotto il segno dell'integrale sono dette *equazioni integrali*. Molti problemi della fisica matematica possono essere ridotti ad equazioni integrali lineari della forma

$$\int_{\Omega} \mathcal{K}(x, y)\varphi(y) dy = f(x), \quad (\text{IV.1})$$

$$\varphi(x) = \lambda \int_{\Omega} \mathcal{K}(x, y)\varphi(y) dy + f(x), \quad (\text{IV.2})$$

rispetto alla funzione incognita $\varphi(x)$ in una regione $\Omega \subset \mathbb{R}^n$. L'equazione (III.1) si dice *equazione integrale di prima specie*, mentre l'equazione (III.2) si dice *equazione di Fredholm di seconda specie*. Le funzioni note $\mathcal{K}(x, y)$ e $f(x)$ sono dette *nucleo* e *termine noto* dell'equazione integrale; λ è un parametro complesso.

L'equazione integrale (III.2) per $f = 0$

$$\varphi(x) = \lambda \int_{\Omega} \mathcal{K}(x, y)\varphi(y) dy \quad (\text{IV.3})$$

si dice equazione integrale di Fredholm *omogenea* di seconda specie corrispondente all'equazione (III.2). Le equazioni integrali di Fredholm di seconda specie

$$\psi(x) = \bar{\lambda} \int_{\Omega} \mathcal{K}^*(x, y)\psi(y) dy + g(x), \quad (\text{IV.4})$$

$$\psi(x) = \bar{\lambda} \int_{\Omega} \mathcal{K}^*(x, y)\psi(y) dy, \quad (\text{IV.5})$$

dove $\mathcal{K}^*(x, y) = \overline{\mathcal{K}(y, x)}$, sono dette *aggiunte* alle equazioni (III.2) e (III.3), rispettivamente. Il nucleo $\mathcal{K}^*(x, y)$ si dice *nucleo coniugato aggiunto* al nucleo $\mathcal{K}(x, y)$. Il nucleo $\mathcal{K}(x, y)$ si dice *hermitiano* se $\mathcal{K}^*(x, y) = \mathcal{K}(x, y)$, cioè se $\overline{\mathcal{K}(y, x)} = \mathcal{K}(x, y)$ quasi ovunque. Il nucleo $\mathcal{K}(x, y)$ si dice *reale e simmetrico* se $\mathcal{K}(x, y)$ è reale e $\mathcal{K}(y, x) = \mathcal{K}(x, y)$ quasi ovunque. Ovviamente un nucleo reale e simmetrico è hermitiano.

Scriveremo le equazioni (III.2), (III.3), (III.4) e (III.5) in forma contratta, utilizzando la notazione d'operatore:

$$\begin{cases} \varphi = \lambda K\varphi + f, & \varphi = \lambda K\varphi, \\ \psi = \bar{\lambda}K^*\psi + g, & \psi = \bar{\lambda}K^*\psi, \end{cases}$$

dove gli operatori integrali K e K^* sono determinati dai nuclei $\mathcal{K}(x, y)$ e $\mathcal{K}^*(x, y)$, rispettivamente:

$$(Kf)(x) = \int_{\Omega} \mathcal{K}(x, y)f(y) dy, \quad (K^*f)(x) = \int_{\Omega} \mathcal{K}^*(x, y)f(y) dy.$$

Tra poco metteremo opportune condizioni sul dominio Ω e sul nucleo $\mathcal{K}(x, y)$ affinché gli operatori lineari K e K^* siano limitati in un opportuno spazio di Banach (o di Hilbert) di funzioni $f(x)$ definite in Ω . In particolare, verranno considerati gli spazi $L^1(\Omega)$, $L^2(\Omega)$ e $C(\overline{\Omega})$.

Supponiamo che nell'equazione integrale (III.2) la regione Ω sia limitata in \mathbb{R}^n , la funzione f appartenga allo spazio $L^2(\Omega)$ ed il nucleo $\mathcal{K}(x, y)$ sia continuo su $\overline{\Omega} \times \overline{\Omega}$ (diremo *continui* questi nuclei).

Lemma IV.1 *L'operatore integrale K con nucleo continuo $\mathcal{K}(x, y)$ trasferisce $L^2(\Omega)$ in $C(\overline{\Omega})$ (e, di conseguenza, $C(\overline{\Omega})$ in $C(\overline{\Omega})$ e $L^2(\Omega)$ in $L^2(\Omega)$). Dunque, K è limitato come operatore lineare tra questi spazi, ed inoltre*

$$\|Kf\|_C \leq M\sqrt{m(\Omega)}\|f\|_2, \quad f \in L^2(\Omega), \quad (\text{IV.6})$$

$$\|Kf\|_C \leq Mm(\Omega)\|f\|_C, \quad f \in C(\overline{\Omega}), \quad (\text{IV.7})$$

$$\|Kf\|_2 \leq Mm(\Omega)\|f\|_2, \quad f \in L^2(\Omega), \quad (\text{IV.8})$$

dove $M = \max_{x, y \in \overline{\Omega} \times \overline{\Omega}} |\mathcal{K}(x, y)|$ e $m(\Omega)$ è la misura di Ω .

Il lemma si descrive tramite il seguente schema:

$$\begin{array}{ccccccc} C(\overline{\Omega}) & \xrightarrow{\text{imm.}} & L^2(\Omega) & \xrightarrow{\text{imm.}} & L^1(\Omega) & \xrightarrow{K} & C(\overline{\Omega}) \\ L^2(\Omega) & \xrightarrow{\text{imm.}} & L^1(\Omega) & \xrightarrow{K} & C(\overline{\Omega}) & \xrightarrow{\text{imm.}} & L^2(\Omega) \\ L^1(\Omega) & \xrightarrow{K} & C(\overline{\Omega}) & \xrightarrow{\text{imm.}} & L^2(\Omega) & \xrightarrow{\text{imm.}} & L^1(\Omega) \end{array}$$

Dimostrazione. Siccome $\overline{\Omega} \times \overline{\Omega}$ è compatto,¹ il nucleo $\mathcal{K}(x, y)$ è uniformemente continuo in $(x, y) \in \overline{\Omega} \times \overline{\Omega}$. Ci ricordiamo che una funzione continua definita su uno spazio compatto è uniformemente continua. Quindi, dato $\varepsilon > 0$, esiste $\delta > 0$ tale che $|\mathcal{K}(x_1, y_1) - \mathcal{K}(x_2, y_2)| < \varepsilon$ se $\|(x_1 - x_2, y_1 - y_2)\| < \delta$. Di conseguenza, se $f \in L^2(\Omega)$, per $|x_1 - x_2| < \delta$ si ha la stima

$$\begin{aligned} |(Kf)(x_1) - (Kf)(x_2)| &\leq \int_{\Omega} |\mathcal{K}(x_1, y) - \mathcal{K}(x_2, y)| |f(y)| dy \\ &\leq \varepsilon \int_{\Omega} |f(y)| dy \leq \varepsilon \sqrt{M(\Omega)} \|f\|_2, \end{aligned}$$

e quindi K trasferisce $L^2(\Omega)$ in $C(\overline{\Omega})$.

Per $f \in C(\overline{\Omega})$ si trova la stima

$$\|f\|_2^2 = \int_{\Omega} |f(x)|^2 dx \leq m(\Omega) \|f\|_C^2, \quad f \in C(\overline{\Omega}),$$

implicando $\|f\|_2 \leq \sqrt{m(\Omega)} \|f\|_C$. Dunque $C(\overline{\Omega})$ è contenuto in $L^2(\Omega)$, dove l'operatore di immersione è limitato di norma limitata superiormente da $\sqrt{m(\Omega)}$. \square

Cerchiamo la soluzione dell'equazione (III.2) mediante il metodo delle approssimazioni successive, ponendo $\varphi^{(0)}(x) = f(x)$,

$$\varphi^{(p)}(x) = \lambda \int_{\Omega} \mathcal{K}(x, y) \varphi^{(p-1)}(y) dy + f(x) \equiv \lambda K \varphi^{(p-1)} + f, \quad p = 1, 2, \dots \quad (\text{IV.9})$$

Quindi

$$\varphi^{(p)} = \sum_{j=0}^p \lambda^j K^j f, \quad p = 0, 1, 2, \dots, \quad (\text{IV.10})$$

dove K^j denotano le potenze j -esime dell'operatore K . Secondo il Lemma III.1, le iterazioni di $f \in L^2(\Omega)$ soddisfano la disuguaglianza

$$\begin{aligned} \|K^p f\|_2 &= \|K(K^{p-1} f)\|_2 \leq Mm(\Omega) \|K^{p-1} f\|_2 \\ &\leq (Mm(\Omega))^2 \|K^{p-2} f\|_2 \leq \dots \leq (Mm(\Omega))^p \|f\|_2, \end{aligned}$$

cioè

$$\|K^p f\|_2 \leq (Mm(\Omega))^p \|f\|_2, \quad p = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{IV.11})$$

¹Per i sottoinsiemi di uno spazio euclideo, *compatto* vuol dire *chiuso e limitato*.

Da questa disuguaglianza segue che la serie

$$\sum_{j=0}^{\infty} \lambda^j (K^j f)(x), \quad x \in \overline{\Omega}, \quad (\text{IV.12})$$

detta *serie di Neumann*, è maggiorata nella norma L^2 dalla serie numerica

$$\|f\|_2 \sum_{j=0}^{\infty} |\lambda|^j (Mm(\Omega))^j = \frac{\|f\|_2}{1 - |\lambda|Mm(\Omega)}, \quad (\text{IV.13})$$

che converge nel disco $|\lambda| < 1/Mm(\Omega)$.

Stabiliamo preliminarmente che è valida la seguente uguaglianza:

$$(Kf, g) = (f, K^*g), \quad f, g \in L^2(\Omega). \quad (\text{IV.14})$$

Infatti, se f e g appartengono a $L^2(\Omega)$, conformemente al Lemma III.1, anche Kf e K^*g appartengono a $L^2(\Omega)$ e quindi si ha

$$\begin{aligned} (Kf, g) &= \int_{\Omega} (Kf)(x) \overline{g(x)} dx = \int_{\Omega} \left[\int_{\Omega} \mathcal{K}(x, y) f(y) dy \right] \overline{g(x)} dx \\ &= \int_{\Omega} f(y) \left[\int_{\Omega} \mathcal{K}(x, y) \overline{g(x)} dx \right] dy = \int_{\Omega} f(y) \left[\int_{\Omega} \overline{\mathcal{K}^*(y, x) g(x)} dx \right] dy \\ &= \int_{\Omega} f(x) \overline{(K^*g)(x)} dx = (f, K^*g). \end{aligned}$$

Lemma IV.2 *Se K_1 e K_2 sono operatori integrali con nuclei continui $\mathcal{K}_1(x, y)$ e $\mathcal{K}_2(x, y)$, rispettivamente, l'operatore $K_3 = K_2K_1$ è un operatore integrale con nucleo continuo*

$$\mathcal{K}_3(x, y) = \int_{\Omega} \mathcal{K}_2(x, y') \mathcal{K}_1(y', y) dy'. \quad (\text{IV.15})$$

In questo caso è valida la seguente formula:

$$(K_2K_1)^* = K_1^*K_2^*. \quad (\text{IV.16})$$

Dimostrazione. Per tutte le $f \in L^2(\Omega)$ abbiamo

$$\begin{aligned} (K_3f)(x) &= (K_2K_1f)(x) = \int_{\Omega} \mathcal{K}_2(x, y') \int_{\Omega} \mathcal{K}_1(y', y) f(y) dy dy' \\ &= \int_{\Omega} \int_{\Omega} [\mathcal{K}_2(x, y') \mathcal{K}_1(y', y) dy'] f(y) dy, \end{aligned}$$

da cui segue la formula (III.15). È evidente che il nucleo $\mathcal{K}_3(x, y)$ è continuo per $(x, y) \in \overline{\Omega} \times \overline{\Omega}$. Infatti, dato $\varepsilon > 0$, per $i = 1, 2$ esiste $\delta_i > 0$ tale che

$|\mathcal{K}_i(x_1, y_1) - \mathcal{K}_i(x_2, y_2)| < \varepsilon / ([M_1 + M_2]m(\Omega))$ se $\|(x_1, y_1) - (x_2, y_2)\| < \delta_i$.
Quindi, se $\|(x_1, y_1) - (x_2, y_2)\| < \delta = \min(\delta_1, \delta_2)$, risulta

$$\begin{aligned} |\mathcal{K}_3(x_1, y_1) - \mathcal{K}_3(x_2, y_2)| &\leq \int_{\Omega} |\mathcal{K}_2(x_1, y') - \mathcal{K}_2(x_2, y')| |\mathcal{K}_1(y', y_1)| dy' \\ &+ \int_{\Omega} |\mathcal{K}_2(x_2, y')| |\mathcal{K}_1(y', y_1) - \mathcal{K}_1(y', y_2)| dy' < \frac{[M_2m(\Omega) + M_1m(\Omega)]\varepsilon}{[M_1 + M_2]m(\Omega)} = \varepsilon, \end{aligned}$$

implicando la continuità uniforme di $\mathcal{K}_3(x, y)$.

Prendendo in considerazione l'uguaglianza (III.14), per tutte le f e g appartenenti a $L^2(\Omega)$ si ottiene

$$(f, K_3^*g) = (K_3f, g) = (K_2K_1f, g) = (K_1f, K_2^*g) = (f, K_1^*K_2^*g), \quad f, g \in L^2(\Omega),$$

cioè $(f, K_3^*g - K_1^*K_2^*g) = 0$ per tutte le $f, g \in L^2(\Omega)$, e, quindi, $K_3^* = K_1^*K_2^*$, il che equivale all'uguaglianza (III.16). Il lemma è dimostrato. \square

Dal Lemma III.2 appena dimostrato segue che gli operatori $K^p = K(K^{p-1}) = (K^{p-1})K$, $p = 2, 3, \dots$, sono operatori integrali ed i loro nuclei $\mathcal{K}_p(x, y)$ sono continui e soddisfano le relazioni di ricorrenza $\mathcal{K}_1(x, y) = \mathcal{K}(x, y)$,

$$\mathcal{K}_p(x, y) = \int_{\Omega} \mathcal{K}(x, y') \mathcal{K}_{p-1}(y', y) dy' = \int_{\Omega} \mathcal{K}_{p-1}(x, y') \mathcal{K}(y', y) dy'. \quad (\text{IV.17})$$

I nuclei $\mathcal{K}_p(x, y)$ sono detti *nuclei iterati* del nucleo $\mathcal{K}(x, y)$.

Dalle relazioni di ricorrenza (III.17) segue che i nuclei iterati soddisfano la disuguaglianza

$$|\mathcal{K}_p(x, y)| \leq M^p m(\Omega)^{p-1}, \quad p = 1, 2, \dots \quad (\text{IV.18})$$

Dalla (III.18) segue che la serie

$$\sum_{p=0}^{\infty} \lambda^p \mathcal{K}_{p+1}(x, y), \quad (x, y) \in \overline{\Omega} \times \overline{\Omega}, \quad (\text{IV.19})$$

è maggiorata mediante la serie numerica

$$\sum_{p=0}^{\infty} |\lambda|^p M^{p+1} m(\Omega)^k,$$

convergente nel disco $|\lambda| < 1/Mm(\Omega)$. Perciò la serie (III.19) è uniformemente (anche totalmente) convergente in $(x, y, \lambda) \in \overline{\Omega} \times \overline{\Omega} \times \{z \in \mathbb{C} : |z| <$

$(1/Mm(\Omega) - \varepsilon)$, per $\varepsilon > 0$ qualsiasi. Di conseguenza, la sua somma è continua in $\bar{\Omega} \times \bar{\Omega} \times \{z \in \mathbb{C} : |z| < (1/Mm(\Omega))\}$ ed analitica in λ nel disco $|\lambda| < 1/Mm(\Omega)$. Indichiamo la somma della serie (III.19) con $\mathcal{R}(x, y; \lambda)$:

$$\mathcal{R}(x, y; \lambda) = \sum_{p=0}^{\infty} \lambda^p \mathcal{K}_{p+1}(x, y).$$

La funzione $\mathcal{R}(x, y; \lambda)$ è detta *risolvente* del nucleo $\mathcal{K}(x, y)$.

Teorema IV.3 *La soluzione φ dell'equazione integrale (III.2) è unica nella classe $L^2(\Omega)$ per $|\lambda| < 1/Mm(\Omega)$ e per qualunque $f \in L^2(\Omega)$ è rappresentata con il risolvente $\mathcal{R}(x, y; \lambda)$ del nucleo $\mathcal{K}(x, y)$ mediante l'equazione*

$$\varphi(x) = f(x) + \lambda \int_{\Omega} \mathcal{R}(x, y; \lambda) f(y) dy, \quad (\text{IV.20})$$

in altre parole, è valida la seguente equazione operatoriale:

$$(I - \lambda K)^{-1} = I + \lambda R(\lambda), \quad |\lambda| < (1/Mm(\Omega)), \quad (\text{IV.21})$$

dove $R(\lambda)$ è un operatore integrale con nucleo $\mathcal{R}(x, y; \lambda)$.

Si può dimostrare che il risolvente $\mathcal{R}(x, y; \lambda)$ di un nucleo continuo $\mathcal{K}(x, y)$ ammette un prolungamento meromorfo in tutto il piano della variabile complessa λ ed inoltre i suoi poli sono i numeri caratteristici del nucleo $\mathcal{K}(x, y)$.²

2 Equazioni integrali di Volterra

Supponiamo che $n = 1$, la regione G sia l'intervallo limitato $(0, a)$ ed il nucleo $\mathcal{K}(x, y)$ si annulli nel triangolo $0 < x < y < a$. Questo nucleo si dice *nucleo di Volterra*. L'equazione (III.2) con nucleo di Volterra ha la forma

$$\varphi(x) = \lambda \int_0^x \mathcal{K}(x, y) \varphi(y) dy + f(x) \quad (\text{IV.22})$$

e è detta *equazione integrale di Volterra* di seconda specie.

Supponiamo che nell'equazione (IV.22) sia $f \in C([0, a])$ e che il nucleo $\mathcal{K}(x, y)$ sia continuo nel triangolo chiuso $0 \leq y \leq x \leq a$. Allora $|\mathcal{K}(x, y)| \leq M$ per un'opportuna costante M e l'operatore integrale

$$(Kf)(x) = \int_0^x \mathcal{K}(x, y) f(y) dy$$

² λ si dice numero caratteristico di K se esiste $0 \neq \varphi \in L^1(\Omega)$ tale che $\varphi = \lambda K\varphi$. In tal caso $\lambda \neq 0$, $1/\lambda$ è autovalore di K e $\varphi \in C(\Omega)$.

trasferisce $C([0, a])$ in $C([0, a])$.

Definiamo ora le approssimazioni successive $\varphi^{(p)}$:

$$\varphi^{(0)} = f, \quad \varphi^{(p)} = \sum_{k=0}^p \lambda^k K^k f = \lambda K \varphi^{(p-1)} + f, \quad p = 1, 2, \dots \quad (\text{IV.23})$$

Le iterazioni $K^p f$ appartengono a $C([0, a])$ e soddisfano la stima

$$|(K^p f)(x)| \leq \|f\|_C \frac{(Mx)^p}{p!}, \quad x \in [0, a], \quad p = 0, 1, \dots \quad (\text{IV.24})$$

Dimostriamo la stima (III.24) per induzione rispetto a p . Per $p = 0$, la stima (III.24) è valida. Supponendola valida per $p - 1$, dimostriamo la sua validità per p :

$$\begin{aligned} |(K^p f)(x)| &= |(K(K^{p-1} f))(x)| \leq \int_0^x |\mathcal{K}(x, y)| |(K^{p-1} f)(y)| dy \\ &\leq M \|f\|_C M^{p-1} \int_0^x \frac{y^{p-1}}{(p-1)!} dy = \|f\|_C \frac{(Mx)^p}{p!}. \end{aligned}$$

Dalla stima (III.24) segue che la serie di Neumann (III.10) è maggiorata su $[0, a]$ mediante la serie numerica convergente

$$\|f\|_C \sum_{k=0}^{\infty} |\lambda|^k \frac{(Ma)^k}{k!} = \|f\|_C e^{|\lambda|Ma} \quad (\text{IV.25})$$

e per questa ragione è uniformemente (infatti, totalmente) convergente in $x \in [0, a]$ per λ qualsiasi, definendo una funzione continua $\varphi(x)$. Dunque, in virtù della (III.23), le approssimazioni successive $\varphi^{(p)}$ per $p \rightarrow \infty$ tendono uniformemente alla funzione φ :

$$\lim_{p \rightarrow \infty} \max_{x \in [0, a]} |\varphi^{(p)}(x) - \varphi(x)| = 0, \quad \varphi(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \lambda^k (K^k f)(x). \quad (\text{IV.26})$$

Qui, in virtù della (III.25), è valida la disuguaglianza

$$\|\varphi\|_C \leq \|f\|_C e^{|\lambda|Ma}. \quad (\text{IV.27})$$

Formuliamo i risultati ottenuti nella forma del seguente

Teorema IV.4 *Ogni equazione integrale di Volterra (III.22) con nucleo continuo $\mathcal{K}(x, y)$ nel triangolo $\{(x, y) : 0 \leq y \leq x \leq a\}$ per λ qualsiasi ha un'unica soluzione φ nella classe $C([0, a])$ per qualunque termine noto $f \in C([0, a])$. Questa soluzione è data dalla serie di Neumann uniformemente convergente (III.26) soddisfa la disuguaglianza (III.27). Dunque un nucleo di Volterra continuo non ha numeri caratteristici.*

Risolviamo ora l'equazione di Volterra

$$\varphi(x) = \lambda \int_0^x \varphi(y) dy + f(x), \quad 0 \leq x \leq a.$$

Se $f \in C^1([0, a])$, allora l'equazione integrale si riduce al problema di Cauchy

$$\varphi'(x) = \lambda\varphi(x) + f'(x), \quad \varphi(0) = f(0).$$

La sua soluzione unica ha la forma

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= e^{\lambda x} f(0) + \int_0^x e^{\lambda(x-y)} f'(y) dy \\ &= e^{\lambda x} f(0) + [e^{\lambda(x-y)} f(y)]_{y=0}^x + \lambda \int_0^x e^{\lambda(x-y)} f(y) dy \\ &= f(x) + \lambda \int_0^x e^{\lambda(x-y)} f(y) dy. \end{aligned}$$

Quest'ultima espressione si generalizza facilmente a $f \in C([0, a])$.

3 Equazioni Integrali con Nucleo Hermitiano

Un nucleo $\mathcal{K}(x, y)$ è detto *hermitiano* se questo nucleo coincide con il suo coniugato hermitiano, $\mathcal{K}(x, y) = \overline{\mathcal{K}^*(x, y)} = \overline{\mathcal{K}(y, x)}$. La corrispondente equazione integrale

$$\boxed{\varphi(x) = \lambda \int_{\Omega} \mathcal{K}(x, y) \varphi(y) dy + f(x)} \quad (\text{IV.28})$$

per λ reali coincide con la sua aggiunta, essendo $K^* = K$ un operatore autoaggiunto nello spazio $L^2(\Omega)$. Se il nucleo $\mathcal{K}(x, y)$ è continuo, K è anche limitato su $L^2(\Omega)$. I numeri caratteristici e le autofunzioni trovati sono anche i numeri caratteristici e le autofunzioni se la (III.28) viene considerata nello spazio $L^2(\Omega)$ per un nucleo continuo ed hermitiano qualsiasi.

a. Operatori integrali con nucleo continuo hermitiano: Compattezza. Supponiamo che K sia un operatore integrale con nucleo continuo hermitiano $\mathcal{K}(x, y)$. Quest'operatore trasferisce $L^2(\Omega)$ (Ω è una regione limitata) in $L^2(\Omega)$ (vedi il Lemma III.1) ed è autoaggiunto:

$$(Kf, g) = (f, Kg), \quad f, g \in L^2(\Omega). \quad (\text{IV.29})$$

Inversamente, se un operatore integrale K con nucleo continuo $\mathcal{K}(x, y)$ è autoaggiunto, questo nucleo è hermitiano. Infatti, dalla (III.29) (valida anche per

$f, g \in C(\overline{\Omega})$) segue che $\mathcal{K}(x, y)$ e $\mathcal{K}^*(x, y)$ sono ambedue il nucleo dell'operatore integrale K e quindi $\mathcal{K}(x, y) = \mathcal{K}^*(x, y)$ per ogni $(x, y) \in \overline{\Omega} \times \overline{\Omega}$.

Ne segue facilmente che tutti i nuclei iterati $\mathcal{K}_p(x, y)$ di un nucleo continuo hermitiano $\mathcal{K}(x, y)$ sono anch'essi hermitiani:

$$\mathcal{K}_p^*(x, y) = (\mathcal{K}^*)_p(x, y) = \mathcal{K}_p(x, y).$$

Sia M un compatto.¹ Un sottoinsieme \mathcal{M} (cioè, un insieme di funzioni continue su M) si dice *equicontinuo* su M se per ogni $\varepsilon > 0$ esiste $\delta > 0$ tale che $|f(x_1) - f(x_2)| < \varepsilon$ per ogni $f \in \mathcal{M}$, non appena $|x_1 - x_2| < \delta$ per $x_1, x_2 \in M$. In particolare, $f \in C(M)$ è (uniformemente) continua se e solo se l'insieme $\mathcal{M} = \{f\}$ è equicontinuo.

Lemma IV.5 *Un operatore integrale K con nucleo continuo $\mathcal{K}(x, y)$ trasferisce ogni insieme limitato appartenente a $L^2(\Omega)$ in un insieme limitato in $C(\overline{\Omega})$ e equicontinuo su $\overline{\Omega}$.*

Dimostrazione. Sia B un insieme limitato in $L^2(\Omega)$: $\exists A : \|f\|_p \leq A$ per ogni $f \in B$. Dal Lemma III.1 segue che $\|Kf\|_C \leq Mm(\Omega)^{1/2}A$, $f \in B$, $p = 1, 2$, e quindi K trasferisce B in un insieme limitato in $C(\overline{\Omega})$. Inoltre, visto che il nucleo $\mathcal{K}(x, y)$ è uniformemente continuo su $\overline{\Omega} \times \overline{\Omega}$, per un $\varepsilon > 0$ qualsiasi esiste $\delta > 0$ tale che

$$|\mathcal{K}(x', y) - \mathcal{K}(x'', y)| < \frac{\varepsilon}{A(m(\Omega))^{1/2}},$$

quando $|x' - x''| < \delta$ e $\{x', x'', y\} \subset \overline{\Omega}$. Da ciò, utilizzando la disuguaglianza (III.6), in cui $\mathcal{K}(x, y)$ è sostituito con $|\mathcal{K}(x', y) - \mathcal{K}(x'', y)|$, per ogni $f \in B$ si ottiene

$$\begin{aligned} |(Kf)(x') - (Kf)(x'')| &= \left| \int_{\Omega} [\mathcal{K}(x', y) - \mathcal{K}(x'', y)] f(y) dy \right| \\ &\leq \frac{\varepsilon(m(\Omega))^{(p-1)/p} \|f\|_p}{A(m(\Omega))^{(p-1)/p}} \leq \varepsilon, \end{aligned}$$

quando $|x' - x''| < \delta$ e $\{x', x'', y\} \subset \overline{\Omega}$. Ciò vuol dire che l'insieme $\{Kf : f \in B\}$ è equicontinuo su $\overline{\Omega}$. \square

Teorema IV.6 (Teorema di Ascoli-Arzelà) *Se un insieme infinito B è limitato in $C(M)$ dove M è un compatto, ed è equicontinuo su M , da quest'insieme si può estrarre una successione convergente in $C(M)$.³*

³In altre parole, se un insieme B è limitato in $C(M)$ dove M è un compatto, ed è equicontinuo su M , la sua chiusura in $C(M)$ è compatta.

Dimostrazione. Come è noto, ogni sottoinsieme chiuso e limitato in \mathbb{R}^n ha un sottoinsieme denso numerabile $\{x_n : n = 1, 2, \dots\}$. Per ipotesi, l'insieme di numeri $\{f(x_1) : f \in B\}$ è limitato. Quindi esiste una successione $\{f_k^{(1)}\}_{k=1}^\infty$ tale che $f_k^{(1)}(x_1)$ è convergente se $k \rightarrow \infty$. Inoltre, visto che l'insieme di numeri $\{f_k^{(1)}(x_2) : k = 1, 2, \dots\}$ è limitato, estraiamo dalla $\{f_k^{(1)}\}$ una sottosuccessione $\{f_k^{(2)}\}$ tale che $\{f_k^{(2)}(x_2)\}$ è convergente. Continuando così, troviamo le successioni $\{f_k^{(m)}\}$ in B , dove $n = 1, 2, \dots$ e $\{f_k^{(n+1)}\}$ è una sottosuccessione della $\{f_k^{(n)}\}$, tale che $\{f_k^{(n)}(x_n)\}$ è convergente se $n \rightarrow \infty$.

Consideriamo ora la successione diagonale $\{g_k\}$ in B dove $g_k = f_k^{(k)}$, $k = 1, 2, \dots$. Per un qualunque punto x_i la successione numerica $\{g_k(x_i)\}$ converge se $k \rightarrow \infty$, poichè, per costruzione, per $k \geq i$, questa successione è una sottosuccessione della successione convergente $\{f_k^{(i)}(x_i)\}$.

Dimostriamo ora che la successione di g_k , $k = 1, 2, \dots$, è uniformemente convergente su M . Supponiamo che sia $\varepsilon > 0$. Visto che questa successione è equicontinua su M , esiste $\delta > 0$ tale che per $k = 1, 2, \dots$ si ha

$$|g_k(x) - g_k(x')| < \frac{\varepsilon}{3} \quad (\text{IV.30})$$

quando $|x - x'| < \delta$ e $x, x' \in M$. Essendo M compatto, dall'insieme di punti x_1, x_2, \dots si può scegliere un numero finito di questi punti, x_1, x_2, \dots, x_l , $l = l(\varepsilon)$, in modo che, per ogni punto $x \in M$ esista un punto x_i , $1 \leq i \leq l$, tale che $|x - x_i| < \delta$. Ricordando che la successione di $g_k(x)$, $k = 1, 2, \dots$, converge ai punti x_1, \dots, x_l , concludiamo che esiste un numero $N = N(\varepsilon)$ tale che

$$|g_k(x_i) - g_p(x_i)| < \frac{\varepsilon}{3}, \quad k, p \geq N, \quad i = 1, 2, \dots, l. \quad (\text{IV.31})$$

Sia ora x un punto arbitrario dell'insieme M . Scegliendo un punto x_i , $1 \leq i \leq l$, tale che $|x - x_i| < \delta$, in virtù delle (III.30) e (III.31) si ottiene

$$\begin{aligned} |g_k(x) - g_p(x)| &\leq |g_k(x) - g_k(x_i)| + |g_k(x_i) - g_p(x_i)| + |g_p(x_i) - g_p(x)| \\ &< \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} = \varepsilon, \quad k, p \geq N, \end{aligned}$$

dove N non dipende da $x \in M$. Ciò significa che la successione di g_k , $k = 1, 2, \dots$, è una successione di Cauchy in $C(M)$. Siccome $C(M)$ è uno spazio di Banach, la successione converge uniformemente su M . \square

Il teorema di Ascoli-Arzelà esprime la proprietà di *compattezza* di un qualunque insieme limitato e equicontinuo in $C(M)$. Inoltre, il Lemma III.5 afferma che un operatore integrale con nucleo continuo trasferisce ogni insieme limitato in $L^2(\Omega)$ in un sottoinsieme di $C(\bar{\Omega})$ con chiusura (in $C(\bar{\Omega})$) compatta.

c. **Equazioni integrali con nucleo continuo hermitiano: Il principio variazionale.** In questo paragrafo descriviamo i numeri caratteristici di un operatore integrale con nucleo hermitiano.

Teorema IV.7 (Principio di Rayleigh-Ritz) *Per ciascun nucleo continuo hermitiano $\mathcal{K}(x, y) \not\equiv 0$ l'operatore integrale K ha almeno un numero caratteristico e il numero caratteristico λ_1 più piccolo in modulo soddisfa il principio variazionale*

$$\boxed{\frac{1}{|\lambda_1|} = \sup_{0 \neq f \in L^2(\Omega)} \frac{\|Kf\|_2}{\|f\|_2}}. \quad (\text{IV.32})$$

Dimostrazione. Sia

$$\nu = \sup_{\|f\|_2=1} \|Kf\|_2. \quad (\text{IV.33})$$

Dalla (III.8) segue che $\|Kf\|_2 \leq M m(\Omega)$ sulle funzioni di $L^2(\Omega)$ di norma 1 e quindi $\nu \leq M m(\Omega)$. È inoltre evidente che $\nu \geq 0$. Dimostriamo che $\nu > 0$. Infatti, se $\nu = 0$, allora, in virtù della (III.33), avremmo $\|Kf\|_2 = 0$, cioè $Kf = 0$ per tutte le $f \in L^2(\Omega)$, e quindi $\mathcal{K}(x, y) = 0$, $x, y \in \Omega$, il che contraddice l'ipotesi.

Dalla definizione della ν segue l'esistenza di una successione di f_k , $k = 1, 2, \dots$, $\|f_k\|_2 = 1$, tale che

$$\|Kf_k\|_2 \rightarrow \nu, \quad k \rightarrow +\infty; \quad (\text{IV.34})$$

inoltre, è valida la disuguaglianza

$$\|K^2 f\|_2 = \left\| K \left(\frac{Kf}{\|Kf\|_2} \right) \right\|_2 \|Kf\|_2 \leq \nu \|Kf\|_2, \quad f \in L^2(\Omega). \quad (\text{IV.35})$$

Dimostriamo ora che

$$K^2 f_k - \nu^2 f_k \rightarrow 0, \quad k \rightarrow +\infty, \text{ in } L^2(\Omega). \quad (\text{IV.36})$$

Infatti, utilizzando le (III.29), (III.34) e (III.35), si ottiene

$$\begin{aligned} \|K^2 f_k - \nu^2 f_k\|_2^2 &= (K^2 f_k - \nu^2 f_k, K^2 f_k - \nu^2 f_k) \\ &= (K^2 f_k, K^2 f_k) + \nu^4 (f_k, f_k) - \nu^2 (f_k, K^2 f_k) - \nu^2 (K^2 f_k, f_k) \\ &= \|K^2 f_k\|_2^2 + \nu^4 - 2\nu^2 (Kf_k, Kf_k) \\ &\leq \nu^2 \|Kf_k\|_2^2 + \nu^4 - 2\nu^2 \|Kf_k\|_2^2 \\ &= \nu^4 - \nu^2 \|Kf_k\|_2^2 \rightarrow 0, \quad k \rightarrow +\infty, \end{aligned}$$

il che è equivalente alla relazione limite (III.36).

Conformemente al Lemma III.5, la successione delle funzioni Kf_k , $k = 1, 2, \dots$, è limitata in $C(\bar{\Omega})$ e equicontinua su $\bar{\Omega}$. Ma in questo caso, **in base al teorema di Ascoli-Arzelà**, esiste anche una sottosuccessione $\psi_i = Kf_{k_i}$, $i = 1, 2, \dots$, che converge in $C(\bar{\Omega})$ ad una funzione $\psi \in C(\bar{\Omega})$, $\|\psi - \psi_i\|_C \rightarrow 0$, $i \rightarrow \infty$. Da ciò, utilizzando le (III.6) e (III.7), e la relazione (III.36), si ottiene

$$\begin{aligned} \|K^2\psi - \nu^2\psi\|_C &\leq \|K^2(\psi - \psi_i)\|_C + \nu^2\|\psi - \psi_i\|_C + \|K^2\psi_i - \nu^2\psi_i\|_C \\ &\leq M m(\Omega)\|K(\psi - \psi_i)\|_C + \nu^2\|\psi - \psi_i\|_C + \|K(K^2f_{k_i} - \nu^2f_{k_i})\|_C \\ &\leq (M^2m(\Omega)^2 + \nu^2)\|\psi - \psi_i\|_C + M\sqrt{m(\Omega)}\|K^2f_{k_i} - \nu^2f_{k_i}\|_2 \rightarrow 0, \quad i \rightarrow +\infty, \end{aligned}$$

e, di conseguenza,

$$K^2\psi = \nu^2\psi.$$

Dimostriamo che $\psi \neq 0$. Dalla relazione limite (III.36) segue che

$$K\psi_i - \nu^2f_{k_i} \rightarrow 0, \quad i \rightarrow +\infty \text{ in } L^2(\Omega),$$

e, di conseguenza, $\|K\psi_i\|_2 \rightarrow \nu^2$, $i \rightarrow +\infty$. D'altra parte, dal Lemma III.1 segue che $\|K\psi_i\|_2 \rightarrow \|K\psi\|_2$, $i \rightarrow +\infty$. Quindi, $\|K\psi\|_2 = \nu^2 > 0$, da cui segue che $\psi \neq 0$.

Dunque, la funzione ψ costruita è un'autofunzione del nucleo $\mathcal{K}_2(x, y)$ corrispondente all'autovalore ν^2 . Ma, allora, almeno uno dei numeri $\pm\nu$ è autovalore del nucleo $\mathcal{K}(x, y)$. In tal modo, il numero caratteristico λ_1 costruito è uguale a $1/\nu$ in modulo e, quindi, in virtù della (III.33), soddisfa il principio variazionale (III.32).

Non resta altro che stabilire che λ_1 è il numero caratteristico più piccolo in modulo del nucleo $\mathcal{K}(x, y)$. Infatti, se λ_0 e φ_0 sono il numero caratteristico e la corrispondente autofunzione, cioè $\lambda_0 K\varphi_0 = \varphi_0$, allora, in virtù della (III.32), si ha

$$\frac{1}{\lambda_1} = \sup_{f \in L^2(\Omega)} \frac{\|Kf\|_2}{\|f\|_2} \geq \frac{\|K\varphi_0\|_2}{\|\varphi_0\|_2} = \frac{1}{|\lambda_0|},$$

e quindi $|\lambda_1| \leq |\lambda_0|$. □

Considerando il teorema sopra dimostrato, per le equazioni integrali con nucleo continuo hermitiano $\mathcal{K}(x, y) \not\equiv 0$, si ottengono le seguenti asserzioni:

L'insieme dei numeri caratteristici $\{\lambda_k\}$ non è vuoto, è situato sull'asse reale, e non ha punti di accumulazione finiti; ogni numero caratteristico è di molteplicità finita ed il sistema di autofunzioni $\{\varphi_k\}$ può essere scelto ortonormale:

$$(\varphi_k, \varphi_i) = \delta_{k,i}. \tag{IV.37}$$

Se $\lambda \neq \lambda_k$, $k = 1, 2, \dots$, l'equazione (III.28) è univocamente risolvibile per un termine noto $f \in C(\overline{\Omega})$ qualsiasi. Se $\lambda = \lambda_k$, per la risolvibilità dell'equazione (III.28) è necessario e sufficiente che

$$(f, \varphi_{k+1}) = 0, \quad i = 0, 1, \dots, r_k - 1, \quad (\text{IV.38})$$

dove $\varphi_k, \varphi_{k+1}, \dots, \varphi_{k+r_k-1}$ sono autofunzioni corrispondenti al numero caratteristico λ_k e r_k è la molteplicità di λ_k .

Sia $\mathcal{K}(x, y) \not\equiv 0$ un nucleo integrale hermitiano e sia K il corrispondente operatore integrale in $L^2(\Omega)$. Allora esistono un numero caratteristico $0 \neq \lambda_1 \in \mathbb{R}$ e un'autofunzione $\varphi_1 \in L^2(\Omega)$ di norma 1 tali che

$$\frac{1}{|\lambda_1|} = \sup_{\|f\|_2=1} \|Kf\|_2 = \|K\varphi_1\|.$$

Poniamo

$$\mathcal{K}_1(x, y) = \mathcal{K}(x, y) - \frac{\varphi_1(x)\overline{\varphi_1(y)}}{\lambda_1}.$$

Se $\mathcal{K}_1(x, y) \equiv 0$, allora λ_1 è l'unico numero caratteristico di K e $\mathcal{K}(x, y) = \varphi_1(x)\overline{\varphi_1(y)}/\lambda_1$ è un nucleo degenero. Se $\mathcal{K}_1(x, y) \not\equiv 0$ e K_1 è il corrispondente operatore integrale, allora esistono un numero caratteristico $0 \neq \lambda_2 \in \mathbb{R}$ con $|\lambda_1| \leq |\lambda_2|$ e un'autofunzione $\varphi_2 \in L^2(\Omega)$ di norma 1 e ortogonale a φ_1 tali che

$$\frac{1}{|\lambda_2|} = \sup_{\|f\|_2=1} \|K_1 f\|_2 = \|K\varphi_2\|.$$

Poniamo

$$\mathcal{K}_2(x, y) = \mathcal{K}_1(x, y) - \frac{\varphi_2(x)\overline{\varphi_2(y)}}{\lambda_2}.$$

Se $\mathcal{K}_2(x, y) \equiv 0$, allora λ_1 e λ_2 sono gli unici numeri caratteristici di K e

$$\mathcal{K}(x, y) = \sum_{j=1}^2 \frac{\varphi_j(x)\overline{\varphi_j(y)}}{\lambda_j}.$$

Se $\mathcal{K}_2(x, y) \not\equiv 0$ e K_2 è il corrispondente operatore integrale, allora esistono un numero caratteristico $0 \neq \lambda_3 \in \mathbb{R}$ con $|\lambda_1| \leq |\lambda_2| \leq |\lambda_3|$ e un'autofunzione $\varphi_3 \in L^2(\Omega)$ di norma 1 e ortogonale a φ_1 e φ_2 tali che

$$\frac{1}{|\lambda_3|} = \sup_{\|f\|_2=1} \|K_2 f\|_2 = \|K\varphi_3\|,$$

ECC. Supponiamo di aver trovato i numeri caratteristici $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ (con $0 < |\lambda_1| \leq \dots \leq |\lambda_p|$) e il sistema ortonormale $\{\varphi_1, \dots, \varphi_p\}$ tali che $\lambda_j = \lambda_j K \varphi_j$ ($j = 1, \dots, p$). Poniamo

$$\mathcal{K}_p(x, y) = \mathcal{K}_{p-1}(x, y) - \frac{\varphi_p(x) \overline{\varphi_p(y)}}{\lambda_p}.$$

Se $\mathcal{K}_p(x, y) \equiv 0$, allora $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ sono gli unici numeri caratteristici di K e

$$\mathcal{K}(x, y) = \sum_{j=1}^p \frac{\varphi_j(x) \overline{\varphi_j(y)}}{\lambda_j}.$$

Se $\mathcal{K}_p(x, y) \not\equiv 0$ e K_p è il corrispondente operatore integrale, allora esistono un numero caratteristico $0 \neq \lambda_{p+1} \in \mathbb{R}$ con $|\lambda_1| \leq |\lambda_2| \leq \dots \leq |\lambda_p| \leq |\lambda_{p+1}|$ e un'autofunzione $\varphi_{p+1} \in L^2(\Omega)$ di norma 1 e ortogonale a $\varphi_1, \dots, \varphi_p$ tali che

$$\frac{1}{|\lambda_{p+1}|} = \sup_{\|f\|_2=1} \|K_p f\|_2 = \|K \varphi_{p+1}\|.$$

Se l'applicazione ripetuta del principio di Rayleigh-Ritz viene abortito dopo p passaggi, abbiamo trovato tutti i p numeri caratteristici $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ (con $0 < |\lambda_1| \leq \dots \leq |\lambda_p|$) con il corrispondente sistema ortonormale di autofunzioni $\varphi_1, \dots, \varphi_p$, mentre il nucleo integrale di partenza

$$\mathcal{K}(x, y) = \sum_{j=1}^p \frac{\varphi_j(x) \overline{\varphi_j(y)}}{\lambda_j}$$

è degenere. Se non si abortisce la procedura, troviamo un numero infinito di numeri caratteristici $\{\lambda_j\}_{j=1}^{\infty}$ in ordine di valor assoluto crescente con il corrispondente sistema ortonormale $\{\varphi_j\}_{j=1}^{\infty}$ di autofunzioni. Almeno formalmente si può scrivere

$$\mathcal{K}(x, y) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\varphi_j(x) \overline{\varphi_j(y)}}{\lambda_j}.$$

In tutti i casi vale

$$\frac{1}{|\lambda_j|} = \sup_{\substack{\|f\|_2=1 \\ f \perp \varphi_1, \dots, f \perp \varphi_{j-1}}} \|K f\|_2 = \|K \varphi_j\|_2,$$

dove $j = 2, 3, \dots, p \leq +\infty$.

Studiamo ora la condizione sotto cui è una **base** ortonormale il sistema ortonormale delle autofunzioni φ_j . Se $K\psi = 0$, allora

$$(\psi, \varphi_j) = \frac{1}{\lambda_j}(\psi, K\varphi_j) = \frac{1}{\lambda_j}(K\psi, \varphi_j) = 0.$$

D'altra parte, se $(\psi, \varphi_j) = 0$ per ogni j , allora

$$K\psi = \sum_j (\psi, \varphi_j)\varphi_j = 0.$$

In altre parole,

$$\{\psi \in L^2(\Omega) : K\psi = 0\} = \{\psi \in L^2(\Omega) : \psi \perp \varphi_j \text{ per ogni } j\}.$$

Di conseguenza, $\{\varphi_j\}_{j=1}^{\infty}$ è una base ortonormale se e solo se $\psi = 0$ è l'unico vettore ortogonale a tutte le autofunzioni φ_j se e solo se $\psi = 0$ è l'unico vettore tale che $K\psi = 0$. Dunque $\{\varphi_j\}_{j=1}^{\infty}$ è base ortonormale di $L^2(\Omega)$ se e solo se zero non è autovalore di K .

4 Teorema di Hilbert-Schmidt

Supponiamo che $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ siano i numeri caratteristici del nucleo continuo hermitiano $\mathcal{K}(x, y) \not\equiv 0$ disposti in ordine di crescita del loro modulo, $|\lambda_1| \leq |\lambda_2| \leq \dots$, e che $\varphi_1, \varphi_2, \dots$ siano le corrispondenti autofunzioni ortonormali, $(\varphi_k, \varphi_i) = \delta_{ki}$.

Come sappiamo, i numeri caratteristici λ_k sono reali e le autofunzioni $\varphi_k(x)$ sono continue su $\bar{\Omega}$; in questo caso l'insieme $\{\lambda_k\}$ è finito o numerabile; nell'ultimo caso si ha $|\lambda_k| \rightarrow \infty, k \rightarrow \infty$. Inoltre, in virtù della (III.32), è valida la disuguaglianza

$$\|Kf\|_2 \leq \frac{1}{|\lambda_1|} \|f\|_2, \quad f \in L^2(\Omega). \quad (\text{IV.39})$$

Notiamo un'altra disuguaglianza, e cioè⁴

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{|\varphi_k(x)|^2}{\lambda_k^2} \leq \int_{\Omega} |\mathcal{K}(x, y)|^2 dy, \quad x \in \bar{\Omega}. \quad (\text{IV.40})$$

Nel seguito verrà infatti dimostrato che vale l'uguaglianza nella (III.40).

⁴Se il nucleo $\mathcal{K}(x, y)$ ha un numero finito di numeri caratteristici $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$, poniamo $\lambda_k = +\infty$ per $k > N$.

Introduciamo ora la successione di nuclei continui hermitiani

$$\mathcal{K}^{(p)}(x, y) = \mathcal{K}(x, y) - \sum_{i=1}^p \frac{\varphi_i(x)\overline{\varphi_i(y)}}{\lambda_i}, \quad p = 1, 2, \dots, \quad . \quad (\text{IV.41})$$

I corrispondenti operatori integrali $K^{(p)}$ hermitiani soddisfano

$$K^{(p)}f = Kf - \sum_{i=1}^p \frac{(f, \varphi_i)}{\lambda_i} \varphi_i, \quad f \in L^2(\Omega). \quad (\text{IV.42})$$

Dimostriamo che $\lambda_{p+1}, \lambda_{p+2}, \dots$, e $\varphi_{p+1}, \varphi_{p+2}, \dots$ costituiscono tutti i numeri caratteristici e tutte le autofunzioni del nucleo $\mathcal{K}^{(p)}(x, y)$. Infatti, in virtù della (III.42) abbiamo

$$K^{(p)}\varphi_k = K\varphi_k - \sum_{i=1}^p \frac{(\varphi_k, \varphi_i)}{\lambda_i} \varphi_i = K\varphi_k = \frac{1}{\lambda_k} \varphi_k, \quad k \geq p+1,$$

di modo che λ_k e φ_k , $k \geq p+1$, siano numeri caratteristici ed autofunzioni del nucleo $\mathcal{K}^{(p)}(x, y)$. Inversamente, siano λ_0 e φ_0 un numero caratteristico e la corrispondente autofunzione del nucleo $\mathcal{K}^{(p)}(x, y)$, e cioè, in virtù della (III.42), si avrà

$$\varphi_0 = \lambda_0 K^{(p)}\varphi_0 = \lambda_0 K\varphi_0 - \lambda_0 \sum_{i=1}^p \frac{(\varphi_0, \varphi_i)}{\lambda_i} \varphi_i. \quad (\text{IV.43})$$

Da qui per $k = 1, 2, \dots, p$ si ottiene

$$\begin{aligned} (\varphi_0, \varphi_k) &= \lambda_0 (K\varphi_0, \varphi_k) - \lambda_0 \sum_{i=1}^p \frac{(\varphi_0, \varphi_i)(\varphi_i, \varphi_k)}{\lambda_i} \\ &= \lambda_0 (\varphi_0, K\varphi_k) - \lambda_0 \sum_{i=1}^p \frac{(\varphi_0, \varphi_i)}{\lambda_i} \delta_{ik} = \frac{\lambda_0}{\lambda_k} (\varphi_0, \varphi_k) - \frac{\lambda_0}{\lambda_k} (\varphi_0, \varphi_k) = 0, \end{aligned}$$

e quindi, in virtù della (III.43), $\lambda_0 = \lambda_0 K\varphi_0$. Dunque, λ_0 e φ_0 sono il numero caratteristico e la corrispondente autofunzione del nucleo $\mathcal{K}(x, y)$. Visto che φ_0 è ortogonale a tutte le autofunzioni $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$, ne segue che λ_0 coincide con uno dei numeri caratteristici $\lambda_{p+1}, \lambda_{p+2}, \dots$ e φ_0 può essere considerata uguale a φ_k per $k \geq p+1$. Dunque, λ_{p+1} è il numero caratteristico più piccolo del nucleo $\mathcal{K}^{(p)}(x, y)$ in modulo. Applicando la disuguaglianza (III.39) a questo nucleo e tenendo conto della (III.42), si ottiene la disuguaglianza

$$\|K^{(p)}f\|_2 = \left\| Kf - \sum_{i=1}^p \frac{(f, \varphi_i)}{\lambda_i} \varphi_i \right\|_2 \leq \frac{\|f\|_2}{|\lambda_{p+1}|}, \quad f \in L^2(\Omega), \quad (\text{IV.44})$$

dove $p = 1, 2, \dots$.

Supponiamo che il nucleo hermitiano $\mathcal{K}(x, y)$ abbia un numero finito di numeri caratteristici: $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$. Da quanto abbiamo dimostrato, il nucleo hermitiano $\mathcal{K}^{(N)}(x, y)$ non ha numeri caratteristici, e quindi, in base al Teorema III.7, si ha $\mathcal{K}^{(N)}(x, y) \equiv 0$, in modo che, in virtù della (III.41), si ha

$$\mathcal{K}(x, y) = \sum_{i=1}^N \frac{\varphi_i(x)\overline{\varphi_i(y)}}{\lambda_i}, \quad (\text{IV.45})$$

il che significa che il nucleo $\mathcal{K}(x, y)$ è degenere.

Da ciò, e ricordando anche che un nucleo degenere ha sempre un numero finito di numeri caratteristici, formuliamo il seguente risultato: *affinché un nucleo continuo hermitiano sia degenere, è necessario e sufficiente che questo nucleo abbia un numero finito di numeri caratteristici.*

Dimostriamo che *il nucleo iterato $\mathcal{K}_2(x, y)$ di un nucleo continuo hermitiano $\mathcal{K}(x, y)$ può essere sviluppato in una serie bilineare in termini delle autofunzioni di questo nucleo,*

$$\mathcal{K}_2(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\varphi_k(x)\overline{\varphi_k(y)}}{\lambda_k^2}, \quad (\text{IV.46})$$

e la serie è uniformemente convergente su $\overline{\Omega} \times \overline{\Omega}$.

Tenendo conto del fatto che, in virtù della (III.17), si ha

$$\mathcal{K}_2(x, y) = \int_{\Omega} \mathcal{K}(x, y')\mathcal{K}(y', x) dy' = \int_{\Omega} \mathcal{K}(x, y')\overline{\mathcal{K}(x, y')} dy' = \int_{\Omega} |\mathcal{K}(x, y)|^2 dy,$$

si ottiene l'uguaglianza

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{|\varphi_k(x)|^2}{\lambda_k^2} = \int_{\Omega} |\mathcal{K}(x, y)|^2 dy. \quad (\text{IV.47})$$

Dal teorema di Dini⁵ segue che la serie (III.47) è uniformemente convergente in $x \in \overline{\Omega}$, poichè la parte a destra è una funzione continua in $x \in \overline{\Omega}$. Integrando termine a termine la serie uniformemente convergente (III.47) e tenendo conto della normalizzazione delle autofunzioni, si ottiene la formula

$$\boxed{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k^2} = \int_{\Omega} \int_{\Omega} |\mathcal{K}(x, y)|^2 dx dy.} \quad (\text{IV.48})$$

Dimostriamo ora il seguente risultato.

⁵Teorema di Dini: Sia $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ una successione *crescente* di funzioni continue definite su un compatto. Se esiste $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ e f è continua sul compatto, allora la convergenza è uniforme.

Teorema IV.8 (Teorema di Hilbert-Schmidt) *Se una funzione f appartiene all'immagine di un operatore integrale K di nucleo continuo hermitiano $\mathcal{K}(x, y)$, cioè $f = Kh$, la sua serie in termini delle autofunzioni del nucleo $\mathcal{K}(x, y)$ è uniformemente convergente su \overline{G} alla funzione*

$$f(x) = \sum_{k=1}^{\infty} (f, \varphi_k) \varphi_k(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(h, \varphi_k)}{\lambda_k} \varphi_k(x). \quad (\text{IV.49})$$

Dimostrazione. Visto che $f = Kh$, $h \in L^2(G)$, in base al Lemma III.1, $f \in C(\overline{G})$ ed i coefficienti di Fourier delle funzioni f e h in termini delle autofunzioni $\{\varphi_k\}$ del nucleo $\mathcal{K}(x, y)$ sono collegati con la relazione

$$(f, \varphi_k) = (Kh, \varphi_k) = (h, K\varphi_k) = \frac{(h, \varphi_k)}{\lambda_k}. \quad (\text{IV.50})$$

Se il nucleo $\mathcal{K}(x, y)$ ha un numero finito di autovalori, si ha, in virtù della (III.45),

$$f(x) = (Kh)(x) = \sum_{k=1}^N \frac{(h, \varphi_k)}{\lambda_k} \varphi_k(x),$$

ed il teorema di Hilbert-Schmidt è dimostrato.

Supponiamo ora che il nucleo $\mathcal{K}(x, y)$ abbia un numero infinito di autovalori. In questo caso $|\lambda_k| \rightarrow +\infty$, $k \rightarrow +\infty$. Perciò la serie (III.49) converge a f nella norma di $L^2(G)$:

$$\left\| f - \sum_{k=1}^p (f, \varphi_k) \varphi_k \right\|_2 = \left\| Kh - \sum_{k=1}^p \frac{(h, \varphi_k)}{\lambda_k} \varphi_k \right\|_2 \leq \frac{\|h\|_2}{|\lambda_{p+1}|} \rightarrow 0, \quad p \rightarrow +\infty.$$

Resta da dimostrare che la serie (III.49) converge in modo uniforme su \overline{G} . Utilizzando la disuguaglianza di Schwartz e la (III.40), si ottiene, per tutti i valori di p e q e per ogni $x \in \overline{G}$,

$$\begin{aligned} \sum_{k=p}^q |(h, \varphi_k)| \left| \frac{\varphi_k(x)}{\lambda_k} \right| &\leq \left[\sum_{k=p}^q |(h, \varphi_k)|^2 \right]^{1/2} \left[\sum_{k=p}^q \frac{|\varphi_k(x)|^2}{\lambda_k^2} \right]^{1/2} \\ &\leq \left[\sum_{k=p}^q |(h, \varphi_k)|^2 \right]^{1/2} \left[\int_G |\mathcal{K}(x, y)|^2 dy \right]^{1/2} \leq M \sqrt{m(G)} \left[\sum_{k=p}^q |(h, \varphi_k)|^2 \right]^{1/2}. \end{aligned} \quad (\text{IV.51})$$

Il primo membro della disuguaglianza (III.51) tende a zero per $p, q \rightarrow +\infty$. Ciò significa che la serie (III.49) è puntualmente convergente su \overline{G} . Siccome il maggiorante in (III.51) non dipende da $x \in \overline{G}$, la convergenza risulta uniforme in $x \in \overline{G}$. \square

Capitolo V

PROBLEMI DI STURM-LIOUVILLE

Prima di studiare alcuni problemi al contorno per le equazioni di tipo ellittico (in particolare le equazioni di Laplace, di Poisson, delle onde e di Schrödinger nello spazio e nel piano), trattiamo i corrispondenti problemi unidimensionali.

1 Problema di Sturm-Liouville

Il cosiddetto *problema di Sturm-Liouville* ha la forma¹

$$Lu \stackrel{\text{def}}{=} -(pu')' + qu = \lambda u, \quad 0 < x < \ell, \quad (\text{V.1})$$

$$h_1 u(0) - h_2 u'(0) = 0, \quad H_1 u(\ell) + H_2 u'(\ell) = 0, \quad (\text{V.2})$$

dove h_1, h_2, H_1, H_2 sono costanti non negative tali che $h_1 + h_2 > 0$ e $H_1 + H_2 > 0$.² Assumiamo che $p \in C^1[0, \ell]$, $p(x) > 0$ per ogni $x \in [0, \ell]$, e $q \in C[0, \ell]$ è reale. Come dominio dell'operatore L prendiamo

$$\mathcal{M}_L = \left\{ u \in C^2(0, \ell) \cap C^1[0, \ell] : \begin{array}{l} u'' \in L^2(0, \ell) \\ h_1 u(0) - h_2 u'(0) = 0 \\ H_1 u(\ell) + H_2 u'(\ell) = 0 \end{array} \right\}.$$

Se $h_2 = H_2 = 0$ (cioè $u(0) = u(\ell) = 0$), abbiamo le *condizioni di Dirichlet*. Se $h_1 = H_1 = 0$ (cioè $u'(0) = u'(\ell)$), stiamo parlando delle *condizioni di Neumann*. Gli altri casi si dicono *condizioni miste* oppure *condizioni di Robin*.

¹Ci limitiamo ora al problema di Sturm-Liouville con condizioni al contorno separate.

²Potremmo scegliere angoli $\alpha, \beta \in [0, \frac{\pi}{2}]$ tali che $h_1 = \cos \alpha$, $h_2 = \sin \alpha$, $H_1 = \cos \beta$ e $H_2 = \sin \beta$.

L'operatore L è hermitiano, cioè $(Lf, g) = (f, Lg)$ per ogni $f, g \in \mathcal{M}_L$. Infatti,

$$\begin{aligned} (Lf, g) - (f, Lg) &= \int_0^\ell [-(pf')'\bar{g} + qf\bar{g}] dx - \int_0^\ell [-f(p\bar{g}')' + f(q\bar{g})] dx \\ &= [-(pf')\bar{g} + f(p\bar{g}')]_0^\ell + \int_0^\ell [pf'\bar{g}' - f'p\bar{g}'] dx \\ &= [-(pf')\bar{g} + f(p\bar{g}')]_0^\ell = [p(f\bar{g}' - f'\bar{g})]_0^\ell, \end{aligned}$$

la quale si cancella se le condizioni (IV.2) sono ambedue di tipo Dirichlet o Neumann (se non valgono $h_1, h_2 \in (0, 1)$ e $H_1, H_2 \in (0, 1)$). Per $h_2, H_2 > 0$, sostituiamo $f'(\ell) = (-H_1/H_2)f(\ell)$ e $f'(0) = (h_1/h_2)f(0)$ e analogamente $g'(\ell) = (-H_1/H_2)g(\ell)$ e $g'(0) = (h_1/h_2)g(0)$, risultando in $(Lf, g) - (f, Lg) = 0$.

L'integrale d'energia assume la seguente forma:

$$(Lf, f) = \int_0^\ell (p|f'|^2 + q|f|^2) dx + \frac{h_1}{h_2}p(0)|f(0)|^2 + \frac{H_1}{H_2}p(\ell)|f(\ell)|^2, \quad f \in \mathcal{M}_L, \quad (\text{V.3})$$

dove gli ultimi termini del secondo membro si annullano per $h_2 = 0$ o per $H_2 = 0$, rispettivamente. Se $q(x) \geq q_{min}$ per ogni $x \in [0, \ell]$, l'integrale d'energia (Lf, f) soddisfa

$$(Lf, f) \geq q_{min}\|f\|_2^2, \quad f \in \mathcal{M}_L.$$

Quindi tutti gli autovalori di L (che hanno un'autofunzione in \mathcal{M}_L) sono reali e cadono nell'intervallo $[q_{min}, +\infty)$. Se q_{min} fosse un autovalore di L con la corrispondente autofunzione $0 \neq f \in \mathcal{M}_L$, allora la (IV.3) implicherebbe che valgono le condizioni di Neumann negli estremi dell'intervallo ($h_2 = H_2 = 0$), $q(x) \equiv q_{min}$ è costante e l'autofunzione stessa è costante. In tutti gli altri casi gli autovalori cadono nell'intervallo $(q_{min}, +\infty)$.

1.1 Funzione di Green

Supponiamo che $\lambda = 0$ non sia un autovalore dell'operatore L . Consideriamo il problema al contorno

$$Lu \equiv -(pu')' + qu = f(x), \quad 0 < x < \ell, \quad (\text{V.4})$$

$$h_1u(0) - h_2u'(0) = 0, \quad H_1u(\ell) + H_2u'(\ell) = 0, \quad (\text{V.5})$$

dove $f \in C(0, \ell) \cap L^2(0, \ell)$. Dato che $\lambda = 0$ non è autovalore dell'operatore L , la soluzione del problema al contorno (IV.4)-(IV.5) nella classe \mathcal{M}_L è unica. Costruiamo ora la soluzione di questo problema.

Siano v_1 e v_2 soluzioni non nulle (reali) dell'equazione omogenea $Lv = 0$ che soddisfano le condizioni

$$h_1 v_1(0) - h_2 v_1'(0) = 0, \quad H_1 v_2(\ell) + H_2 v_2'(\ell) = 0. \quad (\text{V.6})$$

Dalla teoria delle equazioni differenziali lineari ordinarie segue che queste soluzioni esistono ed appartengono alla classe $C^2[0, \ell]$. Le soluzioni lineari v_1 e v_2 sono linearmente indipendenti. Infatti, nel caso contrario $v_1(x) = cv_2(x)$ per qualche $0 \neq c \in \mathbb{R}$ e, di conseguenza, in base alla (IV.6) la soluzione v_1 soddisfa anche la seconda condizione al contorno (IV.5). Ciò significa che v_1 è un'autofunzione dell'operatore L corrispondente all'autovalore $\lambda = 0$, contrariamente all'ipotesi; inoltre segue che in tal caso $v_1 \in \mathcal{M}_L$. Perciò il determinante Wronskiano vale

$$w(x) = \det \begin{bmatrix} v_1(x) & v_2(x) \\ v_1'(x) & v_2'(x) \end{bmatrix} \neq 0, \quad x \in [0, \ell].$$

Allora è $(pw)'(x) = (v_1(pv_2') - v_2(pv_1'))' = v_1(pv_2')' - v_2(pv_1')' = -v_1qv_2 + v_2qv_1 \equiv 0$. Quindi risulta l'identità

$$pw \equiv p(0)w(0), \quad x \in [0, \ell]. \quad (\text{V.7})$$

Cercheremo la soluzione del problema (IV.4)-(IV.5) per mezzo del metodo della variazione delle costanti,

$$u(x) = c_1(x)v_1(x) + c_2(x)v_2(x). \quad (\text{V.8})$$

Allora $c_1'(x)$ e $c_2'(x)$ soddisfano il sistema lineare

$$\begin{bmatrix} v_1(x) & v_2(x) \\ v_1'(x) & v_2'(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1'(x) \\ c_2'(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -f(x)/p(x) \end{bmatrix} \quad (\text{V.9})$$

con determinante $w(x) \neq 0$. Risolvendo questo sistema ed utilizzando l'identità (IV.7), si ottiene

$$c_1'(x) = \frac{v_2(x)f(x)}{pw}, \quad c_2'(x) = -\frac{v_1(x)f(x)}{pw}. \quad (\text{V.10})$$

Per soddisfare le condizioni al contorno (IV.5), osserviamo che esistono due costanti d'integrazione c_1 e c_2 tali che

$$u(x) = c_1 v_1(x) + c_2 v_2(x) - \frac{v_1(x)}{pw} \int_x^\ell v_2(y) f(y) dy - \frac{v_2(x)}{pw} \int_0^x v_1(y) f(y) dy.$$

Calcolando la derivata si trova

$$u'(x) = c_1 v_1'(x) + c_2 v_2'(x) - \frac{v_1'(x)}{pw} \int_x^\ell f(y) v_2(y) dy - \frac{v_2'(x)}{pw} \int_0^x v_1(y) f(y) dy.$$

Tenendo conto dalle condizioni (IV.6), otteniamo

$$\begin{aligned} 0 &= h_1 u(0) - h_2 u'(0) = c_1 [h_1 v_2(0) - h_2 v_2'(0)]; \\ 0 &= H_1 u(\ell) + H_2 u'(\ell) = c_1 [H_1 v_2(\ell) + H_2 v_2'(\ell)], \end{aligned}$$

e quindi, in virtù del fatto che le espressioni tra parentesi quadrate non si annullano, troviamo $c_1 = c_2 = 0$. In altre parole,

$$u(x) = \int_0^\ell \mathcal{G}(x, y) f(y) dy, \quad (\text{V.11})$$

dove

$$\begin{aligned} \mathcal{G}(x, y) &= -\frac{1}{pw} \begin{cases} v_1(x) v_2(y), & 0 \leq x < y \leq \ell, \\ v_2(x) v_1(y), & 0 \leq y < x \leq \ell, \end{cases} \\ &= -\frac{1}{pw} v_1(\min(x, y)) v_2(\max(x, y)). \end{aligned} \quad (\text{V.12})$$

La funzione $\mathcal{G}(x, y)$ è detta *funzione di Green* del problema al contorno (IV.4)-(IV.5) o dell'operatore L . Questo nucleo è reale, simmetrico e continuo. Inoltre, vale l'uguaglianza

$$\frac{\partial \mathcal{G}(y+0, y)}{\partial x} - \frac{\partial \mathcal{G}(y-0, y)}{\partial x} = -\frac{w(y)}{pw} = -\frac{1}{p(y)}, \quad y \in (0, \ell). \quad (\text{V.13})$$

Consideriamo l'operatore integrale G su $L^2(0, \ell)$ con nucleo $\mathcal{G}(x, y)$. Allora questo nucleo è reale, simmetrico e continuo. Dunque G è un operatore lineare autoaggiunto sullo spazio di Hilbert $L^2(0, \ell)$. Siccome $u = Gf$ appartiene ad \mathcal{M}_L per ogni $f \in C(0, \ell) \cap L^2(0, \ell)$, il dominio \mathcal{M}_L è strettamente contenuto nell'immagine dell'operatore integrale G . Ne segue facilmente che l'immagine di G (cioè, $\{Gf : f \in L^2(0, \ell)\}$) coincide con il dominio dell'estensione autoaggiunta \bar{L} di L . Infatti, $\bar{L} = G^{-1}$.

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{M}_L = D(L) & \xrightarrow{L} & C[0, \ell] \\ \text{imm.} \downarrow & & \downarrow \text{imm.} \\ G[L^2(0, \ell)] = D(\bar{L}) & \xrightarrow{\bar{L}=G^{-1}} & L^2(0, \ell) \end{array}$$

Nel caso in cui $\lambda = 0$ è autovalore del problema (IV.4)-(IV.5), bisogna scegliere qualche $\mu \in \mathbb{R}$ che non è autovalore, e riscrivere (IV.4)-(IV.5) nella forma equivalente

$$(L - \mu)u \equiv -(pu')' + (q - \mu)u = f(x) - \mu u(x), \quad 0 < x < \ell, \quad (\text{V.14})$$

$$h_1 u(0) - h_2 u'(0) = 0, \quad H_1 u(\ell) + H_2 u'(\ell) = 0. \quad (\text{V.15})$$

Partendo dalle due soluzioni v_1 e v_2 dell'equazione omogenea $(L - \mu)u = 0$ che soddisfano le condizioni (IV.6) e quindi sono linearmente indipendenti, arriviamo ad una funzione di Green $\mathcal{G}(x, y; \mu)$ ed un operatore integrale $G(\mu)$ dipendente di μ tali che

$$u = G(\mu) [f - \mu u].$$

Quest'ultima si può scrivere nella forma dell'equazione integrale di Fredholm

$$u(x) + \mu \int_0^\ell \mathcal{G}(x, y; \mu) u(y) dy = \int_0^\ell \mathcal{G}(x, y; \mu) f(y) dy, \quad 0 \leq x \leq \ell. \quad (\text{V.16})$$

Il dominio dell'estensione autoaggiunta \bar{L} di L [o di $L - \mu$] coincide con l'immagine dell'operatore integrale $G(\mu)$.

Esempio V.9 Consideriamo il problema di Sturm-Liouville

$$-u'' = f(x), \quad h_1 u(0) - h_2 u'(0) = 0, \quad H_1 u(\ell) + H_2 u'(\ell) = 0.$$

Le soluzioni v_1 e v_2 dell'equazione omogenea $-u'' = 0$ che soddisfano le condizioni (IV.6), hanno la forma (tranne un fattore costante)

$$v_1(x) = h_1 x + h_2, \quad v_2(x) = H_1 \ell + H_2 - H_1 x,$$

e quindi $w(x) = -h_1(H_1 \ell + H_2) - h_2 H_1$ si annulla se e solo se $h_1 = H_1 = 0$ (cioè, condizioni di Neumann in ambedue gli estremi). Se $h_1 + H_1 > 0$, si trova per la funzione di Green

$$\mathcal{G}(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{h_1(H_1 \ell + H_2) + h_2 H_1} [h_1 x + x_2] [H_1(\ell - y) + H_2], & 0 \leq x < y \leq \ell, \\ \frac{1}{h_1(H_1 \ell + H_2) + h_2 H_1} [H_1(\ell - x) + H_2] [h_1 y + h_2], & 0 \leq y < x \leq \ell. \end{cases}$$

Per trovare gli autovalori, cerchiamo le soluzioni $v_1(x, \lambda)$ e $v_2(x, \lambda)$ dell'equazione omogenea $-u'' = \lambda u$ che soddisfano le condizioni (IV.6), mentre $\lambda > 0$. Otteniamo

$$\begin{aligned} v_1(x, \lambda) &= h_2 \sqrt{\lambda} \cos(x\sqrt{\lambda}) + h_1 \sin(x\sqrt{\lambda}); \\ v_2(x, \lambda) &= H_2 \sqrt{\lambda} \cos((\ell - x)\sqrt{\lambda}) + H_1 \sin((\ell - x)\sqrt{\lambda}), \end{aligned}$$

e quindi

$$\begin{aligned} w(x) &= v_1(0, \lambda)v_2'(0, \lambda) - v_1'(0, \lambda)v_2(0, \lambda) \\ &= \sqrt{\lambda} \left[(h_2H_2\lambda - h_1H_1) \sin(\ell\sqrt{\lambda}) - (h_2H_1 + h_1H_2) \sqrt{\lambda} \cos(\ell\sqrt{\lambda}) \right]. \end{aligned}$$

Un numero $\lambda > 0$ è autovalore se e solo se $w(x) \equiv 0$. Sotto le condizioni di Dirichlet ($h_2 = H_2 = 0$) e sotto quelle di Neumann ($h_1 = H_1 = 0$) segue

$$\sin(\ell\sqrt{\lambda}) = 0.$$

Quindi gli autovalori e le autofunzioni sono

$$\lambda_n = \left(\frac{n\pi}{\ell}\right)^2, \quad \begin{cases} n = 1, 2, 3, \dots, & u_n(x) = \sin\left(\frac{n\pi x}{\ell}\right), \quad [\text{Dirichlet}] \\ n = 0, 1, 2, \dots, & u_n(x) = \cos\left(\frac{n\pi x}{\ell}\right). \quad [\text{Neumann}] \end{cases}$$

Sotto le altre condizioni (cioè, se $h_2H_1 + h_1H_2 > 0$), $\lambda = 0$ non è mai autovalore e $\lambda > 0$ è autovalore se e solo se è una radice positiva dell'equazione trascendente³

$$\cotg(\ell\sqrt{\lambda}) = \frac{h_2H_2\lambda - h_1H_1}{(h_2H_1 + h_1H_2)\sqrt{\lambda}}.$$

C'è un numero infinito di tali radici (infatti, una successione crescente λ_n che tende a $+\infty$) ed ogni radice corrispondente all'autofunzione

$$u_n(x, \lambda) = h_2\sqrt{\lambda_n} \cos(x\sqrt{\lambda_n}) + h_1 \sin(x\sqrt{\lambda_n}).$$

Le radici $\sqrt{\lambda_n}$ si trovano più facilmente nel modo grafico. Non ci sono autovalori fuori dell'intervallo $[0, +\infty)$.

1.2 Riduzione ad un'equazione integrale

Facciamo vedere che il problema di Sturm-Liouville può essere ridotto ad un'equazione integrale di Fredholm con nucleo reale, simmetrico e continuo $\mathcal{G}(x, y)$.

Teorema V.10 *Il problema al contorno*

$$Lu = \lambda u + f, \quad u \in D(\bar{L}), \quad f \in C(0, \ell) \cap L^2(0, \ell), \quad (\text{V.17})$$

³Ponendo $x = \sqrt{\lambda}$, $\alpha = h_2H_1 + h_1H_2 > 0$, $\beta = h_2H_2 \geq 0$ e $\gamma = h_1H_1 \geq 0$ con $\beta + \gamma > 0$, si vede subito che i grafici di $(\alpha x)/(\beta x^2 - \gamma)$ e $\text{tg}(\ell x)$ hanno un numero infinito di punti di intersezione $x > 0$.

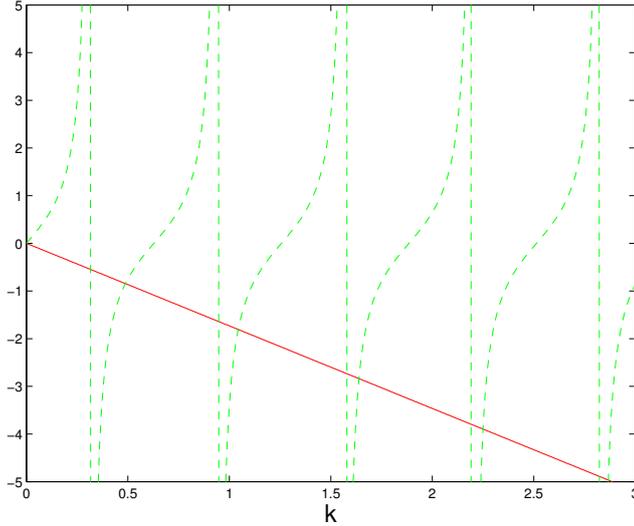


Figura V.1: Il plot contiene i grafici delle funzioni $y = \tan(xL)$ e $y = -k \tan \alpha$ per $L = 5$ e $\alpha = \frac{\pi}{3}$. Gli autovalori sono i valori di $k > 0$ corrispondenti ai loro punti di intersezione.

con la condizione che $\lambda = 0$ non sia un autovalore dell'operatore L è equivalente all'equazione integrale

$$u(x) = \lambda \int_0^\ell \mathcal{G}(x, y)u(y) dy + \int_0^\ell \mathcal{G}(x, y)f(y) dy, \quad u \in L^2(0, \ell), \quad (\text{V.18})$$

dove $\mathcal{G}(x, y)$ è la funzione di Green dell'operatore L . Inoltre, le soluzioni u dei problemi equivalenti (IV.17) e (IV.18) appartengono ad \mathcal{M}_L .

Dimostrazione. Se $u(x)$ è una soluzione del problema al contorno (IV.17), allora

$$u(x) = (G[\lambda u + f])(x) = \int_0^\ell \mathcal{G}(x, y)[\lambda u(y) + f(y)] dy, \quad 0 \leq x \leq \ell,$$

cioè $u(x)$ soddisfa l'equazione integrale (IV.18).

Inversamente, supponiamo che la funzione $u_0 \in L^2(0, \ell)$ soddisfi l'equazione integrale (IV.18). Se G denota l'operatore integrale con nucleo $\mathcal{G}(x, y)$, allora $u_0 = G(\lambda u_0 + f) \in D(\bar{L})$ e $\bar{L}u_0 = \lambda u_0 + f$. Dall'uguaglianza

$$u_0(x) = - \frac{v_1(x) \int_x^\ell v_2(y)[\lambda u_0(y) + f(y)] dy + v_2(x) \int_0^x v_1(y)[\lambda u_0(y) + f(y)] dy}{p(0)w(0)}$$

segue che $u_0 \in C[0, \ell]$, poichè le funzioni sotto il segno degli integrali appartengono ad $L^1(0, \ell)$. In tal caso segue dall'equazione precedente che $u_0 \in C^1[0, \ell]$ con derivata

$$u_0'(x) = - \frac{v_1'(x) \int_x^\ell v_2(y)[\lambda u_0(y) + f(y)] dy + v_2'(x) \int_0^x v_1(y)[\lambda u_0(y) + f(y)] dy}{p(0)w(0)}.$$

Da quell'ultima equazione segue che $u_0 \in C^2[0, \ell]$. Inoltre, dalla (IV.6) segue che $u_0(x)$ soddisfa le condizioni al contorno (IV.2). Dunque $u_0 \in \mathcal{M}_L$. Di conseguenza, $Lu_0 = \bar{L}u_0 = \lambda u_0 + f$. \square

Applicando il teorema precedente al caso $f = 0$, concludiamo che ogni autofunzione dell'operatore L (in principio appartenente a $D(\bar{L})$) appartiene ad \mathcal{M}_L . Inoltre, tutte le autofunzioni appartengono a $C[0, \ell]$. Quindi il problema al contorno per $f = 0$ (cioè, il problema agli autovalori) è equivalente a quello agli autovalori dell'equazione integrale omogenea

$$u(x) = \lambda \int_0^\ell \mathcal{G}(x, y)u(y) dy \quad (\text{V.19})$$

in $C[0, \ell]$ oppure in $L^2(0, \ell)$, a condizione che $\lambda = 0$ non sia autovalore dell'operatore L .

Eliminiamo ora l'ipotesi che $\lambda = 0$ non sia un autovalore dell'operatore L . Per farlo, sia $\mu_0 \in \mathbb{R}$ un numero che non è un autovalore. Allora $\mu = 0$ non è un autovalore del problema di Sturm-Liouville

$$L_1 u \equiv -(pu')' + (q - \mu_0)u = \mu u, \quad (\text{V.20})$$

$$h_1 u(0) - h_2 u'(0) = 0, \quad H_1 u(\ell) + H_2 u'(\ell) = 0. \quad (\text{V.21})$$

Ma $\mathcal{M}_L = \mathcal{M}_{L_1}$ e $D(\bar{L}) = D(\bar{L}_1)$. Quindi il problema di Sturm-Liouville (IV.1)-(IV.2) è equivalente all'equazione integrale

$$u(x) = (\lambda - \mu_0) \int_0^\ell \mathcal{G}_1(x, y)u(y) dy, \quad (\text{V.22})$$

dove $\mathcal{G}_1(x, y)$ è la funzione di Green dell'operatore L_1 .

1.3 Proprietà degli autovalori e delle autofunzioni

Abbiamo dunque stabilito l'equivalenza tra il problema di Sturm-Liouville omogeneo ed il problema agli autovalori per l'equazione integrale omogenea

(IV.22) con nucleo integrale $\mathcal{G}_1(x, y)$ reale, simmetrico e continuo. Gli autovalori λ del problema (IV.1)-(IV.2) sono collegati ai numeri caratteristici del nucleo $\mathcal{G}_1(x, y)$ con la relazione $\mu = \lambda - \mu_0$, mentre le corrispondenti autofunzioni coincidono. Quindi, per il problema di Sturm-Liouville sono validi tutti gli enunciati della teoria delle equazioni integrali con nucleo continuo, reale e simmetrico. In particolare⁴ *l'insieme degli autovalori $\{\lambda_k\}$ di questo problema non è vuoto e non ha punti di accumulazione finiti; gli autovalori sono reali e sono anche di molteplicità finita; le autofunzioni possono essere scelte reali ed ortonormali ed appartengono a $C^2[0, \ell]$.*

Il problema di Sturm-Liouville ha alcune proprietà specifiche.

- 1) *Gli autovalori appartengono all'intervallo $[q_{\min}, \infty)$ dove $q_{\min} = \min_{x \in [0, \ell]} q(x)$.*

Infatti, per $f \in \mathcal{M}_L$ si ha

$$\begin{aligned} (Lf, f) &= \int_0^\ell (p|f'|^2 + q|f|^2) dx + \frac{h_1}{h_2}p(0)|f(0)|^2 + \frac{H_1}{H_2}p(\ell)|f(\ell)|^2 \\ &\geq q_{\min}\|f\|_2^2, \end{aligned}$$

dove gli ultimi termini del secondo membro si annullano per $h_2 = 0$ o per $H_2 = 0$, rispettivamente. Quindi, se λ è un autovalore di L con corrispondente autofunzione u , allora $u \in \mathcal{M}_L$ e $\lambda\|u\|_2^2 = (Lu, u) \geq q_{\min}\|u\|_2^2$, e dunque $\lambda \geq q_{\min}$.

- 2) *L'insieme degli autovalori è infinito numerabile.* Infatti, se quest'insieme fosse finito, $\{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$, il nucleo $\mathcal{G}_1(x, y)$ sarebbe degenerare:

$$\mathcal{G}_1(x, y) = \sum_{k=1}^N \frac{\varphi_k(x)\overline{\varphi_k(y)}}{\lambda_k + 1}, \quad (\text{V.23})$$

dove $\varphi_1, \dots, \varphi_k$ sono i corrispondenti autofunzioni ortonormalizzate. Siccome $\varphi_k \in C^2[0, \ell]$, risulterebbe una contraddizione con la (IV.13):

$$\frac{\partial \mathcal{G}_1(y+0, y)}{\partial x} - \frac{\partial \mathcal{G}_1(y+0, y)}{\partial x} = 0, \quad y \in (0, \ell).$$

- 3) *Ogni autovalore è semplice.* Sia λ_0 un autovalore. Allora la corrispondente autofunzione u soddisfa $Lu = \lambda_0 u$ e le due condizioni al contorno (IV.6) [per $v_1 = v_2 = u$]. Ciascuna di queste condizioni definisce un sottospazio di $L^2(0, \ell)$ di dimensione 1. Quindi l'autospazio corrispondente all'autovalore λ_0 è unidimensionale.

⁴Sfruttiamo il fatto che il corrispondente operatore integrale K è compatto e autoaggiunto su $L^2(\Omega)$. Ciò si deve alla stima $\int_\Omega \int_\Omega |\mathcal{G}_1(x, y)|^2 dx dy < +\infty$.

Le condizioni al contorno (IV.2) si dicono *separate*, poichè riguardano i valori e le derivate della u in estremi diversi dell'intervallo $(0, \ell)$. Più generalmente, per $u, v \in C^2[0, \ell]$ risulta dopo due integrazioni per parti:

$$(Lu, v) - (u, Lv) = [p(u\bar{v}' - u'\bar{v})]_0^\ell.$$

La parte a destra si annulla se u, v soddisfano le condizioni separate (IV.2). Purtroppo si annullano anche se consideriamo le condizioni non separate

$$\sqrt{p(0)}u(0) = \pm\sqrt{p(\ell)}u(\ell), \quad \sqrt{p(0)}u'(0) = \pm\sqrt{p(\ell)}u'(\ell),$$

per la u e per la v , dove bisogna scegliere il segno $+$ due volte oppure il segno meno due volte. In tal caso si può introdurre il dominio \mathcal{M}_L ed estenderlo ad un dominio su cui l'operatore differenziale L è autoaggiunto. Per esempio, consideriamo il problema di Sturm-Liouville con condizioni periodiche

$$-u'' = \lambda u, \quad u(0) = u(\ell), \quad u'(0) = u'(\ell).$$

In tal caso gli autovalori e le autofunzioni sono:

$$\begin{cases} \lambda_n = \left(\frac{2n\pi}{\ell}\right)^2, & n = 0, 1, 2, \dots \\ u_0 = 1, \quad u_n(x) = c_1 \cos\left(\frac{2n\pi x}{\ell}\right) + c_2 \sin\left(\frac{2n\pi x}{\ell}\right), & n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

Tranne per l'autovalore $\lambda_0 = 0$, tutti gli autospazi hanno la dimensione 2. D'altra parte, per il problema di Sturm-Liouville con condizioni antiperiodiche

$$-u'' = \lambda u, \quad u(0) = -u(\ell), \quad u'(0) = -u'(\ell),$$

gli autovalori e le autofunzioni sono:

$$\begin{cases} \lambda_n = \left(\frac{(2n-1)\pi}{\ell}\right)^2, & n = 1, 2, 3, \dots \\ u_n(x) = c_1 \cos\left(\frac{(2n-1)\pi x}{\ell}\right) + c_2 \sin\left(\frac{(2n-1)\pi x}{\ell}\right), & n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

In questo caso tutti gli autospazi hanno la dimensione 2.

Siano $(\lambda_n)_{n=1}^\infty$ gli autovalori della L e $(\varphi_n)_{n=1}^\infty$ le corrispondenti autofunzioni ortonormalizzate. Siccome il problema agli autovalori è equivalente a quello per un'equazione integrale con nucleo continuo reale e simmetrico, il sistema delle autofunzioni è completo in $L^2(0, \ell)$. In altre parole, ogni funzione $f \in L^2(0, \ell)$ può essere sviluppata in una serie

$$f = \sum_{k=1}^{\infty} (f, \varphi_k) \varphi_k, \tag{V.24}$$

dove

$$\|f\|_2^2 = \sum_{k=1}^{\infty} |(f, \varphi_k)|^2, \quad \lim_{N \rightarrow +\infty} \int_0^\ell \left| f(x) - \sum_{k=1}^N (f, \varphi_k) \varphi_k(x) \right|^2 dx = 0.$$

Esempio V.11 Consideriamo il problema di Sturm-Liouville con condizioni periodiche

$$-u'' = \lambda u, \quad u(0) = u(\ell), \quad u'(0) = u'(\ell).$$

Allora gli autovalori e le corrispondenti autofunzioni ortonormalizzate sono:

$$\begin{cases} \lambda_0 = 0, & \lambda_n^c = \lambda_n^s = \left(\frac{2n\pi}{\ell}\right)^2, \\ \varphi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{\ell}}, & \varphi_n^c(x) = \left(\frac{2}{\ell}\right)^{1/2} \cos\left(\frac{2n\pi x}{\ell}\right), \quad \varphi_n^s(x) = \left(\frac{2}{\ell}\right)^{1/2} \sin\left(\frac{2n\pi x}{\ell}\right), \end{cases}$$

dove $n = 1, 2, 3, \dots$. Per $f \in L^2(0, \ell)$ risulta la serie di Fourier

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2n\pi x}{\ell}\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi x}{\ell}\right) \right),$$

dove

$$a_0 = \frac{2}{\ell} \int_0^\ell f(x) dx, \\ a_n = \frac{2}{\ell} \int_0^\ell f(x) \cos\left(\frac{2n\pi x}{\ell}\right) dx, \quad b_n = \frac{2}{\ell} \int_0^\ell f(x) \sin\left(\frac{2n\pi x}{\ell}\right) dx.$$

2 Problemi di Sturm-Liouville singolari

Finora ci siamo limitati ai problemi di Sturm-Liouville detti *regolari*. Ciò vuol dire che l'equazione differenziale ha la forma

$$Lu \equiv -(pu')' + qu = \lambda u, \quad 0 < x < \ell, \quad (\text{V.25})$$

dove $p \in C^1[0, \ell]$ è strettamente positiva (anche agli estremi dell'intervallo $[0, \ell]$) e $q \in C[0, \ell]$ è una funzione reale. Nelle applicazioni appaiono, purtroppo, problemi di Sturm-Liouville in cui la funzione p è positiva all'interno dell'intervallo $(0, \ell)$ e si annulla ad uno (o ambedue) degli estremi. Esistono anche applicazioni importanti in cui l'intervallo è illimitato. Tali problemi di Sturm-Liouville si dicono *singolari*.

La teoria dei problemi di Sturm-Liouville singolari è stata principalmente sviluppata da Weyl (1908). L'esistenza di uno zero della p all'estremo $x = 0$

implica l'impossibilità di convertire l'equazione differenziale in un'equazione della forma $y'' + \dots = 0$ con condizioni iniziali di tipo $y(0) = y_0$ e $y'(0) = y_1$. Ciò compromette in modo serio la costruzione della funzione di Green e la conversione del problema di Sturm-Liouville in un'equazione integrale con nucleo hermitiano. Un'altra difficoltà è la descrizione delle condizioni al contorno che conducono ad un operatore autoaggiunto e quindi ad una teoria spettrale. La terza difficoltà consiste nella possibilità dell'esistenza di spettro continuo. Ciò capita in particolare per l'equazione di Schrödinger radiale con potenziale che tende a zero se $|x| \rightarrow \infty$, per cui \mathbb{R}^+ è lo spettro continuo dell'operatore di Sturm-Liouville. Tutto quanto vuol dire che non c'è alcuna speranza di una teoria generale. Invece bisogna trattare le applicazioni in modo ad hoc.

Esempio V.12 Sia $\nu \geq 0$. Consideriamo il problema al contorno

$$L_\nu u \equiv -(xu')' + \frac{\nu^2}{x}u = \lambda xu, \quad 0 < x < 1, \quad (\text{V.26})$$

$$u(x) = O(x^\gamma), \quad x \rightarrow 0; \quad \alpha u(1) + \beta u'(1) = 0, \quad (\text{V.27})$$

dove $\gamma = \min(\nu, 1)$, $\alpha \geq 0$, $\beta \geq 0$, $\alpha + \beta > 0$. Sia \mathcal{M}_{L_ν} l'insieme di tutte le funzioni $u \in C^2((0, 1]) \cap L^2((0, 1); x dx)$ che soddisfano alle condizioni al contorno (IV.27) e la condizione $x^{-1/2}L_\nu u \in L^2(0, 1)$. Quest'insieme è denso nello spazio di Hilbert $L^2((0, 1); x dx)$ in cui verrà studiato il problema al contorno.

Dimostriamo ora che l'operatore L_ν è positivo. Infatti, nel prodotto scalare di $L^2(0, 1)$ si ha per $u \in \mathcal{M}_{L_\nu}$

$$\begin{aligned} (L_\nu u, u) &= - \int_0^1 (xu')' \bar{u} dx + \nu^2 \int_0^1 \frac{|u|^2}{x} dx \\ &= \int_0^1 x |u'|^2 dx - [xu' \bar{u}]_{x=0}^1 + \nu^2 \int_0^1 \frac{|u|^2}{x} dx \\ &= \int_0^1 x |u'|^2 dx + \nu^2 \int_0^1 \frac{|u|^2}{x} dx + \frac{\alpha}{\beta} |u(1)|^2 \geq 0. \end{aligned}$$

Di conseguenza, tutti gli autovalori dell'operatore L_ν sono non negativi. Affinchè $\lambda = 0$ sia autovalore dell'operatore L_ν , è necessario e sufficiente che $\nu = 0$ ed $\alpha = 0$ [condizione di Neumann all'estremo $x = 1$]; a quest'autovalore corrisponde l'autofunzione costante. Gli autovalori sono anche semplici. Discutiamo ora il caso $\lambda > 0$. In tal caso le uniche soluzioni della (IV.26) limitate per $x \rightarrow 0^+$ sono i multipli della funzione $J_\nu(x)$. Una tale soluzione soddisfa la condizione (IV.27) se e solo se

$$\alpha J_\nu(\sqrt{\lambda}) + \beta \sqrt{\lambda} J'_\nu(\sqrt{\lambda}) = 0,$$

cioè, se e solo se $\mu = \sqrt{\lambda}$ è una radice dell'equazione (II.43). Enumerando questi zeri da $0 < \mu_1^{(\nu)} < \mu_2^{(\nu)} < \dots$, otteniamo gli autovalori (soltanto quelli diversi da 0) $\lambda_k^{(\nu)} = [\mu_k^{(\nu)}]^2$ e le corrispondenti autofunzioni $J_\nu(\mu_k^{(\nu)}x)$ ($k = 1, 2, \dots$). Per $\nu = \alpha = 0$ si aggiunga l'autovalore $\lambda_0^{(0)} = 0$ con la corrispondente autofunzione costante.

Per $\nu = 0$ le funzioni $v_1(x) = 1$ e $v_2(x) = \beta - \alpha \log(x)$ soddisfano all'equazione (IV.26) e, rispettivamente, alla prima e alla seconda condizione (IV.27). Quindi le soluzioni dell'equazione differenziale $L_0u \equiv -(xu')' = xf(x)$ hanno la forma

$$u(x) = c_1(x)v_1(x) + c_2(x)v_2(x), \quad (\text{V.28})$$

dove

$$\begin{pmatrix} v_1(x) & v_2(x) \\ v_1'(x) & v_2'(x) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1'(x) \\ c_2'(x) \end{pmatrix} = -f(x) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{V.29})$$

Sia $\alpha > 0$ (cioè, escludiamo la condizione di Neumann in $x = 1$). Dunque $c_1'(x) = [\log(x) - \frac{\beta}{\alpha}]xf(x)$ e $c_2'(x) = xf(x)/\alpha$. Quindi

$$c_1(x) = c_1 + \int_0^x \left[\log(y) - \frac{\beta}{\alpha} \right] yf(y) dy, \quad c_2(x) = c_2 - \frac{1}{\alpha} \int_x^1 yf(y) dy.$$

Siccome

$$\begin{aligned} u(x) &= \left(-\alpha c_2 + \int_0^1 yf(y) dy \right) \log(x) + c_1 + \beta c_2 \\ &+ \int_0^x \left[\log(y) - \frac{\beta}{\alpha} \right] yf(y) dy - \frac{\beta}{\alpha} \int_x^1 yf(y) dy - (\log x) \int_0^x yf(y) dy, \end{aligned}$$

si ha $c_2 = \frac{1}{\alpha} \int_0^1 yf(y) dy$, e dunque

$$u(x) = c_1 + \int_0^x \left[\log(y) - \frac{\beta}{\alpha} \right] yf(y) dy - \left[\log(x) - \frac{\beta}{\alpha} \right] \int_0^x yf(y) dy.$$

La seconda condizione

$$0 = u(1) + \frac{\beta}{\alpha} u'(1) = c_1 + \int_0^1 \left[\log(y) - \frac{\beta}{\alpha} \right] yf(y) dy$$

ci dà la costante c_1 . Infine

$$u(x) = \int_0^1 \mathcal{G}(x, y) f(y) y dy, \quad (\text{V.30})$$

dove la funzione di Green

$$\mathcal{G}(x, y) = \frac{\beta}{\alpha} - \log \max(x, y) > 0.$$

Quindi il problema (IV.26)-(IV.27) è equivalente all'equazione integrale

$$u(x) - \lambda \int_0^1 \mathcal{G}(x, y) u(y) dy = \int_0^1 \mathcal{G}(x, y) f(y) dy,$$

da risolvere nello spazio di Hilbert $L^2((0, 1); x dx)$. Per $\nu > 0$ l'espressione esatta della funzione di Green si trova in [3].

Esempio V.13 Consideriamo ora il problema al contorno

$$Lu \equiv -u'' + \mu^2 u = \lambda u, \quad x \in \mathbb{R}, \quad (\text{V.31})$$

su un intervallo illimitato, dove $\mu > 0$. Sia \mathcal{M}_L l'insieme di tutte le funzioni $u \in L^2(\mathbb{R})$ tali che la sua derivata seconda (distribuzionale) $u'' \in L^2(\mathbb{R})$. Allora $v_1(x) = e^{\mu x}$ e $v_2(x) = e^{-\mu x}$ soddisfano all'equazione $v_j'' + \mu^2 v_j = 0$ per $j = 1, 2$. Le soluzioni dell'equazione $Lu \equiv -u'' + \mu^2 u = f$ hanno tutte la forma

$$u(x) = c_1(x)v_1(x) + c_2(x)v_2(x),$$

dove

$$\begin{pmatrix} v_1(x) & v_2(x) \\ v_1'(x) & v_2'(x) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1'(x) \\ c_2'(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -f(x) \end{pmatrix}.$$

Quindi $c_1'(x) = -e^{-\mu x} f(x)/2\mu$ e $c_2'(x) = e^{\mu x} f(x)/2\mu$. Di conseguenza,

$$c_1(x) = c_1 + \frac{1}{2\mu} \int_x^\infty e^{-\mu y} f(y) dy, \quad c_2(x) = c_2 + \frac{1}{2\mu} \int_{-\infty}^x e^{\mu y} f(y) dy.$$

Dunque

$$u(x) = c_1 e^{\mu x} + c_2 e^{-\mu x} + \frac{1}{2\mu} \int_x^\infty e^{\mu(x-y)} f(y) dy + \frac{1}{2\mu} \int_{-\infty}^x e^{-\mu(x-y)} f(y) dy. \quad (\text{V.32})$$

Affinchè $u \in L^2(\mathbb{R})$, ci vuole $c_1 = c_2 = 0$. Quindi

$$u(x) = \frac{1}{2\mu} \int_{-\infty}^\infty e^{-\mu|x-y|} f(y) dy. \quad (\text{V.33})$$

Si osservi che $\mathcal{G}(x, y) = e^{-\mu|x-y|}/2\mu$ prende il posto della funzione di Green.

Esempio V.14 Consideriamo ora il problema al contorno

$$\begin{cases} Lu \equiv -u'' + \mu^2 u = \lambda u, & x \in \mathbb{R}^+, \\ u(0) = 0, & \text{Dirichlet,} \\ u'(0) = 0, & \text{Neumann,} \\ (\cos \alpha)u(0) - (\sin \alpha)u'(0) = 0, & \text{Condizione mista,} \end{cases} \quad (\text{V.34})$$

su un intervallo illimitato, dove $\mu > 0$ e $\alpha \in [0, \frac{\pi}{2}]$. Sia \mathcal{M}_L l'insieme di tutte le funzioni $u \in L^2(\mathbb{R})$ tali che la sua derivata seconda⁵ $u'' \in L^2(\mathbb{R}^*)$ e $(\cos \alpha)u(0) = (\sin \alpha)u'(0)$. Seguendo il metodo dell'esempio precedente troviamo al posto della (IV.32)

$$u(x) = c_1 e^{\mu x} + c_2 e^{-\mu x} + \frac{1}{2\mu} \int_x^\infty e^{\mu(x-y)} f(y) dy + \frac{1}{2\mu} \int_0^x e^{-\mu(x-y)} f(y) dy. \quad (\text{V.35})$$

Affinchè $u \in L^2(\mathbb{R}^+)$, ci vuole $c_1 = 0$. Quindi

$$u(x) = c_2 e^{-\mu x} + \frac{1}{2\mu} \int_0^\infty e^{-\mu|x-y|} f(y) dy. \quad (\text{V.36})$$

Ora sostituiamo la condizione al contorno in $x = 0$. Il risultato finale è

$$u(x) = \begin{cases} \frac{1}{2\mu} \int_0^\infty e^{-\mu|x-y|} f(y) dy - \frac{1}{2\mu} \int_0^\infty e^{-\mu(x+y)} f(y) dy, & \text{Dirichlet,} \\ \frac{1}{2\mu} \int_0^\infty e^{-\mu|x-y|} f(y) dy + \frac{1}{2\mu} \int_0^\infty e^{-\mu(x+y)} f(y) dy, & \text{Neumann,} \\ \frac{1}{2\mu} \int_0^\infty e^{-\mu|x-y|} f(y) dy + F(\mu, \alpha) \int_0^\infty e^{-\mu(x+y)} f(y) dy, & \text{mista,} \end{cases} \quad (\text{V.37})$$

dove

$$F(\mu, \alpha) = \frac{\mu \sin \alpha - \cos \alpha}{2\mu[\mu \sin \alpha + \cos \alpha]}.$$

Quindi la combinazione lineare convessa

$$\begin{aligned} \mathcal{G}(x, y) &= \frac{e^{-\mu|x-y|} + 2\mu F(\mu, \alpha) e^{-\mu(x+y)}}{2\mu} \\ &= \frac{\mu \sin \alpha}{\mu \sin \alpha + \cos \alpha} \mathcal{G}_{\text{Neumann}}(x, y) + \frac{\cos \alpha}{\mu \sin \alpha + \cos \alpha} \mathcal{G}_{\text{Dirichlet}}(x, y) \end{aligned}$$

delle funzioni di Green nei casi delle condizioni di Dirichlet e Neumann prende il posto della funzione di Green.

⁵Si intende la derivata seconda distribuzionale.

Capitolo VI

FUNZIONI DI GREEN

1 Classificazione delle equazioni alle derivate parziali

Consideriamo un'equazione differenziale quasi-lineare (lineare in tutte le sue derivate di ordine maggiore) del secondo ordine

$$\sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_j} + \Phi(x, u, \nabla u) = 0 \quad (\text{VI.1})$$

a coefficienti continui $a_{ij}(x)$ definiti su un aperto $G \subset \mathbb{R}^n$. L'equazione (V.1) soddisfa la condizione di simmetria

$$a_{ij}(x) = a_{ji}(x) \text{ reale,} \quad x \in G. \quad (\text{VI.2})$$

Esempi importanti dell'equazione (V.1) sono l'equazione di Poisson n -dimensionale¹

$$\Delta u = -f, \quad (\text{VI.3})$$

dove $a_{ij}(x) = \delta_{ij}$ (la delta di Kronecker), l'equazione delle onde n -dimensionale

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \Delta u = f, \quad (\text{VI.4})$$

dove $a_{00}(x) = 1$ (essendo t la coordinata zero-esima), $a_{ii}(x) = -c^2$ ($i = 1, \dots, n$), e $a_{ij}(x) = 0$ per $i \neq j$, e l'equazione del calore n -dimensionale

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \Delta u + f, \quad (\text{VI.5})$$

¹ Δ è l'operatore di Laplace: $\Delta = \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2}{\partial x_j^2} = \nabla \cdot \nabla = \text{div grad.}$

dove $a_{00}(x) = 0$ (essendo t la coordinata zero-esima), $a_{ii}(x) = a^2$ ($i = 1, \dots, n$), e $a_{ij}(x) = 0$ per $i \neq j$.

All'equazione (V.1) si associa la matrice $n \times n$

$$A(x) = (a_{ij}(x))_{i,j=1}^n, \quad (\text{VI.6})$$

che dipende soltanto dai termini con le derivate parziale del secondo ordine. Grazie alla (V.2), la matrice $A(x)$ è reale e simmetrica. Quindi $A(x)$ ha n autovalori reali $\lambda_1(x), \dots, \lambda_n(x)$. Inoltre esiste una matrice ortogonale $O(x)$ (cioè, $O(x)^T = O(x)^{-1}$ e la $O(x)$ è reale) tale che

$$O(x)^{-1}A(x)O(x) = \text{diag}(\lambda_1(x), \dots, \lambda_n(x)), \quad (\text{VI.7})$$

dove la parte a destra è una matrice diagonale. La colonna j -esima della $O(x)$ è un autovettore (di norma euclidea 1) della $A(x)$ corrispondente all'autovalore $\lambda_j(x)$ ($j = 1, \dots, n$). Le colonne della $O(x)$ costituiscono una base ortonormale dello spazio euclideo \mathbb{R}^n .

Introduciamo la seguente classificazione delle equazioni (V.1) che soddisfanno la (V.2). Tale equazione si dice

- a. *ellittica* se tutti gli autovalori $\lambda_j(x)$ sono diversi da zero e hanno lo stesso segno.
- b. *iperbolica* se tutti gli autovalori $\lambda_j(x)$ sono diversi da zero, ma non tutti hanno lo stesso segno. La (V.1) si dice *di tipo iperbolico normale* se è iperbolica e tutti gli autovalori tranne uno hanno lo stesso segno.
- c. *parabolica* se almeno uno degli autovalori (ma non tutti) si annullano. La (V.1) si dice *di tipo parabolico normale* se è parabolica e tutti gli autovalori non nulli hanno lo stesso segno.

Torniamo agli esempi (V.3), (V.4) e (V.5):

(V.3): Si ha $A(x) = \text{diag}(1, \dots, 1)$ di ordine n . Tutti gli autovalori sono uguali ad 1 e quindi l'equazione di Poisson è ellittica.

(V.4): Si ha $A(x) = \text{diag}(1, -c^2, \dots, -c^2)$ di ordine $n+1$. Uno degli autovalori è uguale ad 1 e gli altri sono uguali a $-c^2$. Quindi l'equazione delle onde è di tipo iperbolico normale.

(V.5): Si ha $A(x) = \text{diag}(0, -a^2, \dots, -a^2)$ di ordine $n+1$. Uno degli autovalori si annulla e gli altri sono uguali a $-a^2$. Quindi l'equazione del calore è di tipo parabolico normale.

Osserviamo che in principio la classificazione della (V.1) dipende dalla scelta del punto $x \in G$. Per la maggior parte delle equazioni della fisica matematica il segno degli autovalori (spesso gli autovalori stessi) e dunque la classificazione non dipende da $x \in G$ (tranne in qualche punto eccezionale, spesso di frontiera). Un'eccezione notevole è l'equazione di Tricomi

$$y \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0, \quad (\text{VI.8})$$

dove $(x, y) \in G = \mathbb{R}^2$. In tal caso $A(x, y) = \text{diag}(y, 1)$, $\lambda_1(x, y) = y$ e $\lambda_2(x, y) = 1$. Quindi la (V.8) è ellittica se $y > 0$, parabolica se $y = 0$ e iperbolica se $y < 0$.

2 Problemi agli autovalori multidimensionali

2.1 Impostazione del problema agli autovalori

Consideriamo il seguente problema al contorno omogeneo lineare per un'equazione di tipo ellittico:

$$-\text{div}(p \text{grad } u) + qu = \lambda u, \quad x \in \Omega, \quad (\text{VI.9})$$

$$\left(\alpha u + \beta \frac{\partial u}{\partial n} \right) \Big|_{\partial \Omega} = 0. \quad (\text{VI.10})$$

Supponiamo che

$$\begin{cases} p \in C^1(\bar{\Omega}), & q \in C(\bar{\Omega}); & p(x) > 0, & q(x) \in \mathbb{R}, & x \in \bar{\Omega}, \\ \alpha \in C(\partial \Omega), & \beta \in C(\partial \Omega), \\ \alpha(x) \geq 0, & \beta(x) \geq 0, & \alpha(x) + \beta(x) > 0, & x \in \partial \Omega. \end{cases} \quad (\text{VI.11})$$

Sia $\partial \Omega_0 = \{x \in \partial \Omega : \min(\alpha(x), \beta(x)) > 0\}$. In alcuni casi supponiamo inoltre che $q(x) \geq 0$ per $x \in \bar{\Omega}$. Notiamo i seguenti casi particolari:

$$\begin{cases} \alpha(x) \equiv 1, & \beta(x) \equiv 0, & \text{quindi } u = 0, & x \in \partial \Omega, & [\text{condizione di Dirichlet}] \\ \alpha(x) \equiv 0, & \beta(x) \equiv 1, & \text{quindi } \frac{\partial u}{\partial n} = 0, & x \in \partial \Omega, & [\text{condizione di Neumann}]. \end{cases}$$

Il problema (V.9)-(V.10) consiste nel trovare una funzione $u(x)$ di classe $C^2(\Omega) \cap C^1(\bar{\Omega})$ che soddisfi l'equazione (V.9) in Ω e la condizione (V.10) sulla frontiera $\partial \Omega$. Evidentemente, il problema (V.9)-(V.10) ha sempre la soluzione nulla, e questa soluzione non ha alcun interesse. Perciò il problema (V.9)-(V.10) deve essere considerato come un problema agli autovalori per l'operatore

$$L = -\text{div}(\text{grad}) + q.$$

Tutte le funzioni f di classe $C^2(\Omega) \cap C^1(\overline{\Omega})$ che soddisfano la condizione al contorno (V.10) e la condizione $Lf \in L^2(\Omega)$ costituiscono il *dominio* \mathcal{M}_L dell'operatore L . Siccome lo spazio vettoriale $\mathcal{D}(\Omega)$ di tutte le funzioni di classe $C^\infty(\Omega)$ di supporto compatto (cioè, che si annullano fuori di un compatto contenuto in Ω) è denso in $L^2(\Omega)$ ed è contenuto in \mathcal{M}_L , \mathcal{M}_L è denso in $L^2(\Omega)$.

In generale, il dominio \mathcal{M}_L di L non è abbastanza grande per trovare tutte le autofunzioni. Per questa ragione bisogna estendere l'operatore L ad un dominio abbastanza grande per contenere le autofunzioni.

2.2 Formule di Green

Se $u \in C^2(\Omega) \cap C^1(\overline{\Omega})$ e $v \in C^1(\overline{\Omega})$, è valida la *prima formula di Green*:

$$\int_{\Omega} v Lu dx = \int_{\Omega} p \sum_{i=1}^n \frac{\partial v}{\partial x_i} \frac{\partial u}{\partial x_i} dx - \int_{\partial\Omega} pv \frac{\partial u}{\partial n} dS + \int_{\Omega} quv dx. \quad (\text{VI.12})$$

Per dimostrare la formula (V.12) prendiamo una regione arbitraria Ω' con frontiera $\partial\Omega'$ una superficie regolare a tratti tale che $\overline{\Omega'} \subset \Omega$. Visto che $u \in C^2(\Omega)$, si ha anche $u \in C^2(\overline{\Omega'})$ e, di conseguenza,

$$\begin{aligned} \int_{\Omega'} v Lu dx &= \int_{\Omega'} v [-\text{div}(p \text{grad } u) + qu] dx \\ &= - \int_{\Omega'} \text{div}(pv \text{grad } u) dx + \int_{\Omega'} p \sum_{i=1}^n \frac{\partial v}{\partial x_i} \frac{\partial u}{\partial x_i} dx + \int_{\Omega'} quv dx. \end{aligned}$$

Utilizzando il teorema della divergenza (di Gauss) si ottiene

$$\int_{\Omega'} v Lu dx = \int_{\Omega'} p \sum_{i=1}^n \frac{\partial v}{\partial x_i} \frac{\partial u}{\partial x_i} dx - \int_{\partial\Omega'} pv \frac{\partial u}{\partial n'} dS' + \int_{\Omega'} quv dx,$$

dove $\partial\Omega'$ è la frontiera di Ω' . Facendo tendere Ω' a Ω nell'uguaglianza ottenuta ed utilizzando il fatto che $u, v \in C^1(\overline{\Omega})$, concludiamo che il limite del secondo membro esiste. Quindi esiste anche il limite del primo membro ed è valida l'uguaglianza (V.12). In tal caso l'integrale del primo membro della (V.12) deve essere considerato improprio. I limiti non dipendono della maniera in cui Ω' tende a Ω , poichè gli integrali nelle parte a destra della (V.12) sono assolutamente convergenti.

Se $u, v \in C^2(\Omega) \cap C^1(\overline{\Omega})$, è valida la *seconda formula di Green*:

$$\int_{\Omega} (v Lu - u Lv) dx = \int_{\partial\Omega} p \left(u \frac{\partial v}{\partial n} - v \frac{\partial u}{\partial n} \right) dS. \quad (\text{VI.13})$$

Per dimostrare la formula (V.13), scambiamo u e v nella (V.12):

$$\int_{\Omega} u Lv dx = \int_{\Omega} p \sum_{i=1}^n \frac{\partial u}{\partial x_i} \frac{\partial v}{\partial x_i} dx - \int_{\partial\Omega} pu \frac{\partial v}{\partial n} dS + \int_{\Omega} qvu dx, \quad (\text{VI.14})$$

e sottraiamo l'uguaglianza ottenuta dalla (V.14). Come risultato, si ottiene la seconda formula di Green (V.13).

In particolare per $p(x) \equiv 1$ e $q(x) \equiv 0$, le formule (V.12) e (V.13) di Green si trasformano nelle seguenti uguaglianze:

$$\int_{\Omega} v \Delta u dx = - \int_{\Omega} p \sum_{i=1}^n \frac{\partial v}{\partial x_i} \frac{\partial u}{\partial x_i} dx + \int_{\partial\Omega} v \frac{\partial u}{\partial n} dS, \quad (\text{VI.15})$$

$$\int_{\Omega} (v \Delta u - u \Delta v) dx = \int_{\partial\Omega} \left(v \frac{\partial u}{\partial n} - u \frac{\partial v}{\partial n} \right) dS. \quad (\text{VI.16})$$

2.3 Proprietà dell'operatore L

1. L operatore L è hermitiano:

$$(Lf, g) = (f, Lg), \quad f, g \in \mathcal{M}_L. \quad (\text{VI.17})$$

Infatti, visto che $f, \bar{g} \in \mathcal{M}_L$, si ha $Lf \in L^2(\Omega)$ e $L\bar{g} = \overline{Lg} \in L^2(\Omega)$. In tal caso la seconda formula di Green (V.13), per $u = f$ e $v = \bar{g}$, assume la forma

$$(Lf, g) - (f, Lg) = \int_{\Omega} (\bar{g} Lf - f \overline{Lg}) dx = \int_{\partial\Omega} p \left(f \frac{\partial \bar{g}}{\partial n} - \bar{g} \frac{\partial f}{\partial n} \right) dS. \quad (\text{VI.18})$$

Per dimostrare che si annulla l'ultima parte della (V.18), osserviamo che le funzioni f e \bar{g} soddisfano le condizioni al contorno (V.10):

$$\left(\alpha f + \beta \frac{\partial f}{\partial n} \right) \Big|_{\partial\Omega} = 0, \quad \left(\alpha \bar{g} + \beta \frac{\partial \bar{g}}{\partial n} \right) \Big|_{\partial\Omega} = 0. \quad (\text{VI.19})$$

Per l'ipotesi (V.11), $\alpha(x) + \beta(x) > 0$ per $x \in \partial\Omega$. Perciò per ogni $x \in \partial\Omega$ il sistema omogeneo di equazioni algebriche lineari (V.19) ha una soluzione non nulla $(\alpha(x), \beta(x))$, si annulla il suo determinante, cioè

$$\det \begin{bmatrix} f & \frac{\partial f}{\partial n} \\ \bar{g} & \frac{\partial \bar{g}}{\partial n} \end{bmatrix} = \left(f \frac{\partial \bar{g}}{\partial n} - \bar{g} \frac{\partial f}{\partial n} \right) \Big|_{\partial\Omega} = 0.$$

Di conseguenza è hermitiano l'operatore L .

2. Sia $f \in \mathcal{M}_L$. Ponendo $u = f$ e $v = \bar{f}$ nella prima formula di Green (V.12) e tenendo conto del fatto che $f \in L^2(\Omega)$, si ottiene

$$(Lf, f) = \int_{\Omega} p |\text{grad } f|^2 dx - \int_{\partial\Omega} pf \frac{\partial \bar{f}}{\partial n} dS + \int_{\Omega} q |f|^2 dx. \quad (\text{VI.20})$$

Dalla condizione al contorno (V.10) segue che

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial n} = -\frac{\alpha}{\beta} f, & \beta(x) > 0, \quad x \in \partial\Omega; \\ f = 0, & \beta(x) = 0, \quad x \in \partial\Omega. \end{cases}$$

Sostituendo queste relazioni nell'uguaglianza (V.20), si ottiene l'espressione per la forma quadratica

$$(Lf, f) = \int_{\Omega} (p |\text{grad } f|^2 + q |f|^2) dx + \int_{\partial\Omega_0} p \frac{\alpha}{\beta} |f|^2 dS, \quad f \in \mathcal{M}_L, \quad (\text{VI.21})$$

dove $\partial\Omega_0$ è la parte di $\partial\Omega$ in cui $\min(\alpha(x), \beta(x)) > 0$. La forma quadratica (Lf, f) , $f \in \mathcal{M}_L$, è detta *integrale d'energia*.

3. Ritorniamo adesso all'operatore di Sturm-Liouville L con dominio \mathcal{M}_L . Allora L è hermitiano su $L^2(\Omega)$ con dominio denso in $L^2(\Omega)$ che ha la seguente proprietà: $(Lf, f) \geq q_{\min} \|f\|_2^2$ per $f \in \mathcal{D}(L)$. In tal caso esiste un'unica estensione autoaggiunta \bar{L} dell'operatore L tale che $(\bar{L}f, f) \geq q_{\min} \|f\|_2^2$ per $f \in \mathcal{D}(\bar{L})$. Le autofunzioni del problema al contorno (V.9)-(V.10) si cercano nel dominio $D(\bar{L})$.

Proposizione VI.1 *Abbiamo le seguenti proprietà:*

- a) *Tutti gli autovalori sono reali e sono contenuti nell'intervallo $[q_{\min}, \infty)$, dove $q_{\min} = \min\{q(x) : x \in \bar{\Omega}\}$.*
- b) *Le autofunzioni corrispondenti ad autovalori diversi sono ortogonali tra loro.*
- c) *Le autofunzioni possono essere scelte reali.*
- d) *Affinchè $\lambda = q_{\min}$ è autovalore di L , è necessario e sufficiente che q sia costante ed $\alpha(x) \equiv 0$. In tal caso l'autofunzione è costante.*

Dimostrazione. Per dimostrare la parte (a), sia $f \in D(\bar{L})$ tale che $\bar{L}f = \lambda f$ e $f \neq 0$. Allora $(\lambda - \bar{\lambda}) \|f\|_2 = (\bar{L}f, f) - (f, \bar{L}f) = 0$, e quindi $\lambda = \bar{\lambda}$ è reale. Inoltre, se $q(x) \geq q_{\min}$ per ogni $x \in \partial\Omega$ e λ è autovalore corrispondente all'autofunzione f (cioè, $f \neq 0$ e $\bar{L}f = \lambda f$), allora

$$\lambda \|f\|_2^2 = (\bar{L}f, f) \geq q_{\min} \|f\|_2^2.$$

Per dimostrare la parte (b), consideriamo $f, g \in D(\bar{L})$ non banali tali che $\bar{L}f = \lambda f$ e $\bar{L}g = \mu g$; in tal caso $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$. Si controlla facilmente che $(\lambda - \mu)(f, g) = (\bar{L}f, g) - (f, \bar{L}g) = 0$ e quindi $\lambda = \mu$ oppure $(f, g) = 0$.

Per dimostrare la parte (c), se f è un'autofunzione, il fatto che il corrispondente autovalore è reale implica che anche \bar{f} è una autofunzione. Siccome le parti reale ed immaginaria della f non si possono ambedue annullare quasi ovunque, una di loro è un'autofunzione reale.

Infine,² per dimostrare la parte (d), sia $\lambda = q_{\min}$ autovalore con corrispondente autofunzione f . Allora dalla (V.21) segue che $\text{grad } f \equiv 0$ (cioè che f è costante) e $qf \equiv q_{\min}f$. \square

3 Equazioni ellittiche

In Cap. IV abbiamo espresso la soluzione unica del problema di Sturm-Liouville **unidimensionale**

$$Lu \equiv -(pu')' + qu = f, \quad 0 < x < \ell, \quad (\text{VI.22a})$$

$$h_1u(0) - h_2u'(0) = 0, \quad H_1u(\ell) + H_2u'(\ell) = 0, \quad (\text{VI.22b})$$

dove $\lambda = 0$ non è autovalore, nella forma

$$u(x) = (Gf)(x) = \int_0^L \mathcal{G}(x, y)u(y) dy, \quad (\text{VI.23})$$

dove la funzione di Green $\mathcal{G}(x, y)$ è reale, simmetrica e continua e quindi l'operatore integrale G è autoaggiunto sullo spazio di Hilbert $L^2(0, L)$. In questo capitolo estendiamo tali espressioni al caso multidimensionale per due operatori differenziali: quello di Laplace ($L = -\Delta$) e quello di Helmholtz ($L = -\Delta + k^2$). Nel caso unidimensionale indichiamo le funzioni di Green nel caso di condizioni al contorno non separate (per esempio, le condizioni periodiche o antiperiodiche).

Se $\lambda = 0$ è autovalore, la soluzione del problema (V.22) esiste se e solo se f è ortogonale a tutte le autofunzioni corrispondenti all'autovalore $\lambda = 0$. Se questo autovalore è semplice e l'autofunzione è φ_0 , allora esiste, per ogni $f \in L^2(0, L)$ che soddisfa $(f, \varphi_0) = 0$, un'unica soluzione u che soddisfa $(u, \varphi_0) = 0$. Tale soluzione verrà scritta nella forma (V.23).

²Ci semplifichiamo la vita supponendo che $f \in \mathcal{M}_L$.

3.1 Equazioni di Laplace e di Poisson

Consideriamo il problema al contorno (di Dirichlet)

$$(Lu)(x) \stackrel{\text{def}}{=} -\Delta u + q(x)u = f(x), \quad x \in \Omega, \quad (\text{VI.24a})$$

$$u(x) = g(x), \quad x \in \partial\Omega, \quad (\text{VI.24b})$$

dove Ω è un sottoinsieme aperto, limitato e connesso in \mathbb{R}^n con frontiera $\partial\Omega$ un'ipersuperficie regolare a tratti. Cerchiamo prima la cosiddetta *funzione di Green* $\mathcal{G}_D(x, y)$ tale che

$$\begin{cases} L_y[\mathcal{G}_D(x, y)] = -\Delta_y \mathcal{G}_D(x, y) + q(y)\mathcal{G}_D(x, y) = \delta(x - y), \\ \mathcal{G}_D(x, y) = 0 \text{ per } x \in \partial\Omega. \end{cases} \quad (\text{VI.25})$$

Allora

$$u(x) = \int_{\Omega} \mathcal{G}_D(x, y) f(y) dy - \int_{\partial\Omega} \frac{\partial \mathcal{G}_D}{\partial n_y}(x, y) g(y) d\sigma(y). \quad (\text{VI.26})$$

Infatti, per $v(y) = \mathcal{G}_D(x, y)$ we have

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} f(y)v(y) dy &= - \int_{\Omega} v \Delta_y u dy + \int_{\Omega} q(y)u(y)v(y) dy \\ &= - \int_{\Omega} (v \Delta_y u - u \Delta_y v) dy + \int_{\Omega} u(-\Delta_y v + q(y)v(y)) dy \\ &\stackrel{(\text{V.16})}{=} - \int_{\partial\Omega} \left(v \frac{\partial u}{\partial n_y} - u \frac{\partial v}{\partial n_y} \right) d\sigma_y + \int_{\Omega} u(y)\delta(x - y) dy \\ &= \int_{\partial\Omega} g(y) \frac{\partial \mathcal{G}_D}{\partial n_y}(x, y) d\sigma_y + u(x), \end{aligned}$$

implicando la (V.26).

Invece, se consideriamo il problema al contorno (di Neumann)

$$(Lu)(x) \stackrel{\text{def}}{=} -\Delta u = f(x), \quad x \in \Omega, \quad (\text{VI.27a})$$

$$\frac{\partial u}{\partial n_x} = g(x), \quad x \in \partial\Omega, \quad (\text{VI.27b})$$

allora esiste una soluzione u del problema di Neumann (V.27) se e solo se $\int_{\Omega} f(x) dx = 0$, cioè, se e solo se $(f, \varphi_0) = 0$ per $\varphi_0(x) \equiv 1$ autofunzione di L (con condizione di Neumann) corrispondente all'autovalore $\lambda = 0$. L'unicità viene garantita richiedendo che $\int_{\Omega} u(x) dx = 0$. Cerchiamo ora la *funzione di*

Green $\mathcal{G}_N(x, y)$ tale che

$$L_y[\mathcal{G}_N(x, y)] = -\Delta_y \mathcal{G}_N(x, y) = \delta(x - y) - \frac{1}{m(\Omega)}, \quad (\text{VI.28a})$$

$$\frac{\partial \mathcal{G}_N}{\partial n_y}(x, y) = 0 \text{ per } y \in \partial\Omega, \quad (\text{VI.28b})$$

$$\int_{\Omega} \mathcal{G}_N(x, y) dx = 0, \quad (\text{VI.28c})$$

dove $m(\Omega)$ è la misura di Ω . Allora

$$u(x) = \int_{\Omega} \mathcal{G}_N(x, y) f(y) dy - \int_{\partial\Omega} \frac{\partial \mathcal{G}_N}{\partial n_y}(x, y) g(y) d\sigma(y). \quad (\text{VI.29})$$

Infatti, per $v(y) = \mathcal{G}_N(x, y)$ we have

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} f(y)v(y) dy &= - \int_{\Omega} v \Delta_y u dy \\ &= - \int_{\Omega} (v \Delta_y u - u \Delta_y v) dy + \int_{\Omega} u(-\Delta_y v) dy \\ &\stackrel{(\text{V.16})}{=} - \int_{\partial\Omega} \left(v \frac{\partial u}{\partial n_y} - u \frac{\partial v}{\partial n_y} \right) d\sigma_y + \int_{\Omega} u(y) \delta(x - y) dy \\ &\quad - \frac{1}{m(\Omega)} \int_{\Omega} u(y) dy = \int_{\partial\Omega} g(y) \frac{\partial \mathcal{G}_N}{\partial n_y}(x, y) d\sigma_y + u(x), \end{aligned}$$

piochè $\int_{\Omega} u(y) dy = 0$, implicando la (V.29).

3.1.a Equazione di Poisson negli intervalli

Siano $\Omega = (0, L)$ e $Lu = -u''$ con le condizioni **antiperiodiche** $u(0) = -u(L)$ e $u'(0) = -u'(L)$. Allora $\lambda = 0$ non è autovalore, $v_1(x) = (L/2) - x$ soddisfa $Lv_1 = 0$ con $v_1(0) = -v_1(L)$, e $v_2(x) = 1$ soddisfa $Lv_2 = 0$ con $v_2'(0) = -v_2'(L)$, mentre il Wronskiano $v_1 v_2' - v_1' v_2 = 1$. Ponendo $u(x) = c_1(x)v_1(x) + c_2(x)v_2(x)$ arriviamo al sistema lineare

$$\begin{pmatrix} v_1(x) & v_2(x) \\ v_1'(x) & v_2'(x) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1'(x) \\ c_2'(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -f(x) \end{pmatrix}$$

con soluzione $c_1'(x) = f(x)$ e $c_2'(x) = (x - \frac{1}{2}L)f(x)$. Quindi $c_1(x) = c_1 + \int_0^x f(y) dy$ e $c_2(x) = c_2 + \int_0^x (y - \frac{1}{2}L)f(y) dy$, e dunque

$$\begin{aligned} u(x) &= c_1 \left(\frac{1}{2}L - x \right) + c_2 + \left(\frac{1}{2}L - x \right) \int_0^x f(y) dy + \int_0^x \left(y - \frac{1}{2}L \right) f(y) dy, \\ u'(x) &= -c_1 - \int_0^x f(y) dy. \end{aligned}$$

Sostituendo le condizioni al contorno otteniamo

$$c_1 = -\frac{1}{2} \int_0^L f(y) dy, \quad c_2 = \frac{1}{2} \int_0^L (L-y)f(y) dy.$$

Di conseguenza,

$$u(x) = \int_0^L \mathcal{G}_{\text{antiper.}}(x, y) f(y) dy, \quad (\text{VI.30})$$

dove

$$\mathcal{G}_{\text{antiper.}}(x, y) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2}L - |x - y| \right).$$

Al contrario, sotto le condizioni di **Neumann** $u'(0) = -u'(L) = 0$ risulta

$$c_1 = -\frac{1}{2} \int_0^L f(y) dy = 0,$$

ristringendo così l'insieme delle f per cui esiste una soluzione. Dunque

$$u(x) = c_2 + \left(\frac{1}{2}L - x\right) \int_0^x f(y) dy + \int_0^x \left(y - \frac{1}{2}L\right) f(y) dy = c_2 - \int_0^x (x-y)f(y) dy.$$

Imponendo la condizione $\int_0^L u(y) dy = 0$, otteniamo

$$c_2 = \frac{1}{2L} \int_0^L (L-y)^2 f(y) dy.$$

Quindi $u(x)$ ha la forma (V.30), dove

$$\mathcal{G}_N(x, y) = \frac{1}{2L} (L - \max(x, y))^2.$$

Sotto le condizioni **periodiche** $u(0) = u(L)$ e $u'(0) = u'(L)$ partiamo dalle espressioni

$$\begin{aligned} u(x) &= c_1 x + c_2 - \int_0^x \int_0^z f(y) dy dz = c_1 x + c_2 - \int_0^x (x-y)f(y) dy, \\ u'(x) &= c_1 - \int_0^x f(y) dy. \end{aligned}$$

Quindi da $u'(0) = u'(L)$ segue la condizione necessaria $\int_0^L f(y) dy = 0$ per l'esistenza di una soluzione. Da $u(0) = u(L)$ seguono

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{1}{L} \int_0^L (L-y)f(y) dy, \\ u(x) &= c_2 + \frac{x}{L} \int_0^L (L-y)f(y) dy - \int_0^x (x-y)f(y) dy. \end{aligned}$$

Per trovare la soluzione unica supponiamo che $\int_0^L u(y) dy = 0$. Allora

$$\begin{aligned} c_2 &= -\frac{1}{2L} \int_0^L y(L-y)f(y) dy \\ &= -\frac{1}{2L} \int_0^L y(L-y)f(y) dy - \frac{1}{2L} x(L-x) \int_0^L f(y) dy. \end{aligned}$$

Quindi $u(x)$ ha la forma (V.30), dove

$$\mathcal{G}_{\text{per.}}(x, y) = -\frac{1}{2L} |x-y|(L-|x-y|).$$

3.1.b Funzione di Green in \mathbb{R}^n

Introducendo $r = \|(x_1, \dots, x_n)\|_2 = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_n^2}$ e $\boldsymbol{\omega} = (x_1, \dots, x_n)/r$, il Laplaciano ha la seguente forma:

$$\Delta\psi = \frac{1}{r^{n-1}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^{n-1} \frac{\partial\psi}{\partial r} \right) - \frac{1}{r^2} (L_B\psi)(\boldsymbol{\omega}), \quad (\text{VI.31})$$

dove L_B è il cosiddetto *operatore di Beltrami* n -dimensionale. Applicando il Laplaciano al polinomio omogeneo armonico $r^l y(\boldsymbol{\omega})$ di grado l (essendo $y(\boldsymbol{\omega})$ una funzione sferica) otteniamo

$$(L_B y)(\boldsymbol{\omega}) = l(l+n-2)y(\boldsymbol{\omega}), \quad \boldsymbol{\omega} \in S^{n-1}. \quad (\text{VI.32})$$

Quindi le funzioni sferiche sono le autofunzioni dell'operatore di Beltrami.

Consideriamo ora l'equazione di Poisson

$$\Delta\mathcal{G}(\boldsymbol{x}) = -\frac{\delta(r)}{\Omega_n r^{n-1}}, \quad (\text{VI.33})$$

dove $\boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^n$, $r = |\boldsymbol{x}|$ e $\Omega_n = m(S^{n-1})$.³ Allora $\mathcal{G}(\boldsymbol{x})$ dipende soltanto da $r = |\boldsymbol{x}|$ e

$$\frac{d}{dr} \left(r^{n-1} \frac{d\mathcal{G}}{dr} \right) = -\frac{\delta(r)}{\Omega_n}, \quad r > 0. \quad (\text{VI.34})$$

³Sia V_n la misura della palla di raggio 1 in \mathbb{R}^n . Allora $V_n r^n = \int_0^r d\hat{r} \hat{r}^{n-1} \Omega_n = \Omega_n r^n / n$. Inoltre,

$$\begin{aligned} V_n &= \int_{-1}^1 dx_1 \int_{-\sqrt{1-x_1^2}}^{\sqrt{1-x_1^2}} dx_2 \int_{-\sqrt{1-x_1^2-x_2^2}}^{\sqrt{1-x_1^2-x_2^2}} dx_3 \dots \int_{-\sqrt{1-x_1^2-\dots-x_{n-1}^2}}^{\sqrt{1-x_1^2-\dots-x_{n-1}^2}} dx_n \\ &= \int_{-1}^1 dx_1 V_{n-1} (\sqrt{1-x_1^2})^{n-1} = V_{n-1} B\left(\frac{1}{2}, \frac{n+1}{2}\right) \\ &= V_{n-2} B\left(\frac{1}{2}, \frac{n+1}{2}\right) B\left(\frac{1}{2}, \frac{n}{2}\right) = V_{n-2} \frac{\Gamma(\frac{1}{2})\Gamma(\frac{n+1}{2})}{\Gamma(\frac{n}{2}+1)} \frac{\Gamma(\frac{1}{2})\Gamma(\frac{n}{2})}{\Gamma(\frac{n+1}{2})} = \frac{2\pi}{n} V_{n-2}. \end{aligned}$$

Quindi $\Omega_{2p} = 2\pi^p / (p-1)!$ e $\Omega_{2p+1} = \pi^p 2^{2p+1} (p!) / (2p)!$

Risolviendo la (V.34) sotto la condizione che $\mathcal{G}(r) \rightarrow 0$ per $r \rightarrow +\infty$ (solo fattibile se $n \geq 3$) e applicando il Teorema della Divergenza alla (V.33), si trova⁴

$$\mathcal{G}(r) = \begin{cases} -(2\pi)^{-1} \log(r), & n = 2, \\ \frac{\Gamma(n/2)}{2(n-2)\pi^{n/2}} \frac{1}{r^{n-2}}, & n \geq 3, \\ 1/(4\pi r), & n = 3. \end{cases} \quad (\text{VI.35})$$

Quindi la soluzione dell'equazione $\Delta_{\mathbf{y}} \mathcal{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \delta(\mathbf{x} - \mathbf{y})$ nell'intero spazio è $\mathcal{G}(\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|)$. In altre parole, la soluzione unica dell'equazione di Poisson

$$\Delta u = -\rho(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n,$$

ha la seguente forma (per $n \geq 3$)

$$u(\mathbf{x}) = \int_{\mathbb{R}^n} d\mathbf{y} \mathcal{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \rho(\mathbf{y}) = \frac{\Gamma(n/2)}{2(n-2)\pi^{n/2}} \int_{\mathbb{R}^n} d\mathbf{y} \frac{\rho(\mathbf{y})}{\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^{n-2}}. \quad (\text{VI.36})$$

Per $n = 3$ otteniamo l'espressione

$$u(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} \int_{\mathbb{R}^3} d\mathbf{y} \frac{\rho(\mathbf{y})}{\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|}$$

nota dall'elettrodinamica.

Consideriamo ora l'equazione di Poisson n -dimensionale

$$-\Delta v = f(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \Omega,$$

dove Ω è un sottoinsieme aperto, limitato e connesso di \mathbb{R}^n e la sua frontiera $\partial\Omega$ è un'ipersuperficie regolare a tratti. In generale la funzione

$$v(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} \mathcal{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) f(\mathbf{y}) d\mathbf{y}, \quad \mathbf{x} \in \Omega,$$

non soddisfa alle condizioni al contorno. Siano

$$v(\mathbf{x}_b) = \int_{\Omega} \mathcal{G}(\mathbf{x}_b, \mathbf{y}) f(\mathbf{y}) d\mathbf{y}, \quad (\text{VI.37a})$$

$$\frac{\partial v}{\partial n}(\mathbf{x}_b) = \int_{\Omega} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial n_x}(\mathbf{x}_b, \mathbf{y}) f(\mathbf{y}) d\mathbf{y}, \quad (\text{VI.37b})$$

dove $\mathbf{x}_b \in \partial\Omega$. Sia

$$w(\mathbf{x}) = \int_{\partial\Omega} \mathcal{G}_{\text{Dir}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) g(\mathbf{y}) d\sigma_{\mathbf{y}}, \quad \mathbf{x} \in \Omega,$$

⁴Per $n = 2$ la funzione di Green non tende a zero all'infinito, creando parecchi problemi tecnici nel trattamento dell'equazione di Poisson nell'intero piano.

la soluzione unica dell'equazione di Laplace $\Delta w = 0$ in Ω con condizione al contorno $w|_{\partial\Omega} = g$. Allora il problema al contorno

$$-\Delta u = f(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad (\text{VI.38a})$$

$$u(\mathbf{x}_b) = g(\mathbf{x}_b), \quad \mathbf{x}_b \in \partial\Omega, \quad (\text{VI.38b})$$

ha la soluzione unica che ha la forma

$$\begin{aligned} u(\mathbf{x}) &= \int_{\Omega} \mathcal{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) f(\mathbf{y}) d\mathbf{y} + \int_{\partial\Omega} \mathcal{G}_{\text{Dir}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \left(g(\mathbf{y}) - \int_{\Omega} \mathcal{G}(\mathbf{y}, \mathbf{z}) f(\mathbf{z}) dz \right) d\sigma_{\mathbf{y}} \\ &= \int_{\Omega} \left[\mathcal{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - \int_{\partial\Omega} \mathcal{G}_{\text{Dir}}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \mathcal{G}(\mathbf{z}, \mathbf{y}) d\sigma_{\mathbf{z}} \right] f(\mathbf{y}) d\mathbf{y} \\ &\quad + \int_{\partial\Omega} \mathcal{G}_{\text{Dir}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) g(\mathbf{y}) d\sigma_{\mathbf{y}}. \end{aligned} \quad (\text{VI.39})$$

Dunque se $g(\mathbf{x}) = 0$ per $x \in \partial\Omega$ [il problema di Dirichlet omogeneo], la funzione di Green $\mathcal{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ è da correggere da un termine regolare.

In modo analogo, sia

$$w(\mathbf{x}) = \int_{\partial\Omega} \mathcal{G}_{\text{Neu}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) h(\mathbf{y}) d\sigma_{\mathbf{y}}, \quad \mathbf{x} \in \Omega,$$

la soluzione dell'equazione di Laplace $\Delta w = 0$ in Ω con condizione al contorno $(\partial w / \partial n)|_{\partial\Omega} = h$, dove $\int_{\Omega} w(\mathbf{y}) d\mathbf{y} = 0$. Una tale soluzione esiste (e è unica) se e solo se $\int_{\partial\Omega} h(\mathbf{y}) d\sigma_{\mathbf{y}} = 0$. Allora sotto la condizione $\int_{\partial\Omega} h(\mathbf{y}) d\sigma_{\mathbf{y}} = 0$ il problema al contorno

$$-\Delta u = f(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad (\text{VI.40a})$$

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}_b) = h(\mathbf{x}_b), \quad \mathbf{x}_b \in \partial\Omega, \quad (\text{VI.40b})$$

$$\int_{\Omega} u(\mathbf{y}) d\mathbf{y} = 0, \quad (\text{VI.40c})$$

ha la soluzione unica che ha la forma

$$\begin{aligned} u(\mathbf{x}) &= \int_{\Omega} \mathcal{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) f(\mathbf{y}) d\mathbf{y} + \int_{\partial\Omega} \mathcal{G}_{\text{Neu}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \left(h(\mathbf{y}) - \int_{\Omega} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial n_{\mathbf{y}}}(\mathbf{y}, \mathbf{z}) f(\mathbf{z}) dz \right) d\sigma_{\mathbf{y}} \\ &= \int_{\Omega} \left[\mathcal{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - \int_{\partial\Omega} \mathcal{G}_{\text{Neu}}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial n_{\mathbf{z}}}(\mathbf{z}, \mathbf{y}) d\sigma_{\mathbf{z}} \right] f(\mathbf{y}) d\mathbf{y} \\ &\quad + \int_{\partial\Omega} \mathcal{G}_{\text{Neu}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) h(\mathbf{y}) d\sigma_{\mathbf{y}}. \end{aligned} \quad (\text{VI.41})$$

Dunque se $h(\mathbf{x}) = 0$ per $x \in \partial\Omega$ [il problema di Neumann omogeneo], la funzione di Green $\mathcal{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ è da correggere da un termine regolare.

Utilizzando il linguaggio dell'elettrodinamica consideriamo ora il potenziale di un dipolo. Sia $h > 0$ piccola. Consideriamo le cariche $-1/h$ e $1/h$ nei punti \mathbf{x}_0 e $\mathbf{x}_0 + h\mathbf{e}$, dove $\|\mathbf{e}\|_2 = 1$. Il corrispondente potenziale u soddisfa all'equazione di Poisson

$$-\Delta u = \frac{1}{h} \{\delta(\mathbf{x} - (\mathbf{x}_0 + h\mathbf{e})) - \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)\}. \quad (\text{VI.42})$$

Per $h \rightarrow 0^+$ la parte a destra tende alla derivata di $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$ nella direzione \mathbf{e} rispetto alla variabile \mathbf{x}_0 . In altre parole, la parte a destra dell'equazione (V.42) tende a

$$\mathbf{e} \cdot \nabla_{\mathbf{x}_0} \frac{1}{4\pi\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|_2} = \frac{\mathbf{e} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)}{4\pi\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|_2^3} = \frac{\cos\theta}{4\pi\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|_2^2}$$

se $h \rightarrow 0^+$, dove θ è l'angolo tra i vettori $\mathbf{x} - \mathbf{x}_0$ e \mathbf{e} . Partendo da una distribuzione di dipoli normali alla superficie $\partial\Omega$ (da una cosiddetta double layer) con densità $b \in L^1(\partial\Omega, d\sigma)$, otteniamo

$$u(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} \int_{\partial\Omega} b(\boldsymbol{\xi}) \frac{\cos(\text{angolo}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\xi}, n(\boldsymbol{\xi})))}{\|\mathbf{x} - \boldsymbol{\xi}\|_2^2} d\sigma(\boldsymbol{\xi}). \quad (\text{VI.43})$$

L'espressione (V.43) si dice double layer potential.⁵

Consideriamo ora una distribuzione di cariche su una superficie $\partial\Omega$. Allora il corrispondente potenziale (con densità $a \in L^1(\partial\Omega; d\sigma(\xi))$) ha la forma

$$u(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} \int_{\partial\Omega} \frac{a(\boldsymbol{\xi})}{\|\mathbf{x} - \boldsymbol{\xi}\|_2} d\sigma(\boldsymbol{\xi}). \quad (\text{VI.44})$$

L'espressione (V.44) si dice single layer potential.⁴

3.1.c Equazione di Laplace nel semipiano

Consideriamo l'equazione di Laplace

$$\Delta u = 0 \quad (\text{VI.45})$$

nel semipiano $\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : y > 0\}$ sotto la condizione $u(x, 0) = u_0(x)$. Siccome $e^{i\lambda x} e^{-|\lambda|y}$ è soluzione dell'equazione di Laplace limitata nel piano superiore qualunque sia $\lambda \in \mathbb{R}$, rappresentiamo la soluzione della (V.45) nella forma

$$u(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} c(\lambda) e^{i\lambda x} e^{-|\lambda|y} d\lambda,$$

⁵Questa espressione non rende conto di un'eventuale condizione al contorno. In tal caso ci vuole una correzione da un termine regolare come in (V.39) e (V.41).

dove $c \in L^2(\mathbb{R})$. Sostituendo $y = 0$ si ottiene

$$u_0(x) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda x} c(\lambda) d\lambda,$$

che vuol dire che $u_0 \in L^2(\mathbb{R})$ e $\|c\|_2 = (2\pi)^{1/2} \|u_0\|_2$. Invertendo la trasformata di Fourier si ha

$$c(\lambda) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\lambda x} u_0(x) dx.$$

Infine otteniamo

$$u(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{G}(x, \hat{x}; y) u_0(\hat{x}) d\hat{x}, \quad (\text{VI.46})$$

dove la funzione di Green ha l'espressione

$$\mathcal{G}(x, \hat{x}; y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda(x-\hat{x})} e^{-|\lambda|y} d\lambda = \frac{1}{\pi} \frac{y}{y^2 + (x - \hat{x})^2}. \quad (\text{VI.47})$$

Ovviamente sono operatori lineari limitati le trasformazioni $u_0 \mapsto u(\cdot, y)$ per ogni $y \geq 0$ (da $L^2(\mathbb{R})$ in se stesso) e $u_0 \mapsto u$ (da $L^2(\mathbb{R})$ in $l^2(\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : y > 0\})$). Inoltre la trasformazione $u_0 \mapsto u(\cdot, y)$ è limitato da $BC(\mathbb{R})$ [oppure $C_0(\mathbb{R})$] in se stesso, uniformemente in $y \geq y_0$ per ogni $y_0 > 0$.

3.1.d Equazione di Laplace nel disco

Consideriamo l'equazione di Laplace (V.45) nel disco $D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : \sqrt{x^2 + y^2} < L\}$ sotto le condizioni al contorno

$$u = g \text{ sul bordo } \partial D. \quad (\text{VI.48})$$

Ponendo $\Omega = D$, assumiamo che g sia continua sulla circonferenza ∂D , e cerchiamo una soluzione $u \in C^2(\Omega) \cap C^1(\bar{\Omega})$. In coordinate polari l'equazione di Laplace ha la forma

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} = 0,$$

dove $0 \leq \theta < 2\pi$ (con periodicità) e $0 < r < L$ con continuità della soluzione per $r \rightarrow 0^+$. La separazione delle variabili conduce alle soluzioni $u_0(r)$, $u_m(r) \cos m\theta$ e $u_m(r) \sin m\theta$, dove $m = 0, 1, 2, \dots$ e la funzione $u_m(r)$ soddisfa l'equazione differenziale ordinaria

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du_m}{dr} \right) - \frac{m^2}{r^2} u_m(r) = 0. \quad (\text{VI.49})$$

L'equazione (V.48) è un'equazione di Eulero $[r^2 u_m''(r) + r u_m'(r) - m^2 u_m(r) = 0]$ con la soluzione generale

$$u_m(r) = \begin{cases} c_1 + c_2 \ln(r), & m = 0 \\ c_1 r^m + c_2 r^{-m}, & m = 1, 2, \dots, \end{cases}$$

dove c_1 e c_2 sono costanti arbitrarie. La continuità se $r \rightarrow 0^+$ conduce ad una soluzione costante se $m = 0$ e una proporzionale a r^m se $m = 1, 2, \dots$. Quindi la soluzione generale ha la forma

$$u(r, \theta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} r^n (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta), \quad (\text{VI.50})$$

dove $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \dots$ sono opportune costanti.

Sostituiamo $r = L$ in (V.50) e applichiamo la condizione al contorno $u(L, \theta) = g(\theta)$. Risulta

$$g(\theta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} L^n (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta). \quad (\text{VI.51})$$

Applicando la teoria delle serie di Fourier abbiamo for $n = 1, 2, \dots$

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g(\theta) d\theta \\ a_n L^n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g(\theta) \cos n\theta d\theta, & b_n L^n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g(\theta) \sin n\theta d\theta, \end{cases}$$

dove la serie (V.51) è uniformemente convergente in $\theta \in [-\pi, \pi]$ se $g(\theta)$ è continua (con $g(-\pi) = g(\pi)$) e regolare a tratti.

Sostituiamo ora le espressioni per i coefficienti di Fourier nell'espressione per la $u(r, \theta)$. Risulta

$$\begin{aligned} u(r, \theta) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{L} \right)^n [\cos n\theta \cos n\hat{\theta} + \sin n\theta \sin n\hat{\theta}] \right) g(\hat{\theta}) d\hat{\theta} \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left[\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{L} \right)^n \cos n(\theta - \hat{\theta}) \right] g(\hat{\theta}) d\hat{\theta} \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{2} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left(\frac{r}{L} e^{i(\theta - \hat{\theta})} \right)^n + \left(\frac{r}{L} e^{-i(\theta - \hat{\theta})} \right)^n \right\} \right] g(\hat{\theta}) d\hat{\theta} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{2} \left[1 + \left\{ \frac{e^{i(\theta-\hat{\theta})} \frac{r}{L}}{1 - e^{i(\theta-\hat{\theta})} \frac{r}{L}} + \frac{e^{-i(\theta-\hat{\theta})} \frac{r}{L}}{1 - e^{-i(\theta-\hat{\theta})} \frac{r}{L}} \right\} \right] g(\hat{\theta}) d\hat{\theta} \\
&= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1 - \left(\frac{r}{L}\right)^2}{1 - 2\frac{r}{L} \cos(\theta - \hat{\theta}) + \left(\frac{r}{L}\right)^2} g(\hat{\theta}) d\hat{\theta} \\
&= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{L^2 - r^2}{L^2 - 2rL \cos(\theta - \hat{\theta}) + r^2} g(\hat{\theta}) d\hat{\theta},
\end{aligned}$$

il cosiddetto *integrale di Poisson*. Osserviamo che il nucleo di Poisson

$$\frac{1}{2\pi} \frac{L^2 - r^2}{L^2 - 2rL \cos(\theta - \hat{\theta}) + r^2}$$

è simmetrico in r e L e simmetrico in θ e $\hat{\theta}$. Inoltre, è strettamente positivo; le sue uniche singolarità si trovano sulla circonferenza $r = L$ per $\theta = \hat{\theta}$.

Invece, se risolviamo l'equazione di Laplace in D sotto la condizione di Neumann

$$\frac{\partial u}{\partial n} = h \text{ sul bordo } \partial D, \quad (\text{VI.52})$$

ci vuole la condizione necessaria $\int_{-\pi}^{\pi} h(\theta) d\theta = 0$ per l'esistenza della soluzione. Siccome la derivata normale esterna coincide con quella radiale, cerchiamo la soluzione $u(r, \theta)$ nella forma (V.50) con $a_0 = 0$ (per garantirne l'unicità), dove

$$h(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} nr^{n-1} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta). \quad (\text{VI.53})$$

Applicando la teoria delle serie di Fourier risultano

$$na_n L^{n-1} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} h(\theta) \cos n\theta d\theta, \quad nb_n L^{n-1} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} h(\theta) \sin n\theta d\theta,$$

dove la serie (V.53) è uniformemente convergente in $\theta \in [-\pi, \pi]$ se $h(\theta)$ è continua, regolare a tratti e periodica nel senso che $h(-\pi) = h(\pi)$. Sostituiamo ora le espressioni per i coefficienti di Fourier nell'espressione per la $u(r, \theta)$. Risulta

$$\begin{aligned}
u(r, \theta) &= \frac{L}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{r}{L}\right)^n \left[\cos n\theta \cos n\hat{\theta} + \sin n\theta \sin n\hat{\theta} \right] h(\hat{\theta}) d\hat{\theta} \\
&= \frac{L}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{r}{L}\right)^n \cos n(\theta - \hat{\theta}) h(\hat{\theta}) d\hat{\theta} \\
&= -\frac{L}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \log \left(1 - 2\frac{r}{L} \cos(\theta - \hat{\theta}) + \frac{r^2}{L^2} \right) h(\hat{\theta}) d\hat{\theta},
\end{aligned}$$

dove abbiamo utilizzato $\sum_{n=1}^{\infty} (z^n/n) = -\log(1-z)$ per $|z| < 1$.⁶

3.1.e Equazione di Laplace e funzioni analitiche

Ogni insieme aperto Ω in \mathbb{R}^2 corrisponde ad un unico insieme aperto $\tilde{\Omega}$ in \mathbb{C} nel seguente modo:

$$(x, y) \in \Omega \iff x + iy \in \tilde{\Omega}, \quad z \in \tilde{\Omega} \iff (\operatorname{Re} z, \operatorname{Im} z) \in \Omega.$$

Ad ogni funzione analitica $f : \tilde{\Omega} \rightarrow \mathbb{C}$ corrispondono due funzioni $u, v : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ di classe C^∞ che soddisfano alle cosiddette *equazioni di Cauchy-Riemann*

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{\partial u}{\partial y}. \quad (\text{VI.54})$$

Infatti, $u(x, y) = \operatorname{Re} f(x + iy)$ e $v(x, y) = \operatorname{Im} f(x + iy)$ per $(x, y) \in \Omega$. Di conseguenza, u and v sono *funzioni armoniche* nel senso che

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 0. \quad (\text{VI.55})$$

D'altra parte, ogni coppia di funzioni armoniche $u, v : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ di classe C^2 che soddisfa alle equazioni di Cauchy-Riemann (V.54) determina un'unica funzione analitica $f : \tilde{\Omega} \rightarrow \mathbb{C}$ tale che $u(x, y) = \operatorname{Re} f(x + iy)$ e $v(x, y) = \operatorname{Im} f(x + iy)$ per $(x, y) \in \Omega$. Le funzioni armoniche u, v si dicono *coniugate armoniche*.⁷

Consideriamo ora $\Omega = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : \sqrt{x^2 + y^2} < L\}$ e dunque $\tilde{\Omega} = \{z \in \mathbb{C} : |z| < L\}$. Come nella Subsection 3.1.d, cerchiamo una funzione armonica $u : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ che soddisfa alla condizione di Dirichlet (V.48). Sia $v : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ una coniugata armonica di u e sia $f : \tilde{\Omega} \rightarrow \mathbb{C}$ la funzione analitica definita da $f(x + iy) = u(x, y) + iv(x, y)$ per $(x, y) \in \Omega$. Scegliendo $\rho \in (0, L)$, applichiamo ora la formula integrale di Cauchy

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \oint_{|\zeta|=\rho} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta, \quad |z| < \rho.$$

Sia $z^* = \rho^2/\bar{z}$. Allora $|z^*| = \rho^2/|z| > \rho$. Dal Teorema di Cauchy segue

$$\frac{1}{2\pi i} \oint_{|\zeta|=\rho} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z^*} d\zeta = 0.$$

⁶Si intende il ramo del logaritmo che è una funzione analitica nel semipiano complesso destro con valore $\log(1) = 0$.

⁷Conoscendo u , si può trovare v dalle equazioni di Cauchy-Riemann, ma tranne un termine costante arbitrario.

Di conseguenza,

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \oint_{|\zeta|=\rho} f(\zeta) \left[\frac{1}{\zeta - z} - \frac{1}{\zeta - z^*} \right] d\zeta. \quad (\text{VI.56})$$

Ponendo $\zeta = \rho e^{i\hat{\theta}}$ e $z = r e^{i\theta}$ si calcola facilmente che

$$\begin{aligned} \frac{1}{\zeta - z} - \frac{1}{\zeta - z^*} &= \frac{1}{\zeta - z} - \frac{1}{\zeta - \frac{\zeta\bar{\zeta}}{z}} = \frac{|\zeta|^2 - |z|^2}{\zeta|\zeta - z|^2} \\ &= \frac{\rho^2 - r^2}{\rho e^{i\hat{\theta}}(\rho e^{i\hat{\theta}} - r e^{i\theta})(\rho e^{-i\hat{\theta}} - r e^{-i\theta})} \\ &= \frac{\rho^2 - r^2}{\rho e^{i\hat{\theta}}(\rho^2 + r^2 - 2\rho r \cos(\theta - \hat{\theta}))}. \end{aligned}$$

Sostituendolo nella (V.56) otteniamo

$$\begin{aligned} u(re^{i\theta}) &= \frac{1}{2\pi i} \int_{-\pi}^{\pi} f(\rho e^{i\hat{\theta}}) \frac{\rho^2 - r^2}{\rho e^{i\hat{\theta}}(\rho^2 + r^2 - 2\rho r \cos(\theta - \hat{\theta}))} i \rho e^{i\hat{\theta}} d\hat{\theta} \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\rho e^{i\hat{\theta}}) \frac{\rho^2 - r^2}{\rho^2 + r^2 - 2\rho r \cos(\theta - \hat{\theta})} d\hat{\theta}. \end{aligned}$$

Infine, per $\rho \rightarrow L^-$ risulta per $r \in [0, L)$ l'integrale di Poisson

$$u(re^{i\theta}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g(\hat{\theta}) \frac{L^2 - r^2}{L^2 + r^2 - 2Lr \cos(\theta - \hat{\theta})} d\hat{\theta}.$$

Sia Ξ un sottoinsieme aperto e semplicemente connesso⁸ di \mathbb{R}^2 tali che $\Xi \subsetneq \mathbb{R}^2$. Secondo il Teorema di Riemann ([10], Vol. III, Th. 1.2) esiste una trasformazione biunivoca e analitica $\tilde{\phi} : \Xi \rightarrow \tilde{\Omega}$. In tal caso anche la trasformazione inversa $\tilde{\phi}^{-1} : \tilde{\Omega} \rightarrow \Xi$ è analitica. Le trasformazioni $\tilde{\phi}$ e $\tilde{\phi}^{-1}$ si chiamano *trasformazioni conformi*. Definiamo ora $\phi : \Xi \rightarrow \Omega$ da

$$\phi(x, y) = (\operatorname{Re} \tilde{\phi}(x + iy), \operatorname{Im} \tilde{\phi}(x + iy)), \quad (x, y) \in \Xi.$$

Allora ϕ induce una corrispondenza biunivoca tra funzioni armoniche in Ξ e funzioni armoniche in Ω . Le funzioni armoniche in Ξ sono le funzioni $\phi^{-1} \circ u \circ \phi$, dove u è armonica nel disco Ω . Conoscendo le trasformazioni conformi tra Ξ e il disco Ω tali che c'è anche la corrispondenza biunivoca tra i punti delle loro frontiera, si può risolvere l'equazione di Laplace in Ξ sotto la condizione di Dirichlet utilizzando le trasformazioni conformi e l'integrale di Poisson.

⁸Cioé, tale che il complementare $\mathbb{R}^2 \setminus \Xi$ è connesso, cioè un dominio senza buchi.

3.1.f Equazione di Laplace nella sfera n -dimensionale

Per $n \geq 2$ conviene cercare le soluzioni dell'equazione di Laplace $\Delta u = 0$ nella regione sferica $\{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n : \|\mathbf{x}\|_2 < L\}$ nella seguente forma:

$$u(r, \boldsymbol{\omega}) = \left(\frac{r}{L}\right)^l y(\boldsymbol{\omega}), \quad r > 0, \boldsymbol{\omega} \in S^{n-1}, \quad (\text{VI.57})$$

dove $y(\boldsymbol{\omega})$ è una funzione sferica di grado $l = 0, 1, 2, \dots$. Sia $N(l, n)$ il numero delle funzioni sferiche di grado l in n variabili linearmente indipendenti.⁹ Allora esiste una base ortonormale

$$\{y_{l,s}(\boldsymbol{\omega})\}_{s=1, \dots, N(l,n); l=0,1,2, \dots}$$

dello spazio di Hilbert $L^2(S^{n-1})$ che consiste esclusivamente in funzioni sferiche. Data la funzione $g \in L^2(S^{n-1})$, si ha lo sviluppo

$$g(\boldsymbol{\omega}) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{s=1}^{N(l,n)} c_{l,s} y_{l,s}(\boldsymbol{\omega}),$$

dove

$$c_{l,s} = (g, y_{l,s}) = \int_{S^{n-1}} g(\boldsymbol{\omega}) \overline{y_{l,s}(\boldsymbol{\omega})} d\boldsymbol{\omega}.$$

In tal caso la funzione armonica $u(r, \boldsymbol{\omega})$ nella regione sferica di raggio L che soddisfa alla condizione di Dirichlet $u(L, \boldsymbol{\omega}) = g(\boldsymbol{\omega})$ ha la forma

$$u(r, \boldsymbol{\omega}) = \sum_{l=0}^{\infty} \left(\frac{r}{L}\right)^l \sum_{s=1}^{N(l,n)} c_{l,s} y_{l,s}(\boldsymbol{\omega}) = \int_{S^{n-1}} \mathcal{G}(r, \boldsymbol{\omega}, \hat{\boldsymbol{\omega}}) g(\hat{\boldsymbol{\omega}}) d\hat{\boldsymbol{\omega}}, \quad (\text{VI.58})$$

dove

$$\mathcal{G}(r, \boldsymbol{\omega}, \hat{\boldsymbol{\omega}}) = \sum_{l=0}^{\infty} \left(\frac{r}{L}\right)^l \sum_{s=1}^{N(l,n)} y_{l,s}(\boldsymbol{\omega}) \overline{y_{l,s}(\hat{\boldsymbol{\omega}})}. \quad (\text{VI.59})$$

La funzione armonica $u(r, \boldsymbol{\omega})$ nella regione sferica che soddisfa alla condizione al contorno $\frac{\partial u}{\partial r}(L, \boldsymbol{\omega}) = h(\boldsymbol{\omega})$ ha la forma¹⁰

$$u(r, \boldsymbol{\omega}) = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{L}{l} \left(\frac{r}{L}\right)^{l-1} \sum_{s=1}^{N(l,n)} c_{l,s} y_{l,s}(\boldsymbol{\omega}) = \int_{S^{n-1}} \mathcal{H}(r, \boldsymbol{\omega}, \hat{\boldsymbol{\omega}}) g(\hat{\boldsymbol{\omega}}) d\hat{\boldsymbol{\omega}}, \quad (\text{VI.60})$$

⁹Quindi $N(0, n) = 1$, $N(1, n) = n$, $N(l, 2) = 2$ per $l \geq 1$, $N(l, 3) = 2l + 1$, $N(l, 4) = (l + 1)^2$, e $N(l, n) = \frac{(2l+n-2)(l+n-3)!}{l!(n-2)!}$.

¹⁰Si spieghi poichè $\mathcal{G}(r, \boldsymbol{\omega}, \hat{\boldsymbol{\omega}})$ e $\mathcal{H}(r, \boldsymbol{\omega}, \hat{\boldsymbol{\omega}})$ dipendono soltanto da (r/L) e $\boldsymbol{\omega} \cdot \hat{\boldsymbol{\omega}}$.

dove

$$\mathcal{H}(r, \boldsymbol{\omega}, \hat{\boldsymbol{\omega}}) = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{L}{l} \left(\frac{r}{L}\right)^{l-1} \sum_{s=1}^{N(l,n)} y_{l,s}(\boldsymbol{\omega}) \overline{y_{l,s}(\hat{\boldsymbol{\omega}})}. \quad (\text{VI.61})$$

Per l'esistenza bisogna richiedere $\int_{S^{n-1}} h(\boldsymbol{\omega}) d\boldsymbol{\omega} = 0$, mentre per l'unicità richiediamo $\int_{\Omega} u(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = 0$.

Per $n = 2$ abbiamo $N(l, 2) = 2 - \delta_{l,0}$, $\boldsymbol{\omega} \equiv \theta \in [0, 2\pi]$, $y_{0,1}(\boldsymbol{\omega}) = (2\pi)^{-1/2}$, $y_{l,1}(\boldsymbol{\omega}) = \pi^{-1/2} \cos(l\theta)$, e $y_{l,2}(\boldsymbol{\omega}) = \pi^{-1/2} \sin(l\theta)$. Dunque

$$\mathcal{G}(r, \theta, \hat{\theta}) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \sum_{l=1}^{\infty} \left(\frac{r}{L}\right)^l \cos l(\theta - \hat{\theta}) \right) = \frac{1}{2\pi} \frac{L^2 - r^2}{L^2 - 2rL \cos(\theta - \hat{\theta}) + r^2},$$

$$\mathcal{H}(r, \theta, \hat{\theta}) = \frac{1}{\pi} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{L}{l} \left(\frac{r}{L}\right)^{l-1} \cos l(\theta - \hat{\theta}) = \frac{1}{2\pi} \log \frac{L^2}{L^2 - 2rL \cos(\theta - \hat{\theta}) + r^2}.$$

3.2 Equazione di Helmholtz

Utilizzando la (V.31) e la (V.32) e applicando la separazione delle variabili $\psi(r, \boldsymbol{\omega}) = R(r)\psi(\boldsymbol{\omega})$ (con $r > 0$ e $\boldsymbol{\omega} \in S^{n-1}$) all'equazione di Helmholtz n -dimensionale

$$\Delta\psi + k^2\psi = \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2\psi}{\partial x_j^2} + k^2\psi = 0, \quad (\text{VI.62})$$

otteniamo l'equazione differenziale ordinaria

$$\frac{1}{r^{n-1}} \frac{d}{dr} \left(r^{n-1} \frac{dR}{dr} \right) + \left(k^2 - \frac{l(l+n-2)}{r^2} \right) R(r) = 0, \quad (\text{VI.63})$$

mentre $y(\boldsymbol{\omega})$ è una funzione sferica di grado l in n variabili. Per $n = 2$ risulta l'equazione di Bessel di ordine l nella variabile kr . La sostituzione $R(r) = r^\gamma \tilde{R}(r)$ nella (V.63) rende

$$\tilde{R}''(r) + \frac{2\gamma + n - 1}{r} \tilde{R}'(r) + \left(k^2 - \frac{(l - \gamma)(l + \gamma + n - 2)}{r^2} \right) \tilde{R}(r) = 0.$$

Per $\gamma = 1 - \frac{1}{2}n$ risulta l'equazione di Bessel di ordine $l - 1 + \frac{1}{2}n$ nella variabile kr

$$\tilde{R}''(r) + \frac{1}{r} \tilde{R}'(r) + \left(k^2 - \frac{(l - 1 + \frac{1}{2}n)^2}{r^2} \right) \tilde{R}(r) = 0. \quad (\text{VI.64})$$

Per risolvere l'equazione di Helmholtz non omogenea

$$\Delta u + k^2 u(\mathbf{x}) = -f(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \quad (\text{VI.65})$$

nella forma

$$u(\mathbf{x}) = \int_{\mathbb{R}^n} \mathcal{E}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) f(\mathbf{y}) d\mathbf{y}, \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n,$$

bisogna introdurre una funzione $\mathcal{E}_n(r)$ tale che (i) $\mathcal{E}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathcal{E}_n(\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|)$, (ii) vale l'equazione differenziale

$$\frac{1}{r^{n-1}} \frac{d}{dr} \left(r^{n-1} \frac{d\mathcal{E}_n}{dr} \right) + k^2 \mathcal{E}_n(r) = -\frac{\delta(r)}{r^{n-1} \Omega_n},$$

dove Ω_n é la misura di S^{n-1} , e (iii) $\mathcal{E}_n(r)$ si comporta come onda sferica decrescente in R^n per $r \rightarrow +\infty$. Per le applicazioni in fisica e ingegneria in cui $\text{Im } k \geq 0$, otteniamo per $n \geq 3$ ¹¹

$$\mathcal{E}_n(r) = -\frac{1}{4\pi} \left(\frac{k}{r} \right)^{(n-2)/2} H_{(n-2)/2}^{(1)}(kr). \quad (\text{VI.66})$$

Infatti, per $n = 2, 3$ risulta

$$\mathcal{E}_n(r) = \begin{cases} \frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr), & n = 2, \\ e^{ikr} \\ \frac{1}{4\pi r}, & n = 3. \end{cases} \quad (\text{VI.67})$$

Per $n = 3$ la soluzione dell'equazione di Helmholtz (V.65) ha la forma

$$u(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} \int_{\mathbb{R}^n} \frac{e^{ik\|\mathbf{x}-\mathbf{y}\|}}{\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|} f(\mathbf{y}) d\mathbf{y}, \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n. \quad (\text{VI.68})$$

Consideriamo l'equazione di Helmholtz tridimensionale

$$\Delta u + k^2 u = \frac{1}{r^2} \left(r^2 \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{1}{r^2} L_B u + k^2 u = 0, \quad (\text{VI.69})$$

dove $\text{Im } k \geq 0$, $r = \|\mathbf{x}\|_2 > r_0 (> 0)$ e L_B è l'operatore di Beltrami. Allora

$$u(r, \theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l u_{l,m}(r) Y_l^m(\theta, \varphi), \quad (\text{VI.70})$$

dove

$$u_{l,m}(r) = \int_{S^2} u(r, \theta, \varphi) \overline{Y_{l,m}(\theta, \varphi)} \sin \varphi d\varphi d\theta.$$

¹¹Per $n \geq 3$ e $k \rightarrow 0$ deve risultare la (V.35). Ciò necessita uno studio del comportamento asintotico della funzione $H_{(n-2)/2}^{(1)}(kr)$ per $k \rightarrow 0$.

Sostituendo la (V.70) nella (V.69) e utilizzando $L_B Y_l^m = l(l+1)Y_l^m$ otteniamo

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{du_{l,m}}{dr} \right) + \left(k^2 - \frac{l(l+1)}{r^2} \right) u_{l,m}(r) = 0. \quad (\text{VI.71})$$

Ponendo $u_{l,m}(r) = r^{-1/2} v_{l,m}(r)$ si arriva all'equazione di Bessel

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv_{l,m}}{dr} \right) + \left(k^2 - \frac{(l + \frac{1}{2})^2}{r^2} \right) v_{l,m}(r) = 0.$$

La limitatezza della soluzione per $r \rightarrow +\infty$ (per $\text{Im } k \geq 0$) implica che $v_{l,m}(r) \sim H_{l+\frac{1}{2}}^{(1)}(kr)$. Di conseguenza

$$u(r, \theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{l,m} r^{-1/2} H_{l+\frac{1}{2}}^{(1)}(kr) Y_l^m(\theta, \varphi). \quad (\text{VI.72})$$

Nel caso n -dimensionale ($n \geq 2$) abbiamo invece della (V.69)

$$\Delta u + k^2 u = \frac{1}{r^{n-1}} \left(r^{n-1} \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{1}{r^{n-1}} L_B u + k^2 u = 0, \quad (\text{VI.73})$$

dove $\text{Im } k \geq 0$, $r = \|\mathbf{x}\|_2 > r_0 (> 0)$ e L_B è l'operatore di Beltrami n -dimensionale. Sviluppando la soluzione della (V.73) in funzioni sferiche (con $L_B y_l = l(l+n-2)y_l$, dove $l = 0, 1, 2, \dots$ è il grado del polinomio armonico omogeneo in n variabile che determina y_l), otteniamo invece della (V.71)

$$\frac{1}{r^{n-1}} \frac{d}{dr} \left(r^{n-1} \frac{du_{l,\mathbf{m}}}{dr} \right) + \left(k^2 - \frac{l(l+n-2)}{r^{n-1}} \right) u_{l,\mathbf{m}}(r) = 0, \quad (\text{VI.74})$$

dove \mathbf{m} parametrizza gli altri indici della funzione sferica. Ponendo $u_{l,\mathbf{m}}(r) = r^{-(n-2)/2} v_{l,\mathbf{m}}(r)$ arriviamo all'equazione di Bessel

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv_{l,\mathbf{m}}}{dr} \right) + \left(k^2 - \frac{[l + \frac{1}{2}(n-2)]^2}{r^2} \right) v_{l,\mathbf{m}}(r) = 0.$$

Dunque

$$u_{l,\mathbf{m}}(r) \sim r^{-(n-2)/2} H_{l+\frac{1}{2}(n-2)}(kr).$$

Di conseguenza,

$$u(r, \boldsymbol{\omega}) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{\mathbf{m}} a_{l,\mathbf{m}} r^{-(n-2)/2} H_{l+\frac{1}{2}(n-2)}^{(1)}(kr) y_l^{\mathbf{m}}(\boldsymbol{\omega}), \quad (\text{VI.75})$$

dove $\boldsymbol{\omega} \in S^{n-1}$. Per $n = 2$ le funzioni sferiche coincidono con quelle trigonometriche; in questo caso risulta

$$u(r, \theta) = \frac{a_0}{2} H_0^{(1)}(kr) + \sum_{l=1}^{\infty} \left(a_l H_l^{(1)}(kr) \cos(l\theta) + b_l H_l^{(1)}(kr) \sin(l\theta) \right).$$

4 Equazioni paraboliche

L'equazione del calore

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \Delta u + f,$$

dove $x \in \Omega \subset \mathbb{R}^3$, $a > 0$ e $t > 0$, ha una delle seguenti condizioni iniziali:

- a. La condizione iniziale $u(x, t = 0) = u_0(x)$ per $x \in \Omega$;
- b. La condizione al contorno $u|_S = u_S$ [specificando la temperatura al bordo], oppure $(\partial u / \partial n)|_S = -(u_1/k)$ [specificando il flusso di calore attraverso il bordo], oppure $k(\partial u / \partial n) + h(u - u_{\text{amb}})|_S = 0$ [dove u_{amb} è la temperatura dell'ambiente e h il coefficiente di scambio di calore]. In quest'equazione Ω è una regione con bordo S regolare a tratti.

L'equazione del calore si può generalizzare come

$$\frac{du}{dt} = -Lu(t) + f(t), \quad t > 0, \quad (\text{VI.76})$$

con condizione iniziale

$$u(t = 0) = u_0, \quad (\text{VI.77})$$

dove L è un operatore di Sturm-Liouville autoaggiunto sullo spazio di Hilbert $L_2(\Omega)$, u_0 è un vettore in $L_2(\Omega)$ [modellizzando la temperatura iniziale], $f(t)$ è un vettore in $L_2(\Omega)$ continuo nel tempo $t \geq 0$ [modellizzando i sorgenti di calore al momento t], e $u(t)$ è un vettore di $L_2(\Omega)$ [modellizzando la temperatura al momento t]. Supponiamo che L abbia un numero infinito di autovalori λ_n , tutti non negativi, con base ortonormale di corrispondenti autofunzioni φ_n : $L\varphi_n = \lambda_n\varphi_n$, dove $n = 1, 2, \dots$. In tal caso ogni $u \in L_2(\Omega)$ soddisfa l'identità di Parseval

$$\|u\|_{L_2(\Omega)}^2 = \sum_{n=1}^{\infty} |(u, \varphi_n)|^2.$$

Da questa impostazione segue subito

$$\frac{d}{dt}(u(t), \varphi_n) = -\lambda_n(u(t), \varphi_n) + (f(t), \varphi_n)$$

con condizione iniziale

$$(u(t = 0), \varphi_n) = (u_0, \varphi_n),$$

dove $n = 1, 2, \dots$ e il prodotto scalare è quello complesso di $L_2(\Omega)$. Utilizzando la formula della variazione dei parametri si trova immediatamente

$$(u(t), \varphi_n) = e^{-\lambda_n t} (u_0, \varphi_n) + \int_0^t e^{-\lambda_n(t-s)} (f(s), \varphi_n) ds.$$

Quindi

$$\begin{aligned} u(\mathbf{x}, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \left[e^{-\lambda_n t} (u_0, \varphi_n) + \int_0^t e^{-\lambda_n(t-s)} (f(s), \varphi_n) ds \right] \varphi_n(\mathbf{x}) \\ &= \int_{\Omega} \mathcal{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}; t) u_0(\mathbf{y}) d\mathbf{y} + \int_0^t \int_{\Omega} \mathcal{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}; t-s) f(s, \mathbf{y}) dy ds, \end{aligned} \quad (\text{VI.78})$$

dove la funzione di Green

$$\mathcal{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}; t) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\lambda_n t} \varphi_n(\mathbf{x}) \overline{\varphi_n(\mathbf{y})}. \quad (\text{VI.79})$$

Secondo l'identità di Parseval abbiamo

$$\mathcal{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}; 0) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_n(\mathbf{x}) \overline{\varphi_n(\mathbf{y})} = \delta(\mathbf{x} - \mathbf{y}).$$

4.1 Esempi su intervalli limitati

Esempio VI.2 Poniamo $\Omega = (0, a)$ e $Lu = -u''$ con condizioni di Dirichlet, cioè il problema al contorno

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + f(x, t), \quad 0 < x < a, \quad t > 0;$$

$$u(0, t) = u(a, t) = 0, \quad u(x, 0) = u_0(x).$$

In tal caso gli autovalori sono $\lambda_n = (n\pi/a)^2$ e le corrispondenti autofunzioni ortonormalizzate in $L_2(0, 1)$ sono $\varphi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin(\frac{n\pi x}{a})$, dove $n = 1, 2, \dots$. Quindi la soluzione ha la forma

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \frac{2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \left[e^{-n^2 \pi^2 t / a^2} \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \int_0^a u_0(y) dy \sin\left(\frac{n\pi y}{a}\right) \right. \\ &\quad \left. + \int_0^t \int_0^a e^{-n^2 \pi^2 (t-s) / a^2} f(y, s) \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{a}\right) dy ds \right] \\ &= \int_0^1 \mathcal{G}(x, y; t) u_0(y) dy + \int_0^t \int_0^1 \mathcal{G}(x, y; t-s) f(y, s) dy ds, \end{aligned}$$

dove

$$\begin{aligned}
\mathcal{G}(x, y; t) &= \frac{2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2(\pi^2 t/a^2)} \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{a}\right) \\
&= \frac{1}{a} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2(\pi^2 t/a^2)} \frac{-\cos\left(\frac{n\pi(x+y)}{a}\right) + \cos\left(\frac{n\pi(x-y)}{a}\right)}{2} \right] \\
&= \frac{-\vartheta_3\left(\pi \frac{x+y}{a}, e^{-\pi^2 t/a^2}\right) + \vartheta_3\left(\pi \frac{x-y}{a}, e^{-\pi^2 t/a^2}\right)}{2a},
\end{aligned}$$

in cui $\vartheta_3(z, q) = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} q^{n^2} \cos(2nz)$ è una delle funzioni Theta di Jacobi ([22], 21.11).¹²

Consideriamo $Lu = -u''$ nell'intervallo $(0, a)$ con le condizioni di Neumann $u'(0) = u'(a) = 0$. In tal caso $\lambda_n = (n\pi/a)^2$ e $\varphi_n(x) = \sqrt{\frac{2-\delta_{n0}}{a}} \cos(n\pi x/a)$, dove $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. Allora

$$u(x, t) = \int_0^a \mathcal{G}(x, y; t) u_0(y) dy + \int_0^t \int_0^a \mathcal{G}(x, y; t-s) f(y, s) dy ds,$$

dove

$$\begin{aligned}
\mathcal{G}(x, y; t) &= \frac{1}{a} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2(\pi^2 t/a^2)} \cos\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{a}\right) \right] \\
&= \frac{1}{a} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2(\pi^2 t/a^2)} \frac{\cos\left(\frac{n\pi(x+y)}{a}\right) + \cos\left(\frac{n\pi(x-y)}{a}\right)}{2} \right] \\
&= \frac{\vartheta_3\left(\pi \frac{x+y}{a}, e^{-\pi^2 t/a^2}\right) + \vartheta_3\left(\pi \frac{x-y}{a}, e^{-\pi^2 t/a^2}\right)}{2a}.
\end{aligned}$$

Consideriamo ora $Lu = -u''$ nell'intervallo $(0, a)$ con la condizione di Dirichlet all'estremo sinistro e quella di Neumann all'estremo destro: $u(0) = u'(a) = 0$. In tal caso $\lambda_n = ((n + \frac{1}{2})\pi/a)^2$ e $\varphi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin((n + \frac{1}{2})\pi x/a)$, dove $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. Allora

$$u(x, t) = \int_0^a \mathcal{G}(x, y; t) u_0(y) dy + \int_0^t \int_0^a \mathcal{G}(x, y; t-s) f(y, s) dy ds,$$

¹²Si ha $\vartheta_3(z, q) = G \prod_{n=1}^{\infty} (1 + 2q^{2n-1} \cos(2z) + q^{4n-2})$, dove $G = \prod_{n=1}^{\infty} (1 - q^{2n})$.

dove

$$\begin{aligned}
\mathcal{G}(x, y; t) &= \frac{2}{a} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-(2n+1)^2(\pi^2 t/4a^2)} \sin\left(\frac{(2n+1)\pi x}{2a}\right) \sin\left(\frac{(2n+1)\pi y}{2a}\right) \\
&= \frac{1}{a} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-(2n+1)^2(\pi^2 t/4a^2)} \left\{ -\cos\left(\frac{(2n+1)\pi(x+y)}{2a}\right) \right. \\
&\quad \left. + \cos\left(\frac{(2n+1)\pi(x-y)}{2a}\right) \right\} \\
&= \frac{-\vartheta_2\left(\pi\frac{x+y}{a}, e^{-\pi^2 t/a^2}\right) + \vartheta_2\left(\pi\frac{x-y}{a}, e^{-\pi^2 t/a^2}\right)}{2a},
\end{aligned}$$

in cui $\vartheta_2(z, q) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} q^{(2n+1)^2/4} \cos((2n+1)z)$ è una delle funzioni Theta di Jacobi ([22], 21.11).¹³

Consideriamo infine $Lu = -u''$ nell'intervallo $(0, a)$ con condizioni periodiche. In tal caso ci sono un autovalore semplice $\lambda_0 = 0$ con autofunzione corrispondente $\varphi_0(x) = \sqrt{\frac{1}{a}}$ e gli autovalori doppi $\lambda_n = (2n\pi/a)^2$ con autofunzioni corrispondenti $\varphi_n^c(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \cos(2n\pi x/a)$ e $\varphi_n^s(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin(2n\pi x/a)$, dove $n = 1, 2, 3, \dots$. Allora

$$u(x, t) = \int_0^a \mathcal{G}(x, y; t) u_0(y) dy + \int_0^t \int_0^a \mathcal{G}(x, y; t-s) f(y, s) dy ds,$$

dove

$$\begin{aligned}
\mathcal{G}(x, y; t) &= \frac{1}{a} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-(\frac{2n\pi}{a})^2 t} \left\{ \cos\left(\frac{2n\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{2n\pi y}{a}\right) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \sin\left(\frac{2n\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{2n\pi y}{a}\right) \right\} \right] \\
&= \frac{1}{a} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-(\frac{2n\pi}{a})^2 t} \cos\left(\frac{2n\pi(x-y)}{a}\right) \right] \\
&= \frac{1}{a} \vartheta_3\left(\frac{\pi(x-y)}{a}, e^{-(\frac{2\pi}{a})^2 t}\right).
\end{aligned}$$

Esempio VI.3 Adesso discutiamo il caso $\Omega = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : \sqrt{x^2 + y^2} < L\}$ e $L = -\Delta$ con la condizione di Dirichlet al bordo. In tal caso gli autovalori $\lambda > 0$. Infatti,

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\lambda u(r, \theta), \quad (\text{VI.80})$$

¹³Si ha $\vartheta_2(z, q) = 2Gq^{1/4} \cos(z) \prod_{n=1}^{\infty} (1 + 2q^{2n} \cos(2z) + q^{4n})$, dove $G = \prod_{n=1}^{\infty} (1 - q^{2n})$.

e applicando la solita separazione delle variabili arriviamo, per $\lambda > 0$, all'equazione differenziale

$$\frac{d^2 R}{d(r\sqrt{\lambda})^2} + \frac{1}{r\sqrt{\lambda}} \frac{dR}{d(r\sqrt{\lambda})} + \left(1 - \frac{m^2}{(r\sqrt{\lambda})^2}\right) R(r) = 0,$$

dove $m = 0, 1, 2, \dots$ e $R(r)$ è limitato se $r \rightarrow 0^+$. Allora $R(r) \sim J_m(r\sqrt{\lambda})$, mentre $R(L) = 0$. Quindi gli autovalori sono $\lambda_{mn} = (\nu_{mn}/L)^2$ [essendo ν_{mn} lo zero positivo n -esimo della $J_m(x)$], dove $m = 0, 1, 2, \dots$ e $n = 1, 2, 3, \dots$. Le autofunzioni normalizzate in $L_2(\Omega) \simeq L_2([0, L] \times [0, 2\pi]; r dr d\theta)$ sono

$$\begin{cases} \varphi_{0n}(r, \theta) = \frac{1}{L\sqrt{\pi}|J'_0(\nu_{0n})|} J_0\left(\frac{\nu_{0n}r}{L}\right), & n = 1, 2, 3, \dots \\ \varphi_{mn}^c(r, \theta) = \frac{\sqrt{2} \cos m\theta}{L\sqrt{\pi}|J'_m(\nu_{mn})|} J_m\left(\frac{\nu_{mn}r}{L}\right), & m = 1, 2, 3, \dots, n = 1, 2, \dots \\ \varphi_{mn}^s(r, \theta) = \frac{\sqrt{2} \sin m\theta}{L\sqrt{\pi}|J'_m(\nu_{mn})|} J_m\left(\frac{\nu_{mn}r}{L}\right), & m = 1, 2, 3, \dots, n = 1, 2, \dots \end{cases}$$

Le costanti di normalizzazione seguono dall'identità

$$\begin{aligned} \int_0^L \int_0^{2\pi} r J_m\left(\frac{\nu_{mn}r}{L}\right) \cos m\theta d\theta dr &= (1 + \delta_{m0})\pi \int_0^L r J_m\left(\frac{\nu_{mn}r}{L}\right) dr \\ &= (1 + \delta_{m0}) \frac{L^2}{2} J'_m(\nu_{mn})^2, \end{aligned}$$

e ugualmente con $\sin m\theta$ al posto di $\cos m\theta$ se $m \geq 1$.

Risulta

$$\begin{aligned} u(r, \theta, t) &= \int_0^\infty \int_0^{2\pi} r \mathcal{G}(r, \hat{r}, \theta - \hat{\theta}; t) u_0(r, \theta) d\theta dr \\ &\quad + \int_0^t \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \hat{r} \mathcal{G}(r, \hat{r}, \theta - \hat{\theta}; t - s) f(\hat{r}, \hat{\theta}, s) d\hat{\theta} d\hat{r} ds, \end{aligned}$$

dove

$$\begin{aligned} \mathcal{G}(r, \hat{r}, \theta - \hat{\theta}; t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \left[e^{-\nu_{0n}^2 t/L^2} \frac{J_0\left(\frac{\nu_{0n}r}{L}\right) J_0\left(\frac{\nu_{0n}\hat{r}}{L}\right)}{\pi L^2 J'_0(\nu_{0n})^2} \right. \\ &\quad \left. + 2 \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\nu_{mn}^2 t/L^2} \frac{J_m\left(\frac{\nu_{mn}r}{L}\right) J_m\left(\frac{\nu_{mn}\hat{r}}{L}\right) \cos[m(\theta - \hat{\theta})]}{\pi L^2 J'_m(\nu_{mn})^2} \right], \end{aligned}$$

in cui abbiamo utilizzato la formula

$$\cos(m[\theta - \hat{\theta}]) = \cos m\theta \cos m\hat{\theta} - \sin m\theta \sin m\hat{\theta}.$$

4.2 Esempi su domini illimitati

Esempio VI.4 Consideriamo il problema a valori iniziali

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t}(x, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + f(x, t), & x \in \mathbb{R}, t > 0, \\ u(x, 0) = u_0(x). \end{cases} \quad (\text{VI.81})$$

Applicando la trasformata di Fourier unidimensionale $u \xrightarrow{\mathcal{F}} \hat{u}$ otteniamo

$$\begin{cases} \frac{\partial \hat{u}}{\partial t}(\xi, t) = -\xi^2 \hat{u}(\xi, t) + \hat{f}(\xi, t), & \xi \in \mathbb{R}, t > 0, \\ \hat{u}(\xi, 0) = \hat{u}_0(\xi). \end{cases} \quad (\text{VI.82})$$

La soluzione del problema (V.82) è elementare:

$$\hat{u}(\xi, t) = e^{-\xi^2 t} \hat{u}_0(\xi) + \int_0^t e^{-\xi^2(t-\tau)} \hat{f}(\xi, \tau) d\tau. \quad (\text{VI.83})$$

Quindi

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ix\xi} \hat{u}(\xi, t) d\xi \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ix\xi} \left[e^{-\xi^2 t} \hat{u}_0(\xi) + \int_0^t e^{-\xi^2(t-\tau)} \hat{f}(\xi, \tau) d\tau \right] d\xi \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{G}(x-y; t) u_0(y) dy + \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{G}(x-y; t-\tau) f(y, \tau) dy d\tau, \end{aligned}$$

dove

$$\mathcal{G}(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ix\xi} e^{-\xi^2 t} d\xi = \frac{1}{2\pi} e^{-x^2/4t} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-(\xi - \frac{ix}{2t})^2 t} d\xi = \frac{1}{\sqrt{4\pi t}} e^{-x^2/4t}.$$

Esempio VI.5 Consideriamo ora il problema a valori iniziali e al contorno

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t}(x, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + f(x, t), & x \in \mathbb{R}^+, t > 0, \\ u(0, t) = 0, & x \in \mathbb{R}^+, \\ u(x, 0) = u_0(x). \end{cases} \quad (\text{VI.84})$$

Per risolvere la (V.84) introduciamo la trasformata di Fourier seno

$$(\mathcal{F}_s u)(\xi) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\infty} u(x) \sin(x\xi) dx = \frac{-i}{\sqrt{2\pi}} \hat{u}(\xi), \quad (\text{VI.85})$$

dove $u(x) = -u(-x)$ per $x \in \mathbb{R}^-$ è l'estensione di u ad una funzione dispari. Si vede subito che

$$u(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty (\mathcal{F}_s u)(\xi) \sin(x\xi) d\xi. \quad (\text{VI.86})$$

Applicando la trasformata di Fourier seno \mathcal{F}_s alla (V.82) risulta

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{F}_s u}{\partial t}(\xi, t) = -\xi^2 (\mathcal{F}_s u)(\xi, t) + (\mathcal{F}_s f)(\xi, t), & \xi \in \mathbb{R}^+, t > 0, \\ (\mathcal{F}_s u)(\xi, 0) = (\mathcal{F}_s u_0)(\xi), \end{cases} \quad (\text{VI.87})$$

e ha la soluzione unica (V.83). Dunque

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty \sin(x\xi) (\mathcal{F}_s u)(\xi, t) \\ &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty \sin(x\xi) \left[e^{-\xi^2 t} (\mathcal{F}_s u_0)(\xi) + \int_0^t e^{-\xi^2(t-\tau)} (\mathcal{F}_s f)(\xi, \tau) d\tau \right] d\xi \\ &= \int_0^\infty \mathcal{G}_s(x, y; t) u_0(y) dy + \int_0^t \int_0^\infty \mathcal{G}_s(x, y; t - \tau) f(y, \tau) dy d\tau, \end{aligned}$$

dove¹⁴

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_s(x, y; t) &= \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \sin(x\xi) \sin(y\xi) e^{-\xi^2 t} d\xi \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^\infty e^{-\xi^2 t} \{-\cos((x+y)\xi) + \cos((x-y)\xi)\} d\xi \\ &= \frac{1}{\sqrt{4\pi t}} \left[-e^{-(x+y)^2/4t} + e^{-(x-y)^2/4t} \right]. \end{aligned} \quad (\text{VI.88})$$

Consideriamo ora il problema a valori iniziali e al contorno

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t}(x, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + f(x, t), & x \in \mathbb{R}^+, t > 0, \\ \frac{\partial u}{\partial x}(0, t) = 0, & x \in \mathbb{R}^+, \\ u(x, 0) = u_0(x). \end{cases} \quad (\text{VI.89})$$

Per risolvere la (V.89) introduciamo la trasformata di Fourier coseno

$$(\mathcal{F}_c u)(\xi) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty u(x) \cos(x\xi) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \hat{u}(\xi), \quad (\text{VI.90})$$

¹⁴Si utilizza $\frac{1}{\pi} \int_0^\infty e^{-z^2 t} \cos(zt) dz = \frac{1}{\sqrt{4\pi t}} e^{-z^2/4t}$. Vedi [1], Eq. 7.4.6.

dove $u(x) = u(-x)$ per $x \in \mathbb{R}^-$ è l'estensione di u ad una funzione pari. Si vede subito che

$$u(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty (\mathcal{F}_c u)(\xi) \cos(x\xi) d\xi. \quad (\text{VI.91})$$

Applicando la trasformata di Fourier coseno \mathcal{F}_c alla (V.89) risulta

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{F}_c u}{\partial t}(\xi, t) = -\xi^2 (\mathcal{F}_c u)(\xi, t) + (\mathcal{F}_c f)(\xi, t), & \xi \in \mathbb{R}^+, t > 0, \\ (\mathcal{F}_c u)(\xi, 0) = (\mathcal{F}_c u_0)(\xi), \end{cases} \quad (\text{VI.92})$$

e ha la soluzione unica (V.83). Dunque

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty \cos(x\xi) (\mathcal{F}_c u)(\xi, t) \\ &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty \cos(x\xi) \left[e^{-\xi^2 t} (\mathcal{F}_c u_0)(\xi) + \int_0^t e^{-\xi^2(t-\tau)} (\mathcal{F}_c f)(\xi, \tau) d\tau \right] d\xi \\ &= \int_0^\infty \mathcal{G}_c(x, y; t) u_0(y) dy + \int_0^t \int_0^\infty \mathcal{G}_c(x, y; t - \tau) f(y, \tau) dy d\tau, \end{aligned}$$

dove

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_c(x, y; t) &= \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \cos(x\xi) \cos(y\xi) e^{-\xi^2 t} d\xi \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^\infty e^{-\xi^2 t} \{ \cos((x+y)\xi) + \cos((x-y)\xi) \} d\xi \\ &= \frac{1}{\sqrt{4\pi t}} \left[e^{-(x+y)^2/4t} + e^{-(x-y)^2/4t} \right]. \end{aligned} \quad (\text{VI.93})$$

Esempio VI.6 Consideriamo infine il problema a valori iniziali

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t}(\mathbf{x}, t) = \Delta u + f(\mathbf{x}, t), & \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, t > 0, \\ u(\mathbf{x}, 0) = u_0(\mathbf{x}). \end{cases} \quad (\text{VI.94})$$

Applicando la trasformata di Fourier unidimensionale $u \xrightarrow{\mathcal{F}} \hat{u}$ otteniamo

$$\begin{cases} \frac{\partial \hat{u}}{\partial t}(\boldsymbol{\xi}, t) = -|\boldsymbol{\xi}|^2 \hat{u}(\boldsymbol{\xi}, t) + \hat{f}(\boldsymbol{\xi}, t), & \boldsymbol{\xi} \in \mathbb{R}^n, t > 0, \\ \hat{u}(\boldsymbol{\xi}, 0) = \hat{u}_0(\boldsymbol{\xi}). \end{cases} \quad (\text{VI.95})$$

La soluzione del problema (V.95) è elementare:

$$\hat{u}(\boldsymbol{\xi}, t) = e^{-|\boldsymbol{\xi}|^2 t} \hat{u}_0(\boldsymbol{\xi}) + \int_0^t e^{-|\boldsymbol{\xi}|^2(t-\tau)} \hat{f}(\boldsymbol{\xi}, \tau) d\tau. \quad (\text{VI.96})$$

Quindi

$$\begin{aligned}
u(\mathbf{x}, t) &= \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(\mathbf{x} \cdot \boldsymbol{\xi})} \hat{u}(\boldsymbol{\xi}, t) d\boldsymbol{\xi} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{\mathbb{R}^n} e^{i(\mathbf{x} \cdot \boldsymbol{\xi})} \left[e^{-|\boldsymbol{\xi}|^2 t} \hat{u}_0(\boldsymbol{\xi}) + \int_0^t e^{-|\boldsymbol{\xi}|^2(t-\tau)} \hat{f}(\boldsymbol{\xi}, \tau) d\tau \right] d\boldsymbol{\xi} \\
&= \int_{\mathbb{R}^n} \mathcal{G}(\mathbf{x} - \mathbf{y}; t) u_0(\mathbf{y}) d\mathbf{y} + \int_0^t \int_{\mathbb{R}^n} \mathcal{G}(\mathbf{x} - \mathbf{y}; t - \tau) f(\mathbf{y}, \tau) d\mathbf{y} d\tau,
\end{aligned}$$

dove

$$\begin{aligned}
\mathcal{G}(\mathbf{x}, t) &= \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{\mathbb{R}^n} e^{i(\mathbf{x} \cdot \boldsymbol{\xi})} e^{-|\boldsymbol{\xi}|^2 t} d\boldsymbol{\xi} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^n} e^{-|\mathbf{x}|^2/4t} \int_{\mathbb{R}^n} e^{-\left(\boldsymbol{\xi} + \frac{i\mathbf{x}}{2t}, \boldsymbol{\xi} + \frac{i\mathbf{x}}{2t}\right)t} d\boldsymbol{\xi} = \left(\frac{1}{\sqrt{4\pi t}} \right)^n e^{-|\mathbf{x}|^2/4t}.
\end{aligned}$$

5 Equazioni iperboliche

L'equazione delle onde ha la forma

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \Delta u, \quad (\text{VI.97})$$

dove $c > 0$ è la velocità della onda, $x \in \Omega$ (un aperto connesso e limitato in \mathbb{R}^n con frontiera $\partial\Omega$ superficie regolare a tratti), e valgono la condizione di Dirichlet

$$u(x, t) = 0, \quad x \in \partial\Omega, \quad (\text{VI.98})$$

e le due condizioni iniziali

$$u(x, 0) = u_0(x), \quad (\text{VI.99a})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x, 0) = u_1(x). \quad (\text{VI.99b})$$

La separazione delle variabili

$$u(x, t) = \psi(x)T(t) \quad (\text{VI.100})$$

conduce alle equazioni

$$\frac{1}{c^2} \frac{T''(t)}{T(t)} = \frac{\psi''(x)}{\psi(x)} = \text{costante}, \quad (\text{VI.101a})$$

$$\psi(x) = 0 \text{ per } x \in \partial\Omega. \quad (\text{VI.101b})$$

Supponiamo che l'equazione di Helmholtz

$$\Delta\psi + \lambda^2\psi = 0$$

su Ω con la condizione di Dirichlet abbia un infinito numerabile di autovalori positivi λ_n^2 (dove $\lambda_n \leq \lambda_{n+1}$) con autofunzioni corrispondenti φ_n che formano una base ortonormale di $L_2(\Omega)$. In tal caso la costante nella (V.101a) vale $-\lambda_n^2$, e quindi

$$T(t) = c_n \cos(c\lambda_n t) + d_n \sin(c\lambda_n t).$$

La soluzione generale della equazione delle onde (V.103b) con la condizione di Dirichlet (V.98) ha la forma

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} (c_n \cos(c\lambda_n t) + d_n \sin(c\lambda_n t)) \psi_n(x). \quad (\text{VI.102})$$

Quindi dalle (V.99) otteniamo

$$u_0(x) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \psi_n(x), \quad (\text{VI.103a})$$

$$u_1(x) = \sum_{n=1}^{\infty} d_n c\lambda_n \psi_n(x). \quad (\text{VI.103b})$$

Dall'ortonormalità delle autofunzioni ψ_n in $L_2(\Omega)$ seguono i coefficienti c_n e d_n :

$$c_n = \langle u_0, \psi_n \rangle_{L_2(\Omega)} = \int_{\Omega} u_0(x) \psi_n(x) dx, \quad (\text{VI.104a})$$

$$d_n = \frac{\langle u_1, \psi_n \rangle}{c\lambda_n} = \frac{1}{c\lambda_n} \int_{\Omega} u_1(x) \psi_n(x) dx. \quad (\text{VI.104b})$$

Lo stesso discorso vale se al posto della condizione di Dirichlet (V.98) si considera la condizione di Neumann. L'unica differenza è che ora zero è autovalore (con l'autofunzione costante) dell'equazione di Helmholtz su Ω con la condizione di Neumann. Al posto della (V.102) si consideri ora

$$u(x, t) = \frac{1}{\sqrt{\text{mis}(\Omega)}} (c_0 + d_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} (c_n \cos(c\lambda_n t) + d_n \sin(c\lambda_n t)) \psi_n(x), \quad (\text{VI.105})$$

dove $\psi_0(x) = 1/\sqrt{\text{mis}(\Omega)}$ è l'autofunzione normalizzata corrispondente all'autovalore zero. Per $n \geq 1$ si trovano le espressioni (V.102) e (V.104b), mentre

$$c_0 = \frac{\int_{\Omega} u_0(x) dx}{\sqrt{m(\Omega)}}, \quad d_0 = \frac{\int_{\Omega} u_1(x) dx}{\sqrt{m(\Omega)}}.$$

Nel caso in cui $\Omega = (0, L)$, abbiamo per le condizioni di Dirichlet

$$\lambda_n = \frac{n\pi}{L}, \quad \psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right), \quad (\text{VI.106})$$

dove $n = 1, 2, 3, \dots$, e per le condizioni di Neumann

$$\lambda_n = \frac{n\pi}{L}, \quad \psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right), \quad (\text{VI.107})$$

dove $n = 1, 2, 3, \dots$, mentre $\lambda_0 = 0$ e $\psi_0(x) = 1/\sqrt{L}$.

Nel caso delle condizioni di Dirichlet, utilizzando le espressioni

$$\begin{aligned} 2 \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{n\pi ct}{L}\right) &= \sin\left(\frac{n\pi}{L}(x - ct)\right) + \sin\left(\frac{n\pi}{L}(x + ct)\right), \\ 2 \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \sin\left(\frac{n\pi ct}{L}\right) &= \cos\left(\frac{n\pi}{L}(x - ct)\right) - \cos\left(\frac{n\pi}{L}(x + ct)\right), \end{aligned}$$

e sostituendo la (V.106) nella (V.102), otteniamo

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{L}} \sum_{n=1}^{\infty} c_n \left[\sin\left(\frac{n\pi}{L}(x - ct)\right) + \sin\left(\frac{n\pi}{L}(x + ct)\right) \right] \\ &\quad + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{L}} \sum_{n=1}^{\infty} d_n \left[\cos\left(\frac{n\pi}{L}(x - ct)\right) - \cos\left(\frac{n\pi}{L}(x + ct)\right) \right] \\ &= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} c_n [\psi_n(x - ct) + \psi_n(x + ct)] + \frac{1}{2c} \sum_{n=1}^{\infty} d_n c \frac{n\pi}{L} \int_{x-ct}^{x+ct} \psi_n(\tilde{x}) d\tilde{x} \\ &\stackrel{???}{=} \frac{1}{2} [u_0(x - ct) + u_0(x + ct)] + \frac{1}{2c} \int_{x-ct}^{x+ct} u_1(\tilde{x}) d\tilde{x} \quad \text{[SBAGLIATO]}, \end{aligned}$$

dove abbiamo utilizzato gli sviluppi di Fourier (V.103) e esteso le autofunzioni come fossero definite fuori dell'intervallo $(0, L)$.

Per $c > 0$ consideriamo l'equazione delle onde

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x, t) = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, t) + f(x, t), \quad (\text{VI.108a})$$

$$u(x, 0) = u_0(x), \quad (\text{VI.108b})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x, 0) = u_1(x), \quad (\text{VI.108c})$$

dove $x \in \mathbb{R}$ e $t > 0$. Applicando la trasformata di Fourier arriviamo al sistema di equazioni

$$\frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial t^2}(\xi, t) = -c^2 \xi^2 \hat{u}(\xi, t) + \hat{f}(\xi, t), \quad (\text{VI.109a})$$

$$\hat{u}(\xi, 0) = \hat{u}_0(\xi), \quad (\text{VI.109b})$$

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial t}(\xi, 0) = \hat{u}_1(\xi), \quad (\text{VI.109c})$$

con la soluzione unica

$$\hat{u}(\xi, t) = \cos(c\xi t) \hat{u}_0(\xi) + \frac{\sin(c\xi t)}{c\xi} \hat{u}_1(\xi) + \int_0^t \frac{\sin(c\xi(t-\tau))}{c\xi} \hat{f}(\xi, \tau) d\tau. \quad (\text{VI.110})$$

Per $\xi = 0$ si calcola il limite:

$$\hat{u}(0, t) = \hat{u}_0(0) + t\hat{u}_1(0) + \int_0^t (t-\tau) \hat{f}(0, \tau) d\tau. \quad (\text{VI.111})$$

Quindi

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ix\xi} \hat{u}(\xi, t) d\xi = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ix\xi} [\cos(c\xi t) \hat{u}_0(\xi) \\ &+ \frac{\sin(c\xi t)}{c\xi} \hat{u}_1(\xi) + \int_0^t \frac{\sin(c\xi(t-\tau))}{c\xi} \hat{f}(\xi, \tau) d\tau] d\xi \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t}(x-y; t) u_0(y) + \mathcal{G}(x-y; t) u_1(y) \right. \\ &\left. + \int_0^t \mathcal{G}(x-y; t-\tau) f(y, \tau) d\tau \right] dy, \end{aligned}$$

dove

$$\begin{aligned} \mathcal{G}(x-y; t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(x-y)\xi} \frac{\sin(c\xi t)}{c\xi} d\xi \\ &= \frac{1}{2c} [H(y-x+ct) + H(y-x-ct)], \\ \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t}(x-y; t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(x-y)\xi} \cos(c\xi t) d\xi \\ &= \frac{1}{2} [\delta(y-x+ct) - \delta(y-x-ct)]. \end{aligned}$$

In particolare, abbiamo trovato la cosiddetta *soluzione di D'Alembert*

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \frac{1}{2} [u_0(x-ct) + u_0(x+ct)] \\ &+ \frac{1}{2c} \int_{x-ct}^{x+ct} u_1(y) dy + \frac{1}{2c} \int_0^t \int_{x-ct+c\tau}^{x+ct-c\tau} f(y, \tau) dy d\tau. \end{aligned}$$

L'equazione delle onde (V.97) con un'opportuna condizione al contorno e le condizioni iniziali (V.99) ha la soluzione unica

$$u(x, t) = \int_{\Omega} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t}(x, \hat{x}; t) u_0(\hat{x}) d\hat{x} + \int_{\Omega} \mathcal{G}(x, \hat{x}; t) u_1(\hat{x}) d\hat{x}, \quad (\text{VI.112})$$

dove la funzione di Green è molto singolare. Ciò si spiega dal principio di Huygens: Le singolarità presenti nella soluzione per $t = 0$ si propagano in tutte le direzioni con velocità c quindi si manifestano nella soluzione al momento $t > 0$. Per esempio, generalizzando la risoluzione del sistema (V.108) per $x \in \mathbb{R}^n$ si applichi la trasformazione di Fourier n -dimensionale per trovare la stessa forma della soluzione. Questa volta la funzione di Green ha l'espressione

$$\mathcal{G}(\mathbf{x} - \mathbf{y}; t) = \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i(\mathbf{x}-\mathbf{y}) \cdot \boldsymbol{\xi}} \frac{\sin(ct\|\boldsymbol{\xi}\|_2)}{c\|\boldsymbol{\xi}\|_2} d\boldsymbol{\xi}, \quad (\text{VI.113a})$$

$$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t}(\mathbf{x} - \mathbf{y}; t) = \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i(\mathbf{x}-\mathbf{y}) \cdot \boldsymbol{\xi}} \cos(ct\|\boldsymbol{\xi}\|_2) d\boldsymbol{\xi}. \quad (\text{VI.113b})$$

Appendice A

LA FUNZIONE GAMMA

La funzione Gamma è definita dall'integrale generalizzato assolutamente convergente

$$\boxed{\Gamma(z) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{z-1} dt = 2 \int_0^{\infty} \rho^{2z-1} e^{-\rho^2} d\rho,} \quad \operatorname{Re} z > 0, \quad (\text{A.1})$$

dove la convergenza assoluta segue spezzando l'intervallo di integrazione in due, in $(0, 1)$ ed in $(1, +\infty)$. Infatti $|e^{-t} t^{z-1}| \leq t^{\operatorname{Re} z - 1}$ per $t \in (0, 1)$ e $t^\alpha |e^{-t} t^{z-1}| \rightarrow 0$ se $t \rightarrow +\infty$ per ogni $\alpha > 1$. La funzione Γ è analitica nel semipiano destro $\operatorname{Re} z > 0$.

Dopo un'integrazione per parti si ottiene facilmente

$$\boxed{\Gamma(z+1) = z\Gamma(z),} \quad \operatorname{Re} z > 0. \quad (\text{A.2})$$

Si ha $\Gamma(1) = \int_0^{\infty} e^{-t} dt = 1$. Utilizzando la (A.2) risulta

$$\boxed{\Gamma(n+1) = n!,} \quad n = 0, 1, 2, \dots. \quad (\text{A.3})$$

Un altro valore particolare della funzione Gamma è quello per $z = 1/2$. Si ha

$$\boxed{\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \int_0^{\infty} t^{-1/2} e^{-t} dt = 2 \int_0^{\infty} e^{-u^2} du = \sqrt{\pi}.}$$

Utilizzando la (A.2) si ottiene

$$\Gamma\left(n + \frac{1}{2}\right) = \frac{1 \cdot 3 \cdots (2n-1)}{2^n} \sqrt{\pi}, \quad n = 0, 1, 2, \dots. \quad (\text{A.4})$$

L'identità (A.2) può essere utilizzata per definire la funzione Gamma altrove. Prima si definisca la funzione Gamma nella striscia $-1 < \operatorname{Re} z \leq 0$

da $\Gamma(z) = \Gamma(z+1)/z$, poi nella striscia $-2 < \operatorname{Re} z \leq -1$, ecc. Siccome il denominatore nell'uguaglianza $\Gamma(z) = \Gamma(z+1)/z$ si annulla per $z = 0$, risulta una funzione meromorfa con poli semplici nei punti $0, -1, -2, \dots$. Il residuo nel polo a $z = 0$ è $\lim_{z \rightarrow 0} z\Gamma(z) = \lim_{z \rightarrow 0} \Gamma(z+1) = \Gamma(1) = 1$, mentre quello a $-n$ ($n = 1, 2, \dots$) è il seguente

$$\begin{aligned} \lim_{z \rightarrow -n} (z+n)\Gamma(z) &= \lim_{z \rightarrow -n} (z+n) \frac{\Gamma(z+1)}{z} = \dots \\ &= \lim_{z \rightarrow -n} (z+n) \frac{\Gamma(z+n)}{z(z+1)\dots(z+n-1)} \\ &= \lim_{z \rightarrow -n} \frac{\Gamma(z+n+1)}{z(z+1)\dots(z+n-1)} = \frac{\Gamma(1)}{(-1)^n (n!)} = \frac{(-1)^n}{n!}. \end{aligned}$$

Ha qualche importanza la *funzione beta di Eulero*:

$$B(p, q) = \int_0^1 t^{p-1} (1-t)^{q-1} dt = 2 \int_0^{\pi/2} (\sin \theta)^{2p-1} (\cos \theta)^{2q-1} d\theta, \quad (\text{A.5})$$

dove $\operatorname{Re} p > 0$ e $\operatorname{Re} q > 0$. È abbastanza semplice dimostrare che

$$\boxed{B(p, q) = \frac{\Gamma(p)\Gamma(q)}{\Gamma(p+q)},} \quad \operatorname{Re} p, \operatorname{Re} q > 0. \quad (\text{A.6})$$

Infatti, per p, q tali che $\min(\operatorname{Re} p, \operatorname{Re} q) > 0$ abbiamo

$$\begin{aligned} \Gamma(p)\Gamma(q) &= 4 \int_0^\infty \int_0^\infty t^{2p-1} s^{2q-1} e^{-(t^2+s^2)} dt ds \\ &= 4 \int_0^\infty \int_0^{\pi/2} \rho^{2(p+q-1)} e^{-\rho^2} (\cos \theta)^{2p-1} (\sin \theta)^{2q-1} d\theta d\rho \\ &= 2 \underbrace{\int_0^\infty \rho^{2(p+q-1)} e^{-\rho^2} d\rho}_{\Gamma(p+q)} \underbrace{2 \int_0^\pi (\cos \theta)^{2p-1} (\sin \theta)^{2q-1} d\theta}_{t=\cos^2 \theta, 1-t=\sin^2 \theta, dt=-2 \cos \theta \sin \theta d\theta} \\ &= \Gamma(p+q)B(p, q). \end{aligned}$$

dove al passaggio dalla prima alla seconda riga abbiamo sostituito $t = \rho \cos \theta$ e $s = \rho \sin \theta$.

Discutiamo ora una caratterizzazione potente della funzione Gamma.

Teorema A.1 (Bohr-Mollerup) *Sia $f : (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ una funzione a valori positivi con le seguenti proprietà:*

- (a) $\log f(x)$ è una funzione convessa;

(b) $f(x+1) = x f(x)$ per ogni $x > 0$;

(c) $f(1) = 1$.

Allora $f(x) = \Gamma(x)$ per ogni $x > 0$.

Dimostrazione. Sia $f : (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ una funzione a valori positivi che ha le proprietà (a)-(c). Allora la proprietà (b) implica l'identità

$$f(x+n) = x(x+1)\dots(x+n-1)f(x), \quad x > 0, n \in \mathbb{N}. \quad (\text{A.7})$$

Per $x \in (0, 1]$ e $n \geq 2$ si ottiene dalla convessità¹ della funzione f

$$\frac{\log f(n-1) - \log f(n)}{(n-1) - n} \leq \frac{\log f(x+n) - \log f(n)}{(x+n) - n} \leq \frac{\log f(n+1) - \log f(n)}{(n+1) - n}.$$

Siccome $f(m) = (m-1)!$ per $m \in \mathbb{N}$ (vedi la (b) e la (c)), risulta per $0 < x \leq 1$

$$\log(n-1)! - \log(n-2)! \leq \frac{\log f(x+n) - \log(n-1)!}{x} \leq \log n! - \log(n-1)!,$$

oppure

$$x \log(n-1) \leq \log f(x+n) - \log(n-1)! \leq \log n, \quad 0 < x \leq 1,$$

oppure

$$(n-1)^x (n-1)! \leq f(x+n) \leq n^x (n-1)!$$

Applicando la (A.7) risulta per $0 < x \leq 1$

$$\frac{(n-1)^x (n-1)!}{x(x+1)\dots(x+n-1)} \leq f(x) \leq \frac{n^x (n-1)!}{x(x+1)\dots(x+n)} \left[\frac{x+n}{n} \right].$$

Siccome $\lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{x+n}{n} \right] = 1$ per $x \in [0, 1]$, si ha

$$f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n! n^x}{x(x+1)\dots(x+n)}. \quad (\text{A.8})$$

Dalla (A.1) si trova facilmente

$$\Gamma(z) = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^n \left(1 - \frac{t}{n}\right)^n t^{z-1} dt,$$

mentre n integrazioni per parti ci danno l'identità

$$\int_0^n \left(1 - \frac{t}{n}\right)^n t^{z-1} dt = \frac{n! n^z}{z(z+1)\dots(z+n)}, \quad \operatorname{Re} z > 0.$$

Quindi le ultime due equazioni e la (A.8) implicano che $f(x) = \Gamma(x)$ per ogni $x > 0$. \square

¹La convessità della $g = \log f$ implica che il rapporto $\frac{g(n+1)-g(y)}{(n+1)-y}$ cresce se y cresce da $n-1$ a $n+1$.

Il teorema A.1 può essere applicato per dimostrare la seguente rappresentazione prodotto

$$\Gamma(z) = \frac{e^{-\gamma z}}{z} \prod_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{z}{n}\right)^{-1} e^{z/n}, \quad (\text{A.9})$$

dove γ è la cosiddetta *costante di Eulero* tale che $\Gamma(1) = 1$. Sostituendo $z = 1$ si trova

$$e^{\gamma} = \prod_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{-1} e^{1/n},$$

oppure

$$\begin{aligned} \gamma &= \sum_{k=1}^{\infty} \left[\left(1 + \frac{1}{k}\right)^{-1} e^{1/k} \right] \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{1}{k} - \log(k+1) + \log k \right] \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \left[\frac{1}{k} - \log(k+1) + \log k \right] \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n}\right) - \log(n+1) \right] \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n}\right) - \log n \right]. \end{aligned}$$

Tornando alla (A.9) abbiamo

$$\begin{aligned} \Gamma(z) &= \frac{e^{-\gamma z}}{z} \lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{k=1}^n \frac{k e^{z/k}}{z+k} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{e^{-\gamma z} n!}{z(z+1) \dots (z+n)} \exp \left(z \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n}\right) \right) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n! n^z}{z(z+1) \dots (z+n)}. \end{aligned}$$

Quindi abbiamo dimostrato che la funzione $\Gamma(z)$ definita dal prodotto infinito (A.9) coincide con la funzione gamma introdotta prima.

Per $0 < \operatorname{Re} z < 1$ si ha

$$\begin{aligned} \Gamma(z)\Gamma(1-z) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{e^{-\gamma z}}{z} \prod_{k=1}^n \frac{k}{k+z} e^{z/k} \cdot \frac{e^{-\gamma(1-z)}}{1-z} \prod_{k=1}^n \frac{k}{k+1-z} e^{(1-z)/k} \\ &= \frac{e^{-\gamma}}{z(1-z)} \lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{k=1}^n \frac{k^2}{(k+z)(k+1-z)} e^{1/k} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{e^{-\gamma}}{z(n+1-z)} \prod_{k=1}^n \frac{k^2}{(k+z)(k-z)} e^{1/k} \\
&= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{z} \prod_{k=1}^n \frac{k^2}{(k+z)(k-z)} = \frac{1}{z} \prod_{k=1}^{\infty} \frac{k^2}{(k+z)(k-z)} = \frac{\pi}{\sin(\pi z)},
\end{aligned}$$

secondo la rappresentazione prodotto della funzione $\sin(\pi z)$. Quindi

$$\boxed{\Gamma(z)\Gamma(1-z) = \frac{\pi}{\sin(\pi z)}}, \quad (\text{A.10})$$

valida per $z \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{Z}$ per l'unicità delle estensioni analitiche.

Appendice B

PROPRIETÀ ASINTOTICHE

1 Rappresentazioni integrali delle funzioni di MacDonal

Sia

$$\phi_\nu(z) = \int_0^\infty e^{-z \cosh t} \cosh(\nu t) dt,$$

dove $z > 0$ e $\nu \in \mathbb{R}$. Allora

$$\phi'_\nu(z) = - \int_0^\infty e^{-z \cosh t} \cosh(\nu t) \cosh t dt,$$

$$\phi''_\nu(z) = \int_0^\infty e^{-z \cosh t} \cosh(\nu t) \cosh^2 t dt.$$

Di conseguenza,

$$\begin{aligned} z^2 \phi''_\nu(z) + z \phi'_\nu(z) - (z^2 + \nu^2) \phi_\nu(z) &= z^2 \int_0^\infty e^{-z \cosh t} \cosh(\nu t) \underbrace{[\cosh^2 t - 1]}_{=\sinh^2 t} dt \\ &\quad - z \int_0^\infty e^{-z \cosh t} \cosh(\nu t) \cosh t dt - \nu^2 \int_0^\infty e^{-z \cosh t} \cosh(\nu t) dt \\ &= [-z e^{-z \cosh t} \cosh(\nu t) \sinh t]_0^\infty \\ &\quad + z \int_0^\infty e^{-z \cosh t} \{ \nu \sinh(\nu t) \sinh t + \cosh(\nu t) \cosh t \} dt \\ &\quad - z \int_0^\infty e^{-z \cosh t} \cosh(\nu t) \cosh t dt - \nu^2 \int_0^\infty e^{-z \cosh t} \cosh(\nu t) dt \\ &= [-e^{-z \cosh t} \nu \sinh(\nu t)]_0^\infty + \int_0^\infty e^{-z \cosh t} \nu^2 \cosh(\nu t) dt \\ &\quad - \nu^2 \int_0^\infty e^{-z \cosh t} \cosh(\nu t) dt = 0. \end{aligned}$$

Quindi $\phi_\nu(z)$ è una soluzione dell'equazione di Bessel immaginaria (II.57). Inoltre, siccome $\phi_\nu(z) \rightarrow +\infty$ se $z \rightarrow 0^+$ (divergenza dell'integrale per $z = 0$) e $\phi_\nu(z) \rightarrow 0$ se $z \rightarrow +\infty$, esiste una costante positive c_ν tale che $\phi_\nu(z) = c_\nu K_\nu(z)$, la funzione di MacDonald (vedi la (II.56)).

Inoltre, abbiamo

$$\begin{aligned}\sqrt{z} e^z \phi_\nu(z) &= \sqrt{z} \int_0^\infty e^{-2z \sinh^2(t/2)} \cosh(\nu t) dt \\ &= \int_0^\infty \exp\left(-2z \sinh^2 \frac{\tau}{2\sqrt{z}}\right) \cosh\left(\frac{\nu\tau}{2\sqrt{z}}\right) d\tau.\end{aligned}$$

Siccome $f(x) = \sinh(x)/x$ è crescente per $x \geq 0$ e $f(0^+) = 1$,¹ si può stimare la funzione sotto il segno dell'ultimo integrale da $e^{-\tau^2/2} \cosh(\nu\tau/\sqrt{z})$ per giustificare l'applicazione del Teorema delle Convergenza Dominata (cioè, lo scambio limite-integrale, vedi l'appendice D), risultando in

$$\lim_{z \rightarrow +\infty} \sqrt{z} e^z \phi_\nu(z) = \int_0^\infty e^{-\tau^2/2} d\tau = \sqrt{\frac{\pi}{2}}.$$

Di conseguenza, $\phi_\nu(z) = K_\nu(z)$:

$$K_\nu(z) = \int_0^\infty e^{-z \cosh t} \cosh(\nu t) dt, \quad z > 0, \nu \in \mathbb{R}. \quad (\text{B.1})$$

Sostituendo $u = e^{-t}$ nella (C.1) e poi $v = 1/u$ si ottiene per $z > 0$

$$\begin{aligned}K_\nu(z) &= \frac{1}{2} \int_0^1 e^{-\frac{z}{2}(u+\frac{1}{u})} u^{-\nu} \frac{du}{u} + \frac{1}{2} \int_0^1 e^{-\frac{z}{2}(u+\frac{1}{u})} u^\nu \frac{du}{u} \\ &= \frac{1}{2} \int_0^1 e^{-\frac{z}{2}(u+\frac{1}{u})} u^{-\nu} \frac{du}{u} + \frac{1}{2} \int_1^\infty e^{-\frac{z}{2}(v+\frac{1}{v})} u^{-\nu} \frac{dv}{v} \\ &= \frac{1}{2} \int_0^\infty e^{-\frac{z}{2}(u+\frac{1}{u})} u^{-\nu} \frac{du}{u} = \frac{1}{2} \int_0^\infty e^{-\frac{z}{2}(u+\frac{1}{u})} u^{-\nu-1} du.\end{aligned}$$

Utilizzando la definizione della funzione Gamma e cambiando l'ordine di integrazione otteniamo per $z > 0$ e $\text{Re } \nu > -\frac{1}{2}$

$$\begin{aligned}K_\nu(z) &= \int_0^\infty e^{-\frac{z}{2}(u+\frac{1}{u})} \left(\frac{1}{\Gamma(\nu + \frac{1}{2})} \int_0^\infty e^{-ux} x^{\nu-\frac{1}{2}} dx \right) \frac{du}{\sqrt{u}} \\ &= \frac{1}{2\Gamma(\nu + \frac{1}{2})} \int_0^\infty x^{\nu-\frac{1}{2}} \left(\int_0^\infty e^{-u(x+\frac{z}{2})-\frac{z}{2u}} \frac{du}{\sqrt{u}} \right) dx.\end{aligned}$$

¹Si ha $f'(x) = \frac{\cosh(x)}{x^2}(x - \tanh x) = \frac{\cosh(x)}{x^2} \int_0^x \left(1 - \frac{1}{\cosh^2 y}\right) dy > 0$ per $x > 0$.

Sostituendo $w = u\sqrt{(2x+z)/z}$ [dunque: $\frac{dw}{\sqrt{w}} = (z/(2x+z))^{1/4} \frac{dw}{\sqrt{w}}$] e ponendo $A = \sqrt{z(2x+z)}$, arriviamo all'integrale doppio

$$K_\nu(z) = \frac{1}{\Gamma(\nu + \frac{1}{2})} \int_0^\infty x^{\nu - \frac{1}{2}} \left(\frac{z}{2x+z} \right)^{1/4} \left(\underbrace{\frac{1}{2} \int_0^\infty e^{-\frac{A}{2}(w + \frac{1}{w})} w^{-1/2} dw}_{K_{-1/2}(A) = K_{1/2}(A) = \sqrt{\frac{\pi}{2A}} e^{-A}} \right) dx$$

$$= \frac{1}{\Gamma(\nu + \frac{1}{2})} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \int_0^\infty x^{\nu - \frac{1}{2}} \frac{e^{-\sqrt{z(2x+z)}}}{2\sqrt{2x+z}} dx.$$

Sostituendo $\tau = \sqrt{(2x+z)/z}$, otteniamo le rappresentazioni integrali

$$K_\nu(z) = \frac{\Gamma(\frac{1}{2})}{\Gamma(\nu + \frac{1}{2})} \left(\frac{z}{2} \right)^\nu \int_1^\infty (\tau^2 - 1)^{\nu - \frac{1}{2}} e^{-\tau z} d\tau \quad (\text{B.2})$$

$$\stackrel{\tau=1+2t}{=} \frac{\Gamma(\frac{1}{2})}{\Gamma(\nu + \frac{1}{2})} (2z)^\nu e^{-z} \int_0^\infty e^{-2zt} t^{\nu - \frac{1}{2}} (t+1)^{\nu - \frac{1}{2}} dt. \quad (\text{B.3})$$

2 Sviluppo asintotico delle funzioni di Bessel

Introduciamo prima il cosiddetto *simbolo di Hankel*

$$(\alpha, n) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{2^{-2n}}{n!} \{(4\alpha^2 - 1)(4\alpha^2 - 3) \dots (4\alpha^2 - (2n - 1)^2)\} = \frac{\Gamma(\frac{1}{2} + \alpha + n)}{n! \Gamma(\frac{1}{2} + \alpha - n)}, \quad (\text{B.4})$$

mentre $(\alpha, 0) = 1$. Questo simbolo viene utilizzato per abbreviare gli sviluppi asintotici delle varie funzioni di Bessel se $z \rightarrow \infty$ e ν è fisso.

Sostituendo la serie di Taylor

$$(1+t)^\alpha = \sum_{s=0}^{\infty} \frac{\Gamma(\alpha+1)}{s! \Gamma(\alpha+1-s)} t^s, \quad |t| < 1,$$

nella (C.3) e utilizzando la (A.1) risulta lo sviluppo asintotico (per $z \rightarrow \infty$)

$$K_\nu(z) \sim \sqrt{\frac{\pi}{2z}} e^{-z} \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(\nu, s)}{(2z)^s}, \quad |\arg z| < \frac{3}{2}\pi. \quad (\text{B.5})$$

Introducendo le funzioni $P(\nu, z)$ e $Q(\nu, z)$ tali che

$$H_\nu^{(1)}(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \{P(\nu, z) + iQ(\nu, z)\} e^{i\chi}, \quad -\pi < \arg z < 2\pi,$$

$$H_\nu^{(2)}(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \{P(\nu, z) - iQ(\nu, z)\} e^{-i\chi}, \quad -2\pi < \arg z < \pi,$$

dove $\chi = z - (\frac{1}{2}\nu + \frac{1}{4})\pi$, otteniamo dalla (C.5) e dalla seconda equazione (II.51)

$$P(\nu, z) \sim \sum_{s=0}^{\infty} (-1)^s \frac{(\nu, 2s)}{(2z)^{2s}} \sim 1 - \frac{(4\nu^2 - 1)(4\nu^2 - 9)}{2!(8z)^2} + \frac{(4\nu^2 - 1)(4\nu^2 - 9)(4\nu^2 - 25)(4\nu^2 - 49)}{4!(8z)^4} - \dots, \quad (\text{B.6a})$$

$$Q(\nu, z) \sim \sum_{s=0}^{\infty} (-1)^s \frac{(\nu, 2s+1)}{(2z)^{2s+1}} \sim \frac{4\nu^2 - 1}{8z} - \frac{(4\nu^2 - 1)(4\nu^2 - 9)(4\nu^2 - 25)}{3!(8z)^3} + \dots. \quad (\text{B.6b})$$

Gli sviluppi asintoti per $J_\nu(z)$ e $Y_\nu(z)$ (per $-\pi < \arg z < \pi$) seguono da

$$J_\nu(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi z}} [P(\nu, z) \cos \chi - Q(\nu, z) \sin \chi], \quad (\text{B.7a})$$

$$Y_\nu(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi z}} [P(\nu, z) \sin \chi + Q(\nu, z) \cos \chi], \quad (\text{B.7b})$$

dove abbiamo utilizzato (II.49) e (II.50). Per la funzione di Bessel immaginaria segue dalla prima equazione (II.51)

$$I_\nu(z) \sim \frac{e^z}{\sqrt{2\pi z}} \sum_{s=0}^{\infty} (-1)^s \frac{(\nu, s)}{(2z)^s}, \quad |\arg z| < \frac{\pi}{2}. \quad (\text{B.8})$$

Limitiamoci ai primi termini degli sviluppi asintoti e all'andamento asintotico se $z \rightarrow +\infty$. Allora arriviamo alle seguenti espressioni asintotiche (vedi (II.48), (II.52), (II.53), (II.54), (II.55) e (II.56)):

$$J_\nu(z) \sim \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \left(\cos\left(z - \frac{1}{2}\nu\pi - \frac{1}{4}\pi\right) + O\left(\frac{1}{z}\right) \right), \quad z \rightarrow +\infty, \quad (\text{B.9a})$$

$$Y_\nu(z) \sim \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \left(\sin\left(z - \frac{1}{2}\nu\pi - \frac{1}{4}\pi\right) + O\left(\frac{1}{z}\right) \right), \quad z \rightarrow +\infty, \quad (\text{B.9b})$$

$$H_\nu^{(1)}(z) \sim \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \left(e^{i\left(z - \frac{1}{2}\nu\pi - \frac{1}{4}\pi\right)} + O\left(\frac{1}{z}\right) \right), \quad z \rightarrow +\infty, \quad (\text{B.9c})$$

$$H_\nu^{(2)}(z) \sim \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \left(e^{-i\left(z - \frac{1}{2}\nu\pi - \frac{1}{4}\pi\right)} + O\left(\frac{1}{z}\right) \right), \quad z \rightarrow +\infty, \quad (\text{B.9d})$$

$$I_\nu(z) \sim \frac{1}{\sqrt{2\pi z}} e^z \left(1 + O\left(\frac{1}{z}\right) \right), \quad z \rightarrow +\infty, \quad (\text{B.9e})$$

$$K_\nu(z) \sim \sqrt{\frac{\pi}{2z}} e^{-z} \left(1 + O\left(\frac{1}{z}\right) \right), \quad z \rightarrow +\infty. \quad (\text{B.9f})$$

Appendice C

EQUAZIONE DI SCHRÖDINGER

L'equazione di Schrödinger descrive (nell'ambito della meccanica quantistica non relativistica) la probabilità che una particella si trova in una regione dello spazio al momento t . Se m è la massa della particella e $h = 2\pi\hbar$ la costante di Planck, si ha per la funzione onda $\psi(x, t)$:

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi + V(x)\psi(x, t), \quad x \in \mathbb{R}^3, \quad t > 0; \quad (\text{C.1})$$

$$\psi(x, t = 0) = \psi_0(x), \quad (\text{C.2})$$

con condizioni al contorno. La funzione $V(x)$ è reale e rappresenta il potenziale. Scegliendo unità fisiche tali che $\hbar = 1$ e $2m = 1$, risulta invece della (C.1)

$$i\frac{\partial\psi}{\partial t} = -\Delta\psi + V(x)\psi(x, t), \quad x \in \mathbb{R}^3, \quad t > 0. \quad (\text{C.3})$$

Se $E \subset \mathbb{R}^3$ è misurabile, $\int_E |\psi(x, t)|^2 dx$ (sotto la condizione di normalizzazione $\psi(\cdot, t) \in L^2(\mathbb{R}^3)$) è la probabilità di trovare la particella in E al momento t .

Studiamo esclusivamente il problema stazionario, dove l'energia λ prende il posto dell'operatore $i(\partial/\partial t)$, cioè

$$-\Delta\psi + V(x)\psi(x) = k^2\psi(x), \quad x \in \mathbb{R}^3, \quad (\text{C.4})$$

dove $\lambda = k^2$ con $\text{Im } k \geq 0$. Ci sono due problemi di rilevante importanza:

1. il problema degli stati limite: $\psi \in L^2(\mathbb{R}^3)$. In tal caso l'energia $\lambda = k^2$ è un valore discreto negativo.
2. il problema di scattering: in tal caso si impone la condizione di Sommerfeld

$$\psi(k, x) = e^{ik\theta \cdot x} + \frac{e^{ik|x|}}{|x|} A\left(k, \theta, \frac{x}{|x|}\right) + o\left(\frac{1}{|x|}\right), \quad |x| \rightarrow +\infty,$$

dove $A(k, \theta, \theta')$ è l'ampiezza (come funzione dell'energia $\lambda = k^2$ e le direzioni $\theta, \theta' \in S^2$); $e^{ik\theta \cdot x}$ rappresenta un'onda piana nella direzione θ . Nel problema di scattering si ha l'energia $\lambda > 0$.

Consideriamo il caso di simmetria sferica, dove

$$V(x) = V(r), \quad r = |x|.$$

In tal caso l'ampiezza dipende da k e dall'angolo tra le direzioni θ e θ' : $A(k, \theta, \theta') = A(k, \theta \cdot \theta')$. Per risolvere il problema di scattering bisogna separare le variabili in coordinate cilindriche, dove la direzione di θ prende il posto dall'asse z positivo. Discutiamo ora soltanto il problema degli stati limite. In tal caso si esprime l'equazione di Schrödinger in coordinate sferiche:

$$\frac{1}{r^2} \left(r^2 \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} - V(r)\psi = -\lambda\psi,$$

dove $x = (r \sin \varphi \cos \theta, r \sin \varphi \sin \theta, r \cos \varphi) \in \mathbb{R}^3$. Sostituendo

$$\psi(x) = R(r)X(\varphi, \theta)$$

e moltiplicando da $r^2/R(r)X(\varphi, \theta)$ si ottiene

$$\begin{aligned} \frac{1}{R(r)} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) + \frac{1}{X(\varphi, \theta)} \left[\frac{1}{\sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \frac{\partial X}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{\sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 X}{\partial \theta^2} \right] \\ - r^2 V(r) = -\lambda r^2. \end{aligned}$$

Come al solito, seguono le seguenti equazioni differenziali:

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dR}{dr} + \left[-\frac{C}{r^2} + \lambda - V(r) \right] R(r) = 0; \quad (\text{C.5})$$

$$\frac{1}{\sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \frac{\partial X}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{\sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 X}{\partial \theta^2} = -CX(\varphi, \theta), \quad (\text{C.6})$$

dove C è una costante. L'equazione (C.6) si chiama spesso l'equazione di Beltrami.

Grazie alle (C1.2) degli appunti sulle funzioni sferiche, esiste una soluzione non banale della (C.6) se e solo se $C = l(l+1)$ per qualche $l = 0, 1, 2, \dots$, ed in tal caso $X(\varphi, \theta)$ è una combinazione lineare delle funzioni sferiche $Y_l^m(\varphi, \theta)$, dove $m = -l, \dots, l$. Infatti, eseguendo un'ulteriore separazione delle variabili nella (C.6), $X(\varphi, \theta) = \mathcal{P}(\xi)\Theta(\theta)$ dove $\xi = \cos \varphi$ e $\Theta(\theta + 2\pi) \equiv \Theta(\theta)$, risultano

$$\Theta(\theta) = \begin{cases} \text{costante}, & m = 0 \\ c_1 \cos m\theta + c_2 \sin m\theta, & m = 1, 2, 3, \dots; \end{cases}$$

$$\frac{d}{d\xi} \left((1 - \xi^2) \frac{d\mathcal{P}}{d\xi} \right) + \left[l(l+1) - \frac{m^2}{1 - \xi^2} \right] \mathcal{P}(\xi). \quad (\text{C.7})$$

La (C.7) si dice equazione differenziale per le funzioni di Legendre associate: $\mathcal{P}(\xi) \sim \mathcal{P}_l^m(\xi)$, dove $l = m, m+1, m+2, \dots$ e $m = 0, 1, 2, \dots$.

Discutiamo ora la (C.5). Sostituendo $R(r) = r^\alpha S(r)$ nella (C.5) [con $C = l(l+1)$] per un'opportuna α (da stabilire successivamente) e dividendo da r^α , si trova

$$\frac{d^2 S}{dr^2} + \frac{2(\alpha+1)}{r} \frac{dS}{dr} + \left[\frac{\alpha(\alpha+1) - l(l+1)}{r^2} + \lambda - V(r) \right] S(r) = 0. \quad (\text{C.8})$$

Per far somigliare la (C.8) all'equazione di Bessel si scelga α tale che $2(\alpha+1) = 1$, cioè $\alpha = -1/2$:

$$\frac{d^2 S}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dS}{dr} + \left[-\frac{(l + \frac{1}{2})^2}{r^2} + \lambda - V(r) \right] S(r) = 0. \quad (\text{C.9})$$

Per far sparire il termine con la derivata prima dalla (C.8), ci vuole $\alpha = -1$. Quindi per $S(r) = rR(r)$ abbiamo

$$\frac{d^2 S}{dr^2} + \left[\frac{-l(l+1)}{r^2} + \lambda - V(r) \right] S(r) = 0. \quad (\text{C.10})$$

Per $\alpha = 0$ otteniamo dalla (C.8)

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dR}{dr} + \left[-\frac{l(l+1)}{r^2} + \lambda - V(r) \right] R(r) = 0, \quad (\text{C.11})$$

dove $l = 0, 1, 2, \dots$. Imporremo le seguenti due condizioni al contorno:

$$\begin{cases} R(r) = O(r^l), & r \rightarrow 0^+ \\ \int_0^\infty r |R(r)|^2 dr < +\infty. \end{cases} \quad (\text{C.12})$$

I seguenti casi sono di rilevante interesse:

1. La buca di potenziale, dove

$$V(r) = \begin{cases} -V_0, & 0 \leq r < r_0, \\ 0, & r > r_0. \end{cases}$$

2. L'oscillatore armonico, dove $V(r) = (\gamma/2)r^2$ per una costante $\gamma > 0$.
3. L'atomo di idrogeno, dove $V(r) = -e^2/r$ per e la carica dell'elettrone.

L'equazione (C.5) può essere risolta esattamente in tutti e tre casi.

Consideriamo ora il problema di scattering dove l'energia $E = k^2$ è positiva. In tal caso la funzione onda $\psi(k, x)$ non appartiene a $L^2(\mathbb{R}^3)$ e infatti soddisfa alla condizione di Sommerfeld

$$\begin{aligned}\psi(k, x) &= e^{ik\theta \cdot x} + \psi_s(x) \\ &= e^{ik\theta \cdot x} + \frac{e^{ik|x|}}{|x|} A\left(k, \theta, \frac{x}{|x|}\right) + o\left(\frac{1}{|x|}\right), \quad |x| \rightarrow +\infty,\end{aligned}$$

dove $A(k, \theta, \theta')$ è l'ampiezza e $k > 0$. Ovviamente il potenziale $V(x)$ deve essere localmente sommabile (cioè, $V \in L^1_{\text{loc}}(\mathbb{R}^3)$) e tendere a zero abbastanza rapidamente se $|x| \rightarrow \infty$.¹ Cercando la cosiddetta *funzione di Green* $\mathcal{G}(k; x, x')$ tale che

$$(\Delta + k^2)\mathcal{G}(k; x, x') = -4\pi\delta(x - x'),$$

cioè scegliendo [Vedi la (V.67) per $n = 3$]

$$\mathcal{G}(k; x, x') = \frac{e^{ik|x-x'|}}{|x-x'|},$$

si ottiene facilmente

$$\psi_s(x) = -\frac{1}{4\pi} \int \mathcal{G}(k; x, x') V(x') \psi(x') dx'.$$

Quindi

$$\psi(x) = e^{ik\theta \cdot x} - \frac{1}{4\pi} \int \mathcal{G}(k; x, x') V(x') \psi(x') dx'.$$

Per calcolare ψ dal potenziale si può risolvere l'equazione precedente per iterazione. Facendo una singola iterazione si arriva alla cosiddetta *approssimazione di Born*

$$\psi(x) \simeq e^{ik\theta \cdot x} - \frac{1}{4\pi} \int \mathcal{G}(k; x, x') V(x') e^{ik\theta \cdot x'} dx'.$$

Discutiamo ora il problema di scattering per i potenziali radiali $V(x) = V(r)$ con $r = |x|$ (Vedi [11]). Allora per $V \equiv 0$ l'equazione di Schrödinger per $E = k^2$ con $k > 0$ ha la soluzione generale

$$\psi(x) = \text{cost.}_1 f_l(kr) + \text{cost.}_2 g_l(kr),$$

dove

$$f_l(\rho) = \sqrt{\frac{\pi\rho}{2}} J_{l+\frac{1}{2}}(\rho) = \rho j_l(\rho), \quad g_l(\rho) = (-1)^l \sqrt{\frac{\pi\rho}{2}} J_{-(l+\frac{1}{2})}(\rho) = -\rho n_l(\rho),$$

¹I potenziali di Coulomb $V(x) = \frac{\text{cost.}}{|x|}$ non conducono ad una teoria di scattering quantistica tanto semplice, poichè non decadono abbastanza rapidamente.

dove $l = 0, 1, 2, \dots$ e j_l e n_l si chiamano funzioni di Bessel sferiche di prima e seconda specie. Sviluppando l'onda piana

$$e^{ik\theta \cdot x} = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l c_{l,m} \frac{f_l(kr)}{kr} Y_l^m(\theta, \varphi),$$

si trova per l'ampiezza

$$f(k; \theta \cdot \theta') \stackrel{\text{def}}{=} A(k, \theta, \theta') = \frac{1}{k} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) e^{i\delta_l(k)} \sin \delta_l(k) P_l(\theta \cdot \theta'),$$

dove $\delta_l(k)$ si chiamano *fasi di scattering*.

1 La buca di potenziale

In tal caso

$$V(r) = \begin{cases} -V_0, & 0 \leq r < r_0, \\ 0, & r > r_0, \end{cases} \quad (\text{C.13})$$

dove $V_0 > 0$. Sostituendo $R(r) = r^{-1/2}S(r)$ otteniamo [Vedi (C.9)]

$$\begin{aligned} \frac{d^2 S}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dS}{dr} + \left[V_0 - \kappa^2 - \frac{(l + \frac{1}{2})^2}{r^2} \right] S(r) &= 0, & 0 < r < r_0, \\ \frac{d^2 S}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dS}{dr} - \left[\kappa^2 + \frac{(l + \frac{1}{2})^2}{r^2} \right] S(r) &= 0, & r > r_0, \end{aligned} \quad (\text{C.14})$$

dove $\lambda = -\kappa^2$ per $\kappa > 0$. Ovviamente, per $r > r_0$ la (C.14) è l'equazione immaginaria di Bessel di ordine $l + \frac{1}{2}$ nella variabile κr . Siccome deve tendere a zero se $r \rightarrow \infty$, si trova

$$S(r) \sim K_{l+\frac{1}{2}}(\kappa r), \quad r > r_0, \quad (\text{C.15})$$

dove $K_\nu(z)$ è la funzione di MacDonald di ordine ν . Per $\nu, z > 0$ la funzione di MacDonald $K_\nu(z)$ è decrescente.

Per $0 < r < r_0$ la situazione è più complicata. Siccome $S(0^+)$ esiste, risulta per $0 < r < r_0$

$$S(r) \sim \begin{cases} J_{l+\frac{1}{2}}(r\sqrt{V_0 - \kappa^2}), & V_0 > \kappa^2, \\ r^{l+\frac{1}{2}}, & V_0 = \kappa^2, \\ I_{l+\frac{1}{2}}(r\sqrt{\kappa^2 - V_0}), & V_0 < \kappa^2, \end{cases} \quad (\text{C.16})$$

dove $J_\nu(z)$ è la funzione di Bessel di ordine ν e $I_\nu(z)$ è la funzione di Bessel immaginaria di ordine ν .

Per trovare i stati limite richiediamo che la derivata logaritmica della S (cioè, S'/S) sia continua in $r = r_0$. Grazie al decadimento della funzione di MacDonald, si vede subito che $S'(r)/S(r)$ ha un limite negativo se $r \rightarrow (r_0)^+$. D'altra parte, $r^{l+\frac{1}{2}}$ e la funzione di Bessel immaginaria sono crescenti per $r > 0$, mentre la funzione di Bessel stessa è oscillatoria. Quindi gli stati limiti possono esistere soltanto per $V_0 > \kappa^2$. In tal caso

$$S(r) \sim J_{l+\frac{1}{2}}(r\sqrt{V_0 - \kappa^2}), \quad (\text{C.17})$$

dove

$$\kappa r_0 \frac{K'_{l+\frac{1}{2}}(\kappa r_0)}{K_{l+\frac{1}{2}}(\kappa r_0)} = r_0 \sqrt{V_0 - \kappa^2} \frac{J'_{l+\frac{1}{2}}(r_0\sqrt{V_0 - \kappa^2})}{J_{l+\frac{1}{2}}(r_0\sqrt{V_0 - \kappa^2})}. \quad (\text{C.18})$$

Le energie $\lambda = -\kappa^2$ corrispondenti agli stati limite si trovano dal numero finito di zeri della (C.18) per $0 < \kappa < \sqrt{V_0}$; ci sono zeri per soltanto un numero finito di $l = 0, 1, 2, \dots$

Per $l = 0$ abbiamo

$$K_{\frac{1}{2}}(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2z}} e^{-z}, \quad J_{\frac{1}{2}}(w) = \sqrt{\frac{\pi}{2w}} \sin(w).$$

Allora (C.18) si riduce all'identità

$$\frac{\tan(\sqrt{V_0 r_0^2 - z^2})}{\sqrt{V_0 r_0^2 - z^2}} = -\frac{1}{1+z},$$

dove $z = \kappa r_0$. Gli zeri $z = \kappa r_0 \in (0, r_0\sqrt{V_0})$ si ottengono graficamente.

Per $l = 0$ si può ottenere i risultati in modo più semplice senza utilizzare le funzioni di Bessel. Partendo dall'equazione di Schrödinger (C.10) per $V(r)$ in (C.13), otteniamo per $S(r) = rR(r)$

$$\begin{cases} S''(r) + (V_0 - \kappa^2)S(r) = 0, & 0 < r < r_0, \\ S'' - \kappa^2 S(r) = 0, & r > r_0, \end{cases} \quad (\text{C.19})$$

dove $\int_0^\infty |S(r)|^2 dr < \infty$, $S(0) = 0^2$ e S è di classe C^1 in $r = r_0$. Per $r > r_0$ risulta $S(r) \sim e^{-\kappa r}$. Quindi ci vuole $(S'/S)(r_0) = -\kappa < 0$.

Se $0 \leq V_0 < \kappa^2$, per $0 < r < r_0$ risulta $S(r) \sim \sinh(r\sqrt{\kappa^2 - V_0})$ [grazie alla condizione $S(0) = 0$] per $0 < r < r_0$ e quindi è impossibile avere $(S'/S)(r_0) < 0$. Per $\kappa = \sqrt{V_0}$ risulta $S(r) \sim r$ [grazie alla condizione $S(0) = 0$]

²Una condizione tecnica mai spiegata dal punto di vista fisico per costringere ad una successione finita di autovalori.

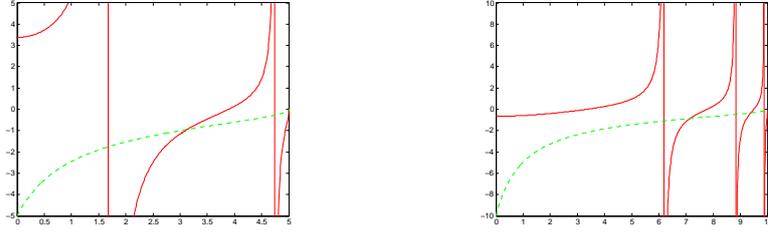


Figura C.1: Per $l = 0$ e per $r_0\sqrt{V_0} = 5$ (pannello sinistro) o 10 (pannello destro) vengono calcolati graficamente i valori di $z = \kappa r_0$ per cui l'equazione di Schrödinger per la buca sferica ha stato limite.

e quindi $(S'/S)(r_0) = (1/r_0) > 0$. Di conseguenza, siamo costretti a limitarci al caso $0 < \kappa < \sqrt{V_0}$. In tal caso la condizione $S(0) = 0$ conduce a $S(r) \sim \sin(r\sqrt{V_0 - \kappa^2})$ per $0 < r < r_0$. Dalla condizione di derivabilità continua in $r = r_0$ si trova

$$\sqrt{V_0 - \kappa^2} \frac{\cos(r_0\sqrt{V_0 - \kappa^2})}{\sin(r_0\sqrt{V_0 - \kappa^2})} = -\kappa.$$

Per studiare quest'ultima equazione, poniamo $\xi = r_0\sqrt{V_0 - \kappa^2}$ (che appartiene all'intervallo $(0, r_0\sqrt{V_0})$) e scriviamo l'equazione nella forma

$$\frac{\xi}{\tan(\xi)} = -\sqrt{V_0 r_0^2 - \xi^2}, \quad 0 < \xi < r_0\sqrt{V_0},$$

oppure

$$\tan(\xi) = -\frac{\xi}{\sqrt{V_0 r_0^2 - \xi^2}}, \quad 0 < \xi < r_0\sqrt{V_0}.$$

Per $n = 1, 2, 3, \dots$ e $(n - \frac{1}{2})\pi < r_0\sqrt{V_0} \leq (n + \frac{1}{2})\pi$ ci sono n soluzioni ξ di quest'equazione e quindi n stati limite.

2 Oscillatore armonico

a. Utilizzando le coordinate sferiche. In tal caso

$$V(r) = \frac{1}{2}\gamma r^2, \quad (\text{C.20})$$

dove $\gamma > 0$ è una costante. Ponendo $c = \sqrt{\gamma/8}$ e $R(r) = e^{-cr^2}\phi(r)$, la (C.11) si riduce all'equazione differenziale

$$\phi''(r) + \left(\frac{2}{r} - 4cr\right)\phi'(r) + \left(k^2 - 6c - \frac{l(l+1)}{r^2}\right)\phi(r) = 0. \quad (\text{C.21})$$

Sostituendo la serie di potenze

$$\phi(r) = r^\alpha \sum_{s=0}^{\infty} c_s r^s, \quad (\text{C.22})$$

dove α è un parametro da stabilire, troviamo

$$\sum_{s=0}^{\infty} [\{(\alpha+s)(\alpha+s-1) + 2(\alpha+s) - l(l+1)\}c_s + \{(k^2 - 6c) - 4c(\alpha+s-2)\}c_{s-2}] r^{\alpha+s-2} = 0,$$

dove $c_{-1} = c_{-2} = 0$. Supponendo che il coefficiente di $r^{\alpha-2}$ sia diverso da zero, si trova

$$\alpha(\alpha-1) + 2\alpha - l(l+1) = 0,$$

e quindi $\alpha = l$ oppure $\alpha = -(l+1)$. La condizione al contorno (C.12) se $r \rightarrow 0^+$ implica che $\alpha = l$. In tal caso $c_1 = 0$ e

$$s(s+2l+1)c_s + \{(k^2 - 6c) - 4c(s+l-2)\}c_{s-2} = 0. \quad (\text{C.23})$$

Dunque $c_1 = c_3 = c_5 = \dots = 0$ e

$$c_s = \frac{4c(s+l-2) - (k^2 - 6c)}{s(s+2l+1)}c_{s-2},$$

dove $s = 2, 4, 6, \dots$. Il rapporto $c_s r^2 / c_{s-2} \sim (4cr^2/s)$ se $s \rightarrow +\infty$. Quindi scegliamo k^2 tale che $c_s = 0$ per qualche $s = 2, 4, 6, \dots$, cioè

$$k^2 = 4c(s+l-2) + 6c, \quad s = 2, 4, 6, \dots$$

Quindi abbiamo trovato gli autovalori e le autofunzioni

$$\begin{cases} k_{l,n}^2 = 2c(2n+3), & l = n, n-2, n-4, \dots, l = 0, 1, 2, \dots, \\ \psi_{l,n}(r, \theta, \varphi) = e^{-cr^2} \phi_{l,n}(r) Y_l^m(\theta, \varphi), & m = -l, -l+1, \dots, l, \end{cases} \quad (\text{C.24})$$

dove $\phi_{l,n}(r) = r^l v_{l,n}(r)$ e $v_{l,n}(r)$ è un polinomio in r^2 di grado $n - l$. Quel polinomio soddisfa l'equazione

$$r^2 v''(r) + 2r(l + 1 - 2cr^2)v'(r) + 4c(n - l)r^2 v(r) = 0.$$

Ponendo $t = 2cr^2$ e $w(t) = v(r)$ [tali che $rv'(r) = 2tw'(t)$ e $r^2 v''(r) = 4t^2 w''(t) + 2tw'(t)$] otteniamo l'equazione differenziale

$$tw''(t) + (l + \frac{3}{2} - t)w'(t) + \frac{1}{2}(n - l)w(t) = 0, \quad (\text{C.25})$$

dove $n - l = 0, 2, 4, \dots$ e $w(t)$ è un polinomio in t di grado $\frac{1}{2}(n - l)$.

b. Utilizzando le coordinate cartesiane. Siccome $V(r) = \frac{\gamma}{2}r^2 = \frac{\gamma}{2}(x^2 + y^2 + z^2)$, l'equazione di Schrödinger è anche separabile in coordinate Cartesiane. Infatti, scrivendo $\psi(x, y, z) = X(x)Y(y)Z(z)$ otteniamo le tre equazioni

$$\begin{cases} X''(x) + \left(k_x^2 - \frac{\gamma x^2}{2}\right) X(x) = 0, \\ Y''(y) + \left(k_y^2 - \frac{\gamma y^2}{2}\right) Y(y) = 0, \\ Z''(z) + \left(k_z^2 - \frac{\gamma z^2}{2}\right) Z(z) = 0, \end{cases} \quad (\text{C.26})$$

dove $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$. Studiamo ora una delle equazioni in una variabile. Ponendo $X(x) = e^{-cx^2} \phi(x)$ per $c = \sqrt{\gamma/8}$, l'equazione $X''(x) + [k_x^2 - (\gamma x^2/2)]X(x) = 0$ si riduce all'equazione

$$\phi''(x) - 4cx\phi'(x) + (k_x^2 - 2c)\phi(x) = 0. \quad (\text{C.27})$$

Sostituendo $\phi(x) = x^\alpha \sum_{s=0}^{\infty} c_s x^s$, otteniamo

$$\sum_{s=0}^{\infty} [(\alpha + s)(\alpha + s - 1)c_s + \{(k_x^2 - 2c) - 4c(\alpha + s - 2)\}c_{s-2}] x^{\alpha+s-2} = 0, \quad (\text{C.28})$$

dove $c_{-1} = c_{-2} = 0$. Scegliendo $\alpha = 0$, troviamo $c_1 = c_3 = c_5 = \dots = 0$ e

$$\frac{c_s}{c_{s-2}} = \frac{4c(s-2) - (k_x^2 - 2c)}{s(s-1)}, \quad s = 2, 4, 6, \dots,$$

risultando in polinomi in x di grado $n = 0, 2, 4, \dots$ se $k_x^2 = 2c(2n + 1)$. Scegliendo $\alpha = 1$, troviamo $c_1 = c_3 = c_5 = \dots = 0$ e

$$\frac{c_s}{c_{s-2}} = \frac{4c(s-1) - (k_x^2 - 2c)}{s(s+1)}, \quad s = 2, 4, 6, \dots,$$

risultando in polinomi in x di grado $n = 1, 3, 5, \dots$ se $k_x^2 = 2c(2n+1)$. Insieme troviamo le seguenti soluzioni $X_n(x) = \phi_n(x)e^{-cx^2}$, dove $\phi_n(x)$ è un polinomio di grado $n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$ e $k_x^2 = 2c(2n+1)$. Raccogliendo X, Y e Z risulta

$$\begin{cases} k^2 = 2c(2n+3), \\ \psi(x, y, z) = e^{-c(x^2+y^2+z^2)} \phi_{n_1}(x) \phi_{n_2}(y) \phi_{n_3}(z), \end{cases} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (\text{C.29})$$

dove $n = n_1 + n_2 + n_3$.

c. Analisi dei polinomi. Sostituendo $z = x\sqrt{2c}$ e $v(z) = \phi(x)$ si arriva all'equazione differenziale di Hermite (II.90). Quindi i polinomi $\phi_n(x)$ nella (C.29) sono proporzionali a $H_n(x\sqrt{2c})$, dove H_n è il polinomio di Hermite di grado n . Vale la relazione d'ortogonalità [vedi la (II.92)]

$$\int_{-\infty}^{\infty} H_n(x\sqrt{2c}) H_m(x\sqrt{2c}) e^{-2cx^2} dx = \frac{2^n (n!) \sqrt{\pi}}{\sqrt{2c}} \delta_{n,m},$$

dove $\delta_{n,m}$ è la delta di Kronecker.

I polinomi $w_m(t)$ ($m = n - l = 0, 1, 2, \dots$) soddisfano l'equazione differenziale

$$tw_m''(t) + \left(l + \frac{3}{2} - t\right)w_m'(t) + mw_m(t) = 0.$$

Quest'ultima equazione coincide con l'equazione differenziale di Laguerre per $\alpha = l + \frac{1}{2}$ [vedi la (II.100)]. Quindi $w_m(t)$ è proporzionale al polinomio di Laguerre $L_m^{(l+\frac{1}{2})}(t)$. In altre parole,

$$\phi_{l,n}(r) = \text{cost.} r^l L_{n-l}^{(l+\frac{1}{2})}(2cr^2).$$

Calcoliamo ora il numero N_n di autofunzioni linearmente indipendenti corrispondenti allo stesso livello di energia, cioè allo stesso intero $n = 0, 1, 2, \dots$. Dalla derivazione in coordinate cartesiane segue che N_n è uguale al numero di punti (n_1, n_2, n_3) con coordinate intere non negative per cui $n_1 + n_2 + n_3 = n$. Dalla derivazione in coordinate sferiche segue che

$$N_n = \begin{cases} \#\{(n_1, n_2, n_3) \in \mathbb{Z}_+ : n_1 + n_2 + n_3 = n\} = \frac{1}{2}(n+1)(n+2), \\ \sum_{\substack{l=0,1,\dots,n \\ n-l \text{ pari}}} (2l+1) = \frac{1}{2}(n+1)(n+2), \end{cases}$$

dove ci rendiamo conto del fatto che ad ogni $l = 0, 1, 2, 3, \dots$ corrispondono $2l+1$ autofunzioni linearmente indipendenti (corrispondenti ai valori di $m = -l, -l+1, \dots, l$) con lo stesso livello di energia.

3 Atomo d'idrogeno

In tal caso $V(r) = -e^2/r$, dove e è la carica dell'elettrone. Ponendo $\lambda = -\kappa^2$ per $\kappa > 0$ (cioè, richiedendo che l'energia sia negativa), l'equazione di Schrödinger (C.10) ha la seguente forma:

$$S''(r) + \left(-\kappa^2 + \frac{e^2}{r} - \frac{l(l+1)}{r^2} \right) S(r) = 0, \quad (\text{C.30})$$

dove $l = 0, 1, 2, \dots$. Sostituendo $S(r) = e^{-\kappa r} w(r)$ otteniamo

$$w''(r) - 2\kappa w'(r) + \left(\frac{e^2}{r} - \frac{l(l+1)}{r^2} \right) w(r) = 0. \quad (\text{C.31})$$

Sostituendo ora $w(r) = r^\alpha \sum_{s=0}^{\infty} c_s r^s$ si ottiene

$$\sum_{s=0}^{\infty} \left[\{(\alpha + s)(\alpha + s - 1) - l(l + 1)\} c_s + \{e^2 - 2\kappa(\alpha + s - 1)\} c_{s-1} \right] r^{\alpha+s-2} = 0. \quad (\text{C.32})$$

Osserviamo che il termine costante nella (C.32) coincide con $(\alpha - l - 1)(\alpha + l)c_0$. Scegliendo $\alpha = l + 1$ (escludendo $\alpha = -l$) otteniamo

$$\frac{c_s}{c_{s-1}} = \frac{2\kappa(s + l) - e^2}{s(s + 2l + 1)}, \quad s = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{C.33})$$

Per produrre soluzioni polinomiali richiediamo che $\kappa = (e^2/2n)$ per $n = l + 1, l + 2, \dots$.³ In tal caso risulta $c_{n-l} = c_{n+1-l} = \dots = 0$; dunque $w(r) = r^{l+1}v(r)$, dove $v(r)$ è un polinomio in r di grado $n - l - 1$. In altre parole,

$$\begin{cases} \kappa_n^2 = -\frac{e^4}{4n^2}, & n = l + 1, l + 2, \dots, \\ \psi(r, \theta, \varphi) = r^{l+1} e^{-e^2 r/2n} v_{l, n-l-1}(r) Y_l^m(\theta, \varphi), & m = -l, -l + 1, \dots, l. \end{cases} \quad (\text{C.34})$$

Ponendo $w(r) = r^{l+1}v(r)$, $t = 2\kappa r$, $e^2 = 2\kappa n$ e $\tilde{v}(t) = v(r)$, otteniamo

$$t \tilde{v}''(t) + (2l + 2 - t) \tilde{v}'(t) + (n - l - 1) \tilde{v}(t) = 0. \quad (\text{C.35})$$

Sostituendo $x \mapsto t$, $\alpha \mapsto 2l + 1$ e $n \mapsto n - l - 1$ nell'equazione differenziale di Laguerre si arriva alla (C.35). Dunque $\tilde{v}(t)$ è proporzionale a $L_{n-l-1}^{(2l+1)}(t)$. In

³Si pone $n = s + l$, dove $s = 1, 2, \dots$ e $l = 0, 1, 2, \dots$. Quindi $n = 1, 2, 3, \dots$ e $l = 0, 1, \dots, n - 1$.

altre parole,

$$\begin{cases} E_n = -\kappa_n^2 = -\frac{e^4}{4n^2}, & n = l + 1, l + 2, \dots, \\ \psi(r, \theta, \varphi) = \text{cost.} r^{l+1} e^{-e^2 r/2n} L_{n-l-1}^{(2l+1)}\left(\frac{e^2 r}{n}\right) Y_l^m(\theta, \varphi), & m = -l, -l + 1, \dots, l, \end{cases} \quad (\text{C.36})$$

dove $n = 1, 2, 3, \dots$, $l = 0, 1, \dots, n - 1$ e $m = -l, -l + 1, \dots, l$.

Osserviamo che le energie $E_n = -(e^2/2n^2)$ degli stati limite dell'idrogeno vengono determinate dall'intero $n \in \mathbb{N}$. Ad ogni $n \in \mathbb{N}$ corrispondono $n - 1$ valori di l ($l = 0, 1, \dots, n - 1$) e ad ogni tale l $2l + 1$ valori di m ($m = -l, \dots, l$). Quindi ad ogni $n \in \mathbb{N}$ corrispondono

$$1 + 3 + 5 + 7 + \dots + (2n - 1) = n^2$$

valori di (l, m) ($l, m \in \mathbb{Z}$, $|m| \leq l < n$). In altre parole, per $E = -e^4/4n^2$ l'equazione di Schrödinger con potenziale $V(r) = -(e^2/r)$ ha n^2 soluzioni linearmente indipendenti in $L^2(\mathbb{R}^3)$.

Appendice D

TRASFORMATA DI FOURIER

1 Trasformata di Fourier negli spazi L^1 e L^2 .

Sia $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{C}$ una funzione sommabile. Allora l'integrale (di Lebesgue)

$$\hat{f}(\xi) \stackrel{\text{def}}{=} F[f](\xi) = \int f(x)e^{-i(\xi,x)} dx, \quad \xi \in \mathbb{R}^n,$$

è assolutamente convergente e $|\hat{f}(\xi)| \leq \|f\|_1$, dove $\|f\|_1 = \int |f(x)| dx$ è la norma L^1 di f . In tal caso si definisce una funzione

$$\xi \mapsto F[f](\xi)$$

su \mathbb{R}^n che si chiama la *trasformata di Fourier* della f . Dal teorema della convergenza dominata¹ segue che $F[f](\xi)$ è continua in $\xi \in \mathbb{R}^n$.

Proposizione D.1 *Sia $f \in L^1(\mathbb{R}^n)$. Allora $F[f](\xi)$ è continua in $\xi \in \mathbb{R}^n$ e tende a zero se $|\xi| \rightarrow +\infty$.*²

Dimostrazione. La continuità di $F[f](\xi)$ al variare di ξ segue dal teorema della convergenza dominata (infatti, dal Lemma 6.9.1 in [7], Vol. 2). La seconda parte segue approssimando $(\operatorname{Re} f)^\pm$ e $(\operatorname{Im} f)^\pm$ da una successione crescente di funzioni semplici sommabili e applicando il teorema di Beppo-Levi.³ \square

¹Teorema della convergenza dominata (di Lebesgue): Sia $\{f_n\}_{n=1}^\infty$ una successione di funzioni misurabili tali che $f_n(t) \rightarrow f(t)$ per quasi ogni t , $|f_n(t)| \leq g(t)$ per quasi ogni t e $\int g(t) dt < +\infty$. Allora $\lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n(t) dt = \int f(t) dt$.

²La seconda parte si chiama il Lemma di Riemann-Lebesgue.

³Teorema della convergenza monotona (di Beppo-Levi): Sia $\{f_n\}_{n=1}^\infty$ una successione crescente di funzioni misurabili non negative tali che $f_n(t) \rightarrow f(t)$ per quasi ogni t . Allora $\lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n(t) dt = \int f(t) dt$.

Siano $f, g \in L^1(\mathbb{R}^n)$. Inoltre, siano $(\cdot, \cdot)_c$ il prodotto scalare complesso di $L^2(\mathbb{R}^n)$ e (\cdot, \cdot) quello reale. Allora $F[f], F[g] \in L^\infty(\mathbb{R}^n)$. In tal caso risulta per $f, g \in L^1(\mathbb{R}^n)$

$$\begin{aligned} (F[f], g) &= \int \left[\int f(x) e^{-i(x, \xi)} dx \right] g(\xi) d\xi \\ &= \int f(x) \left[\int g(\xi) e^{-i(\xi, x)} d\xi \right] dx = (f, F[g]); \end{aligned} \quad (\text{D.1})$$

$$\begin{aligned} (F[f], g)_c &= \int \left[\int f(x) e^{-i(x, \xi)} dx \right] \overline{g(\xi)} d\xi \\ &= \int f(x) \left[\int g(\xi) e^{i(\xi, x)} d\xi \right] dx = (f, F[g](-\xi))_c, \end{aligned} \quad (\text{D.2})$$

dove il secondo passaggio è giustificato grazie al teorema di Fubini.⁴

Siano $f, g \in L^1(\mathbb{R}^n)$. Allora il teorema di Fubini dimostra che il prodotto di convoluzione

$$(f * g)(x) = \int f(y) g(x - y) dy = \int f(x - y) g(y) dy$$

conduce ad una funzione $f * g \in L^1(\mathbb{R}^n)$. Dal teorema di Fubini segue che

$$f * g = g * f, \quad (f * g) * h = f * (g * h),$$

dove $f, g, h \in L^1(\mathbb{R}^n)$. Applicando la trasformazione $z = x - y$ con y fissato si ha

$$\begin{aligned} F[f * g](\xi) &= \int \left(\int f(y) g(x - y) dy \right) e^{-i(x, \xi)} dx \\ &= \int \left(\int f(y) e^{-i(y, \xi)} g(z) e^{-i(z, \xi)} dy \right) dz = F[f](\xi) F[g](\xi). \end{aligned} \quad (\text{D.3})$$

In altre parole, la trasformata di Fourier manda l'algebra $L^1(\mathbb{R}^n)$ dove la moltiplicazione è il prodotto di convoluzione, nell'algebra $C(\mathbb{R}^n)$ dove la moltiplicazione è il prodotto algebrico usuale.

Consideriamo ora la trasformata di Fourier su $L^2(\mathbb{R}^n)$.

Teorema D.2 (di Plancherel) *Sia $f \in L^1(\mathbb{R}^n) \cap L^2(\mathbb{R}^n)$. Allora*

$$\frac{1}{(2\pi)^n} \int |F[f](\xi)|^2 d\xi = \int |f(x)|^2 dx. \quad (\text{D.4})$$

⁴Sia $f(t, s)$ una funzione misurabile di due variabili. Supponiamo che almeno uno degli integrali ripetuti $\int (\int |f(t, s)| ds) dt$ e $\int (\int |f(t, s)| dt) ds$ sia convergente. Allora si può scambiare l'ordine di integrazione: $\int (\int f(t, s) ds) dt = \int (\int f(t, s) dt) ds$.

Inoltre, F ammette un'estensione lineare ad $L^2(\mathbb{R}^n)$ che soddisfa la (D.4) per ogni $f \in L^2(\mathbb{R}^n)$ ed è un operatore invertibile su $L^2(\mathbb{R}^n)$.

Dimostrazione. Prima diamo la dimostrazione per $n = 1$.

Sia f una funzione continua e regolare a tratti con supporto in $(-\pi, \pi)$. Allora la serie di Fourier di f converge uniformemente ad f in $x \in [-\pi, \pi]$ (vedi [7], Teorema 2.5.2, Vol. 2):

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)) \\ &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a_n - ib_n}{2} e^{inx} + \frac{a_n + ib_n}{2} e^{-inx} \right) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{inx}, \end{aligned}$$

dove $c_n = (1/2\pi) \int_{-\pi}^{\pi} f(x) e^{-inx} dx = (2\pi)^{-1} F[f](-n)$ e

$$\begin{aligned} \int_{-\pi}^{\pi} |f(x)|^2 dx &= \pi \left(\frac{|a_0|^2}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (|a_n|^2 + |b_n|^2) \right) \\ &= 2\pi \sum_{n=-\infty}^{\infty} |c_n|^2 = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} |F[f](-n)|^2. \end{aligned}$$

Siccome $c_n [e^{-ixt} f] = (2\pi)^{-1} F[f](n+t)$ per ogni $n \in \mathbb{Z}, t \in \mathbb{R}$ e $|f(x)|^2 = |e^{-ixt} f(x)|^2$, risulta

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} |f(x)|^2 dx &= \int_0^1 \int_{-\infty}^{\infty} |f(x)|^2 dx dt \\ &= \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_0^1 |F[f](n+t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F[f](\xi)|^2 d\xi. \end{aligned}$$

Se f ha supporto compatto in \mathbb{R} , si scelga $c > 0$ tale che $g(x) = c^{1/2} f(cx)$ ha supporto in $(-\pi, \pi)$. In tal caso

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} |f(x)|^2 dx &= \int_{-\infty}^{\infty} |g(x)|^2 dx \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F[g](\xi)|^2 d\xi = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F[f](\xi)|^2 d\xi. \end{aligned}$$

Se $f \in L^1(\mathbb{R}) \cap L^2(\mathbb{R})$, approssimiamo f da funzioni continue e regolari a tratti con supporto compatto e troviamo la stessa relazione.

L'equazione (D.4) dimostra che F può essere estesa ad un operatore lineare F da $L^2(\mathbb{R})$ in $L^2(\mathbb{R})$ che soddisfa (D.4). Infine, siccome F manda il sottospazio denso $L^1(\mathbb{R}) \cap L^2(\mathbb{R})$ di $L^2(\mathbb{R})$ nel sottospazio denso $C(\mathbb{R}) \cap L^2(\mathbb{R})$ di $L^2(\mathbb{R})$ e l'immagine di F è chiuso, F è un operatore invertibile su $L^2(\mathbb{R})$.

La generalizzazione ad $n \in \mathbb{N}$ segue applicando n trasformazioni di Fourier unidimensionali in seguito. \square

Corollario D.3 *Sia $f \in L^2(\mathbb{R}^n)$. Allora l'operatore inverso ha la forma*

$$F^{-1}[f](\xi) = \frac{1}{(2\pi)^n} F[f](-\xi) = \frac{1}{(2\pi)^n} \int f(x) e^{i(x,\xi)} dx. \quad (\text{D.5})$$

Dimostrazione. Si ricordi che $(\cdot, \cdot)_c$ è il prodotto scalare complesso in $L^2(\mathbb{R}^n)$. Allora per $f, g \in L^1(\mathbb{R}^n) \cap L^2(\mathbb{R}^n)$ segue

$$(F[f], g)_c = (F[f], \bar{g}) = (f, F[\bar{g}]) = (f, F[g](-\xi))_c,$$

e questa relazione si generalizza per $f, g \in L^2(\mathbb{R}^n)$. Dalla (D.4) segue che

$$(f, g)_c = (2\pi)^{-n} (F[f], F[g])_c = (2\pi)^{-n} (f, F[F[g](-\xi)])_c,$$

dove $f, g \in L^2(\mathbb{R}^n)$. Siccome f, g sono arbitrarie, è valida la (D.5). \square

Dal Corollario D.3 si vede subito che $(2\pi)^{-n/2} F$ è un operatore lineare unitario sullo spazio di Hilbert complesso $L^2(\mathbb{R}^n)$. L'applicazione dell'operatore lineare $(2\pi)^{-n/2} F$ ad una funzione $f \in L^2(\mathbb{R}^n)$ non ne cambia la norma L^2 .

2 Funzioni Generalizzate di Crescita Lenta

Uno dei metodi più efficaci di risoluzione dei problemi della fisica matematica è il metodo delle trasformate di Fourier. Nel prossimo paragrafo sarà esposta la teoria della trasformata di Fourier per le cosiddette funzioni generalizzate di crescita lenta (distribuzioni rinvenute). Per questa ragione bisogna prima studiare la classe delle funzioni generalizzate di crescita lenta.

Riportiamo nell'insieme delle funzioni fondamentali $\mathcal{S} = \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$ tutte le funzioni della classe $C^\infty(\mathbb{R}^n)$ decrescenti, per $|x| \rightarrow +\infty$, con tutte le derivate più rapidamente di ogni potenza non negativa di $1/|x|$. Definiamo la convergenza in \mathcal{S} come segue: la successione delle funzioni $\varphi_1, \varphi_2, \dots$, da \mathcal{S} converge ad una funzione $\varphi \in \mathcal{S}$, cioè $\varphi_k \rightarrow \varphi$ per $k \rightarrow \infty$ in \mathcal{S} , se, per tutti i valori dei multiindici⁵ α e β , si ha

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \sup_{x \in \mathbb{R}^n} |x^\beta D^\alpha \varphi_k(x) - x^\beta D^\alpha \varphi(x)| = 0.$$

⁵Se $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$, $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n) \in (\mathbb{N} \cup \{0\})^n$ e $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_n) \in (\mathbb{N} \cup \{0\})^n$, allora $x^\beta = x_1^{\beta_1} \dots x_n^{\beta_n}$ e $D^\alpha \varphi(x) = D_{x_1}^{\alpha_1} D_{x_2}^{\alpha_2} \dots D_{x_n}^{\alpha_n} \varphi(x)$. Secondo il teorema di Schwartz, l'ordine di derivazione parziale non importa. Inoltre, $|\alpha| = \alpha_1 + \dots + \alpha_n$.

Le operazioni di derivazione $D^\beta \varphi(x)$ e di sostituzione lineare non singolare di variabili $\varphi(Ay + b)$ (dove $\det A \neq 0$) sono continue da \mathcal{S} in \mathcal{S} . Questo segue direttamente dalla definizione di convergenza nello spazio \mathcal{S} .

D'altro canto, la moltiplicazione per una funzione infinitamente derivabile può far uscire all'esterno dell'insieme \mathcal{S} , per esempio $e^{-|x|^2} e^{|x|^2} = 1 \notin \mathcal{S}$.

Si dice *funzione generalizzata di crescita lenta* ogni funzionale lineare continuo sullo spazio \mathcal{S} delle funzioni fondamentali. Denotiamo $\mathcal{S}' = \mathcal{S}'(\mathbb{R}^n)$ l'insieme di tutte le funzioni generalizzate di crescita lenta. È evidente che \mathcal{S}' è un insieme lineare. Definiamo come *debole* la convergenza di una successione di funzionali: una successione di funzioni generalizzate f_1, f_2, \dots , appartenenti a \mathcal{S}' , converge ad una funzione generalizzata $f \in \mathcal{S}'$, cioè $f_k \rightarrow f$ per $k \rightarrow \infty$ in \mathcal{S}' se, per qualunque $\varphi \in \mathcal{S}$ si ha $(f_k, \varphi) \rightarrow (f, \varphi)$ per $k \rightarrow \infty$. L'insieme lineare \mathcal{S}' dotato di convergenza debole è detto spazio \mathcal{S}' delle funzioni generalizzate di crescita lenta.

Esempi di funzioni generalizzate di crescita lenta:

- (a) Se $f(x)$ è una funzione localmente sommabile di crescita lenta all'infinito, cioè per un certo $m \geq 0$,

$$\int |f(x)|(1 + |x|)^{-m} dx < +\infty,$$

questa funzione definisce un funzionale regolare f appartenente a \mathcal{S}' in conformità con la regola

$$(f, \varphi) = \int f(x)\varphi(x) dx, \quad \varphi \in \mathcal{S}.$$

Ma non tutte le funzioni localmente sommabili definiscono una funzione generalizzata di crescita lenta, per esempio, $e^x \notin \mathcal{S}'(\mathbb{R})$. D'altro canto, non tutte le funzioni localmente sommabili appartenenti a \mathcal{S}' sono di crescita lenta. Per esempio, la funzione $(\cos e^x)' = -e^x \sin e^x$ non è di crescita lenta, eppure definisce una funzione generalizzata da \mathcal{S}' mediante la formula

$$((\cos e^x)', \varphi) = - \int (\cos e^x)\varphi'(x) dx, \quad \varphi \in \mathcal{S}.$$

- (b) La *funzione Delta di Dirac* è il funzionale lineare

$$f \xrightarrow{\delta} f(0), \quad f \in \mathcal{S}.$$

- (c) La derivata $D^\alpha \delta$ della funzione Delta di Dirac appartiene a \mathcal{S}' . Infatti, il terzo membro dell'uguaglianza

$$(D^\alpha \delta, \varphi) = (-1)^{|\alpha|} (\delta, D^\alpha \varphi) = (-1)^{|\alpha|} [D^\alpha \varphi](0)$$

è un funzionale lineare continuo su \mathcal{S} .

- (d) Se $f \in \mathcal{S}'$, allora ogni derivata $D^\alpha f \in \mathcal{S}'$. Infatti, visto che l'operazione di derivazione $D^\alpha \varphi$ è continua da \mathcal{S} in \mathcal{S} , il secondo membro dell'uguaglianza

$$(D^\alpha f, \varphi) = (-1)^{|\alpha|} (f, D^\alpha \varphi), \quad \varphi \in \mathcal{S},$$

è un funzionale lineare continuo su \mathcal{S} .

- (e) Sia $n = 1$. Allora la *funzione di Heaviside* H , $H(x) = 1$ per $x > 0$ e $H(x) = 0$ per $x < 0$, induce il funzionale lineare

$$f \xrightarrow{H} \int_0^\infty f(x) dx, \quad f \in \mathcal{S}.$$

In tal caso, per $f \in \mathcal{S}'$ e $\varphi \in \mathcal{S}$ risulta

$$(H', \varphi) = -(H, \varphi) = -\int_0^\infty \varphi'(x) dx = \varphi(0) = (\delta, \varphi).$$

Di conseguenza, $H' = \delta$ in \mathcal{S}' .

3 Trasformata di Fourier in \mathcal{S}'

La proprietà rimarchevole della classe delle funzioni generalizzate di crescita lenta consiste nel fatto che l'operazione di trasformazione di Fourier non porta fuori dai limiti di questa classe.

Visto che le funzioni fondamentali appartenenti a \mathcal{S} sono sommabili in \mathbb{R}^n , su queste funzioni è definita l'operazione F di trasformazione di Fourier

$$F[\varphi](\xi) = \int \varphi(x) e^{-i(\xi, x)} dx, \quad \varphi \in \mathcal{S}.$$

In questo caso la funzione $F[\varphi](\xi)$ la quale rappresenta la *trasformata di Fourier* della funzione φ , è limitata e continua in \mathbb{R}^n . La funzione fondamentale φ decresce all'infinito più rapidamente di qualunque potenza positiva di $1/|x|$ e perciò la sua trasformata di Fourier può essere derivata sotto il segno d'integrale un numero di volte arbitrario:

$$D^\alpha F[\varphi](\xi) = \int (-ix)^\alpha \varphi(x) e^{-i(\xi, x)} dx = F[(-ix)^\alpha \varphi](\xi), \quad (\text{D.6})$$

da cui segue che $F[\varphi] \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$. Inoltre, possiede le stesse proprietà ogni derivata $D^\alpha \varphi$ e quindi

$$\begin{aligned} F[D^\beta \varphi](\xi) &= \int (D^\beta \varphi(x)) e^{-i(\xi, x)} dx = (-1)^{|\beta|} \int \varphi(x) D^\beta (e^{-i(\xi, x)}) dx \\ &= (-1)^{|\beta|} (-i\xi)^\beta F[\varphi](\xi) = (i\xi)^\beta F[\varphi](\xi). \end{aligned} \quad (\text{D.7})$$

Infine, dalle formule (D.6) e (D.7) si ottiene

$$\xi^\beta D^\alpha F[\varphi](\xi) = \xi^\beta F[(-ix)^\alpha \varphi](\xi) = (-i)^{|\alpha|+|\beta|} F[D^\beta(x^\alpha \varphi)](\xi). \quad (\text{D.8})$$

Dall'uguaglianza (D.8) segue che per tutti gli α, β i valori di $\xi^\beta D^\alpha F[\varphi](\xi)$ sono uniformemente limitati rispetto a $\xi \in \mathbb{R}^n$:

$$|\xi^\beta D^\alpha F[\varphi](\xi)| \leq \int |D^\beta(x^\alpha \varphi)| dx. \quad (\text{D.9})$$

Ciò vuol dire che $F[\varphi] \in \mathcal{S}$. Dunque, la trasformata di Fourier trasforma lo spazio \mathcal{S} in se stesso.

Visto che la trasformata di Fourier $F[\varphi]$ di una funzione φ appartenente a \mathcal{S} è una funzione sommabile e continuamente derivabile su \mathbb{R}^n , allora, siccome $\varphi \in L^2(\mathbb{R}^n)$, la funzione φ è espressa in termini della sua trasformata di Fourier $F[\varphi]$ mediante l'operazione di trasformazione inversa di Fourier F^{-1} :

$$\varphi = F^{-1}[F[\varphi]] = F[F^{-1}[\varphi]], \quad (\text{D.10})$$

dove

$$\begin{aligned} F^{-1}[\psi](x) &= \frac{1}{(2\pi)^n} \int \psi(\xi) e^{i(\xi, x)} d\xi = \frac{1}{(2\pi)^n} F[\psi](-x) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^n} \int \psi(-\xi) e^{-i(\xi, x)} d\xi = \frac{1}{(2\pi)^n} F[\psi(-\xi)](x). \end{aligned} \quad (\text{D.11})$$

Dalle formule (D.10) e (D.11) deriva che ogni funzione φ appartenente a \mathcal{S} è la trasformata di Fourier della funzione $\psi = F^{-1}[\varphi]$ appartenente a \mathcal{S} , con $\varphi = F[\psi]$, e se $F[\varphi] = 0$, anche $\varphi = 0$.⁶ Ciò vuol dire che la trasformazione di Fourier F trasforma \mathcal{S} in \mathcal{S} ed inoltre in modo univoco.

Lemma D.4 *La trasformazione di Fourier F è continua da \mathcal{S} in \mathcal{S} .*

Dimostrazione. Supponiamo che $\varphi_k \rightarrow 0$ per $k \rightarrow +\infty$ in \mathcal{S} . Allora, applicando la (D.9) alle funzioni φ_k , si ottiene per tutti gli α e β

$$\begin{aligned} |\xi^\beta D^\alpha F[\varphi_k](\xi)| &\leq \int |D^\beta(x^\alpha \varphi_k)| dx \\ &\leq \sup_{x \in \mathbb{R}^n} |D^\beta(x^\alpha \varphi_k)| (1 + |x|)^{n+1} \int \frac{dy}{(1 + |y|)^{n+1}}, \end{aligned}$$

da cui segue che

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \sup_{\xi \in \mathbb{R}^n} |\xi^\beta D^\alpha F[\varphi_k](\xi)| = 0,$$

cioè $F[\varphi_k] \rightarrow 0$ per $k \rightarrow \infty$ in \mathcal{S} . Il lemma è dimostrato. \square

⁶Se $f \in L^1(\mathbb{R}^n)$ e $F[f] = 0$, allora $f = 0$ quasi ovunque. Per mancanza di una descrizione della classe delle trasformate di Fourier delle funzioni in $L^1(\mathbb{R}^n)$, questa proprietà non si dimostra tanto facilmente.

La trasformazione inversa di Fourier F^{-1} possiede proprietà analoghe.

Assumiamo l'uguaglianza (D.1) come definizione di trasformata di Fourier $F[f]$ di qualunque funzione generalizzata di crescita lenta f :

$$(F[f], \varphi) = (f, F[\varphi]), \quad f \in \mathcal{S}', \varphi \in \mathcal{S}. \quad (\text{D.12})$$

Verifichiamo che il secondo membro di quest'uguaglianza definisce un funzionale lineare continuo su \mathcal{S} , cioè che $F[f] \in \mathcal{S}'$. Infatti, visto che $F[\varphi] \in \mathcal{S}$ per tutte le $\varphi \in \mathcal{S}$, $\varphi \mapsto (f, F[\varphi])$ è un funzionale (evidentemente, lineare) su \mathcal{S} . Supponiamo che $\varphi_k \rightarrow 0$ per $k \rightarrow \infty$ in \mathcal{S} . Per la Proposizione D.1, $F[\varphi_k] \rightarrow 0$ per $k \rightarrow \infty$ in \mathcal{S} e quindi, in virtù del fatto che f appartiene a \mathcal{S}' , si ha $(f, F[\varphi_k]) \rightarrow 0$ per $k \rightarrow \infty$, di modo che il funzionale $\varphi \mapsto (f, F[\varphi])$ è continuo su \mathcal{S} . Dunque, l'operazione di trasformazione di Fourier F porta lo spazio \mathcal{S} in \mathcal{S}' .

Inoltre, F è un'operazione lineare e continua da \mathcal{S}' in \mathcal{S}' . La linearità di F è evidente. Dimostriamo la sua continuità. Supponiamo che $f_k \rightarrow 0$ per $k \rightarrow \infty$ in \mathcal{S}' . In questo caso, in base alla (D.12), si ottiene per tutte le $\varphi \in \mathcal{S}$

$$(F[f_k], \varphi) = (f_k, F[\varphi]) \rightarrow 0, \quad k \rightarrow \infty.$$

Ciò significa che $F[f_k] \rightarrow 0$ per $k \rightarrow \infty$ in \mathcal{S}' , cioè l'operazione F è continua da \mathcal{S}' in \mathcal{S}' .

Introduciamo in \mathcal{S}' ancora un'operazione di trasformazione di Fourier che denotiamo con F^{-1} :

$$F^{-1}[f] = \frac{1}{(2\pi)^n} F[f(-x)], \quad f \in \mathcal{S}'. \quad (\text{D.13})$$

Dimostriamo che l'operazione F^{-1} è un'operazione inversa di F , cioè

$$F^{-1}[F[f]] = f, \quad F[F^{-1}[f]] = f, \quad f \in \mathcal{S}'. \quad (\text{D.14})$$

Infatti, dalle (D.10)-(D.13) per tutte le $\varphi \in \mathcal{S}$, si ottengono le uguaglianze

$$\begin{aligned} (F^{-1}[F[f]], \varphi) &= \frac{1}{(2\pi)^n} (F[F[f]](-\xi), \varphi) = \frac{1}{(2\pi)^n} (F[f](-\xi), F[\varphi]) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^n} (F[f], F[\varphi](-\xi)) = (F[f], F^{-1}[\varphi]) = (f, F[F^{-1}[\varphi]]) \\ &= (f, \varphi) = (f, F^{-1}[F[\varphi]]) = (F^{-1}[f], F[\varphi]) = (F[F^{-1}[f]], \varphi), \end{aligned}$$

dove abbiamo utilizzato le corrispondenti proprietà in \mathcal{S} al sesto ed al settimo passaggio.⁷ Ora seguono le formule (D.14).

⁷Si noti che $\mathcal{S} \subseteq L^2(\mathbb{R}^n)$.

Dalle formule (D.14) deriva che ogni funzione generalizzata f appartenente a \mathcal{S}' è la trasformata di Fourier della funzione generalizzata $g = F^{-1}[f]$ appartenente a \mathcal{S}' , con $f = F[g]$, e se $F[f] = 0$, si ha anche $f = 0$. Abbiamo, quindi, dimostrato che le trasformazioni di Fourier F e F^{-1} trasformano \mathcal{S}' in \mathcal{S}' in modo biunivoco e continuo.

Supponiamo che $f = f(x, y) \in \mathcal{S}'(\mathbb{R}^{n+m})$ dove $x \in \mathbb{R}^n$ ed $y \in \mathbb{R}^m$. Introduciamo la trasformata di Fourier $F_x[f]$ rispetto alle variabili $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, ponendo per qualunque $\varphi = \varphi(x, y) \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^{n+m})$

$$(F_x[f], \varphi) = (f, F_\xi[\varphi]). \quad (\text{D.15})$$

Come nella Proposizione D.1, si stabilisce che

$$F_\xi[\varphi](x, y) = \int \varphi(\xi, y) e^{-i(\xi, x)} d\xi \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^{n+m})$$

e l'operazione $F_\xi[\varphi]$ è continua da $\mathcal{S}(\mathbb{R}^{n+m})$ in $\mathcal{S}(\mathbb{R}^{n+m})$, di modo che la formula (D.15) definisce realmente una funzione generalizzata $F_x[f](\xi, y)$ appartenente a $\mathcal{S}'(\mathbb{R}^{n+m})$.

Esempio. Dimostriamo che

$$F[\delta(x - x_0)] = e^{-i(\xi, x_0)}. \quad (\text{D.16})$$

Infatti,

$$\begin{aligned} (F[\delta(x - x_0)], \varphi) &= (\delta(x - x_0), F[\varphi]) = F[\varphi](x_0) \\ &= \int \varphi(\xi) e^{-i(\xi, x_0)} d\xi = (e^{-i(\xi, x_0)}, \varphi), \quad \varphi \in \mathcal{S}. \end{aligned}$$

Ponendo nella (D.16) $x_0 = 0$, si ottiene

$$F[\delta] = 1, \quad (\text{D.17})$$

da cui

$$\delta = F^{-1}[1] = \frac{1}{(2\pi)^n} F[1],$$

di modo che

$$F[1] = (2\pi)^n \delta(\xi). \quad (\text{D.18})$$

3.1 Proprietà della trasformazione di Fourier

(a) **Derivazione della trasformata di Fourier.** Se $f \in \mathcal{S}'$, si ha

$$D^\alpha F[f] = F[(-ix)^\alpha f]. \quad (\text{D.19})$$

Infatti, utilizzando la (D.7), si ottiene per tutte le $\varphi \in \mathcal{S}$

$$\begin{aligned} (D^\alpha F[f], \varphi) &= (-1)^{|\alpha|} (F[f], D^\alpha \varphi) = (-1)^{|\alpha|} (f, F[D^\alpha \varphi]) \\ &= (-1)^{|\alpha|} (f, (ix)^\alpha F[\varphi]) = ((-ix)^\alpha f, F[\varphi]) = (F[(-ix)^\alpha f], \varphi), \end{aligned}$$

da cui segue la formula (D.19).

In particolare, ponendo nella (D.19) $f = 1$ ed utilizzando la formula (D.18), abbiamo

$$F[x^\alpha](\xi) = i^{|\alpha|} D^\alpha F[1](\xi) = (2\pi)^n i^{|\alpha|} D^\alpha \delta(\xi). \quad (\text{D.20})$$

(b) **Trasformata di Fourier della derivata.** Se $f \in \mathcal{S}'$, si ha

$$F[D^\beta f] = (i\xi)^\beta F[f]. \quad (\text{D.21})$$

Infatti, utilizzando la formula (D.6), si ottiene per tutte le $\varphi \in \mathcal{S}$

$$\begin{aligned} (F[D^\beta f], \varphi) &= (D^\beta f, F[\varphi]) = (-1)^{|\beta|} (f, D^\beta F[\varphi]) \\ &= (-1)^{|\beta|} (f, F[(-i\xi)^\beta \varphi]) = (-1)^{|\beta|} (F[f], (-i\xi)^\beta \varphi) = ((i\xi)^\beta F[f], \varphi), \end{aligned}$$

da cui segue la formula (D.21).

(c) **Trasformata di Fourier di una traslazione.** Se $f \in \mathcal{S}'$, si ha

$$F[f(x - x_0)] = e^{-i(x_0, x)} F[f]. \quad (\text{D.22})$$

Infatti, abbiamo per tutte le $\varphi \in \mathcal{S}$

$$\begin{aligned} (F[f(x - x_0)], \varphi) &= (f(x - x_0), F[\varphi]) = (f, F[\varphi](x + x_0)) \\ &= (f, F[\varphi e^{-i(x_0, \xi)}]) = (F[f], e^{-i(x_0, \xi)} \varphi) = (e^{-i(x_0, \xi)} F[f], \varphi), \end{aligned}$$

da cui segue la formula (D.22).

(d) **Traslazione della trasformata di Fourier.** Se $f \in \mathcal{S}'$, si ha

$$F[f](\xi + \xi_0) = F[e^{i(\xi_0, x)} f](\xi). \quad (\text{D.23})$$

Infatti, utilizzando la formula (D.22), si ottiene per tutte le $\varphi \in \mathcal{S}$

$$\begin{aligned} (F[f](\xi + \xi_0), \varphi) &= (F[f], \varphi(\xi - \xi_0)) = (f, F[\varphi(\xi - \xi_0)]) \\ &= (f, e^{i(\xi_0, x)} F[\varphi]) = (e^{i(\xi_0, x)} f, F[\varphi]) = (F[e^{i(\xi_0, x)} f], \varphi), \end{aligned}$$

da cui segue la formula (D.23).

(e) **Trasformata di Fourier di similitudine (con riflessione).** Se $f \in \mathcal{S}'$, per tutti i valori reali di $c \neq 0$ si ha

$$F[f(cx)](\xi) = \frac{1}{|c|^n} F[f] \left(\frac{\xi}{c} \right), \quad (\text{D.24})$$

poichè per tutte le $\varphi \in \mathcal{S}$ abbiamo

$$\begin{aligned} (F[f(cx)], \varphi) &= (f(cx), F[\varphi]) = \frac{1}{|c|^n} \left(f, F[\varphi] \left(\frac{x}{c} \right) \right) \\ &= \frac{1}{|c|^n} \left(f, \int \varphi(\xi) e^{-i(\frac{x}{c}, \xi)} d\xi \right) = \left(f, \int \varphi(c\xi') e^{-i(x, \xi')} d\xi' \right) = (f, F[\varphi(c\xi)]) \\ &= (F[f], \varphi(c\xi)) = \frac{1}{|c|^n} \left(F[f] \left(\frac{\xi}{c} \right), \varphi \right). \end{aligned}$$

Appendice E

INTEGRAZIONE SECONDO LEBESGUE

L'integrale di Riemann non basta per studiare la fisica matematica, grazie alle sue pessime proprietà di convergenza. D'altra parte, l'integrale di Lebesgue copre tutte le applicazioni di fisica matematica ma non è facile da introdurre in poco tempo. Fortunatamente lo studio degli insiemi di Borel e delle funzioni misurabili secondo Borel ci permette a generalizzare il concetto di integrale abbastanza ma a farlo in tempi ragionevoli.

1 Insiemi di Borel

Un sottoinsieme di \mathbb{R}^n è detto *insieme di Borel* se appartiene alla famiglia di sottoinsiemi di \mathbb{R}^n più piccola ottenuta dagli insiemi aperti applicando le seguenti operazioni: 1) unione finita o numerabile, 2) intersezione finita o numerabile, e 3) complementazione [cioè l'operazione $B \mapsto \mathbb{R}^n \setminus B$]. È chiaro che tutti i sottoinsiemi aperti e chiusi di \mathbb{R}^n sono di Borel. Per $n = 1$ gli intervalli $[a, b) = \bigcap_{n=1}^{\infty} (a - \frac{1}{n}, b)$ e $(a, b] = \bigcap_{n=1}^{\infty} (a, b + \frac{1}{n})$ sono di Borel.

Siano $a, b \in \mathbb{R}^n$, dove $a = (a_1, \dots, a_n)$, $b = (b_1, \dots, b_n)$, $a_1 < b_1, \dots, a_n < b_n$. Allora

$$m([a, b]) = (b_1 - a_1) \dots (b_n - a_n)$$

è la *misura* del pluriintervallo $[a, b)$. Per un'unione finita o numerabile E di pluriintervalli due a due disgiunti si definisce la sua misura $m(E)$ come la somma delle misure dei pluriintervalli, possibilmente con $m(E) = +\infty$. Allora $m([a, \infty)) = +\infty$, dove $[a, \infty) = \{x \in \mathbb{R}^n : x_1 > a_1, \dots, x_n > a_n\}$. Siccome tutte le palle $B_\varepsilon(a) = \{x \in \mathbb{R}^n : \|x - a\|_2 < \varepsilon\}$ sono unioni numerabili due a due disgiunti di pluriintervalli, anche la misura di $B_\varepsilon(a)$ si può calcolare.

Osservando ora che tutti gli aperti sono unioni finite o numerabili di palle, si può estendere la misura a qualsiasi sottoinsieme aperto di \mathbb{R}^n .

Sia Σ la cosiddetta σ -algebra degli insiemi di Borel in \mathbb{R}^n , dove σ -algebra vuol dire una famiglia di sottoinsiemi chiusa rispetta all'unione finita e numerabile, all'intersezione finita e numerabile e alla complementazione che contiene l'insieme vuoto e \mathbb{R}^n stesso, insieme con la misura di Borel. Questa misura ha le seguenti proprietà:

1. $m(\emptyset) = 0$ e $m(\mathbb{R}^n) = +\infty$,
2. Se $\{B_n\}_{n=1}^{\infty}$ è una famiglia numerabile di insiemi di Borel due a due disgiunti, allora $\cup_{n=1}^{\infty} B_n$ è un insieme di Borel e

$$m\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} B_n\right) = \sum_{n=1}^{\infty} m(B_n).$$

Di conseguenza, se $\{C_n\}_{n=1}^{\infty}$ è una successione crescente di insiemi di Borel, allora

$$m\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} C_n\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} m(C_n).$$

Purtroppo la σ -algebra degli insiemi di Borel ha la proprietà che non tutti i sottoinsiemi degli insiemi di Borel di misura zero sono di Borel. Per questo motivo la σ -algebra di Borel viene estesa a quella di Lebesgue: Un sottoinsieme A di \mathbb{R}^n si dice *misurabile (secondo Lebesgue)* se esiste un insieme di Borel B tale che la cosiddetta differenza simmetrica $A \Delta B \stackrel{\text{def}}{=} (A \setminus B) \cup (B \setminus A)$ è un sottoinsieme di un insieme di Borel di misura zero. In tal caso si definisce come la misura $m(A)$ quella dell'insieme di Borel B . Si può dimostrare che gli insiemi misurabili secondo Lebesgue costituiscono una σ -algebra con le seguenti proprietà:

1. $m(\emptyset) = 0$ e $m(\mathbb{R}^n) = +\infty$,
2. Se $\{B_n\}_{n=1}^{\infty}$ è una famiglia numerabile di insiemi misurabili due a due disgiunti, allora $\cup_{n=1}^{\infty} B_n$ è un insieme misurabile e

$$m\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} B_n\right) = \sum_{n=1}^{\infty} m(B_n).$$

Di conseguenza, se $\{C_n\}_{n=1}^{\infty}$ è una successione crescente di insiemi misurabili, allora

$$m\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} C_n\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} m(C_n).$$

È molto difficile individuare un sottoinsieme di \mathbb{R}^n che non è misurabile. Dall'assioma di scelta segue la sua esistenza.¹ Purtroppo esistono altri assiomi della teoria degli insiemi che conducono ad una situazione in cui ogni sottoinsieme di \mathbb{R}^n è misurabile.

2 Integrale di Lebesgue

Si dice *funzione semplice* una funzione complessa φ definita in \mathbb{R}^n che ha soltanto un numero finito di valori e per cui tutti gli insiemi $\{x \in \mathbb{R}^n : \varphi(x) = c\}$ sono misurabili di misura finita. Essendo $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ i valori diversi della funzione semplici φ , si ha

$$\varphi(x) = \sum_{j=1}^m \lambda_j \chi_{E_j} = \begin{cases} \lambda_j, & x \in E_j, \\ 0, & x \in \mathbb{R}^n \setminus \cup_{j=1}^m E_j, \end{cases}$$

dove E_1, \dots, E_m sono insiemi misurabili di misura finita disgiunti due a due e χ_E è la funzione caratteristica di E (cioè, $\chi_E(x) = 1$ se $x \in E$, e $\chi_E(x) = 0$ se $x \notin E$). Come *integrale di Lebesgue* si definisce

$$\int \varphi(x) dx \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{j=1}^m \lambda_j m(E_j).$$

Una funzione $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{C}$ si dice misurabile se per ogni insieme di Borel E in \mathbb{C} l'immagine inversa

$$f^{-1}(E) = \{x \in \mathbb{R}^n : f(x) \in E\}$$

è misurabile. In particolare, le funzioni continue $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{C}$ sono misurabili.

Le funzioni misurabili hanno le seguenti proprietà:

1. Se $f, g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{C}$ sono misurabili, allora $f + g$ e $f - g$ sono misurabili.
2. Se $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{C}$ è misurabile e $\lambda \in \mathbb{C}$, allora λf è misurabile.

¹Dim: La relazione $x \sim y \iff x - y \in \mathbb{Q}$ è una relazione di equivalenza in $[0, 1)$ che suddivide $[0, 1)$ in classi di equivalenza. Applicando l'Assioma di Scelta, sia E un sottoinsieme di $[0, 1)$ che contiene esattamente un elemento di ogni classe di equivalenza. Allora, per ogni $q \in [0, 1) \cap \mathbb{Q}$, $E_q \stackrel{\text{def}}{=} [(q + E) \cap [0, 1)] \cup [(q - 1 + E) \cap [0, 1)]$ è un sottoinsieme di $[0, 1)$ che contiene esattamente un elemento di ogni classe di equivalenza. Se E fosse misurabile, lo sarebbe anche E_q per ogni $q \in [0, 1) \cap \mathbb{Q}$. In tal caso la misura di E_q non dipenderebbe da q , mentre $\cup_{q \in [0, 1) \cap \mathbb{Q}} E_q = [0, 1)$. Quindi sia l'ipotesi $m(E) = 0$ che quella $m(E) > 0$ condurrebbe alla contraddizione che $m([0, 1)) \in \{0, +\infty\}$. Di conseguenza, E non può essere misurabile.

3. Se $f, g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{C}$ sono misurabili, allora fg è misurabile.
4. Se $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{C}$ e $g : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ sono misurabili, allora il prodotto di composizione $g \circ f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{C}$ è misurabile.
5. Se $f, g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ sono misurabili, allora $\max(f, g)$, $\min(f, g)$, $|f| = \max(f, -f)$, $f_+ = \max(f, 0)$ e $f_- = \max(-f, 0)$ sono misurabili.
6. Se f_1, f_2, \dots sono misurabili e $f = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n$, allora f è misurabile.

Definiamo ora l'integrale di Lebesgue per le funzioni misurabili non negative. Sia $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^+$ misurabile e non negativa. Allora esiste una successione crescente di funzioni semplici non negative $\{f_n\}_{n=1}^\infty$ tali che $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ per ogni $x \in \mathbb{R}^n$ (tranne in un sottoinsieme di misura zero). In tal caso la successione degli integrali di Lebesgue $\int f_n(x) dx$ è crescente e il suo limite (che potrebbe essere uguale a $+\infty$) si definisce come l'integrale di Lebesgue della f :

$$\int f(x) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n(x) dx.$$

Nel seguente teorema i valori degli integrali possono essere uguali a $+\infty$.

Teorema E.1 (Beppo-Levi) *Sia $\{f_n\}_{n=1}^\infty$ una successione crescente di funzioni misurabili non negative. Sia $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ per $x \in \mathbb{R}^n$. Allora*

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n(x) dx = \int f(x) dx.$$

Passiamo ora all'integrazione delle funzioni a valori reali. Sia $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ misurabile. Poniamo $f_\pm = \max(\pm f, 0)$. Allora $f_\pm : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^+$ sono misurabili e non negative e $f_+ - f_- = f$. Poniamo ora

$$\int f(x) dx \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} \int f_+(x) dx - \int f_-(x) dx & \text{se ambedue gli integrali sono finiti,} \\ +\infty & \text{se } \int f_+(x) dx = +\infty \text{ e } \int f_-(x) dx < +\infty, \\ -\infty & \text{se } \int f_+(x) dx < +\infty \text{ e } \int f_-(x) dx = +\infty, \\ \text{non esistente} & \text{se } \int f_+(x) dx = \int f_-(x) dx = +\infty. \end{cases}$$

Inoltre,

$$\int |f(x)| dx$$

$$\stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} \int f_+(x) dx + \int f_-(x) dx & \text{se ambedue gli integrali sono finiti,} \\ +\infty & \text{se } \int f_+(x) dx = +\infty \text{ e } \int f_-(x) dx < +\infty, \\ +\infty & \text{se } \int f_+(x) dx < +\infty \text{ e } \int f_-(x) dx = +\infty, \\ \text{non definito} & \text{se } \int f_+(x) dx = \int f_-(x) dx = +\infty. \end{cases}$$

Una funzione misurabile $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ si dice *sommabile* se ambedue gli integrali $\int f_{\pm}(x) dx$ sono finiti.

Per definire gli integrali delle funzioni misurabili $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{C}$, si osservi prima che $\text{Re } f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ e $\text{Im } f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ sono misurabili. In tal caso, se sono definiti ambedue gli integrali $\int \text{Re } f(x) dx$ e $\int \text{Im } f(x) dx$, allora

$$\int f(x) dx \stackrel{\text{def}}{=} \int \text{Re } f(x) dx + i \int \text{Im } f(x) dx.$$

Una funzione misurabile $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{C}$ si dice *sommabile* se è finito l'integrale della funzione $|f| = \sqrt{(\text{Re } f)^2 + (\text{Im } f)^2}$.

L'integrale di Lebesgue ha le seguenti proprietà:

1. $\int (f(x) \pm g(x)) dx = \int f(x) dx \pm \int g(x) dx.$
2. $\int cf(x) dx = c \int f(x) dx,$
3. $|\int f(x) dx| \leq \int |f(x)| dx.$
4. Se $\{x \in \mathbb{R}^n : f(x) \neq g(x)\}$ ha misura zero, allora $\int f(x) dx = \int g(x) dx.$

L'ultima proprietà è di estrema importanza per capire l'integrale di Lebesgue: Il suo valore non si cambia se la funzione viene modificata su un insieme di misura zero. Due funzione f, g come nella proprietà 4 si dicono *quasi uguali*. Oppure: Si dice che $f(x) = g(x)$ *quasi ovunque*.

Infine, se E è un sottoinsieme misurabile di \mathbb{R}^n , una funzione $f : E \rightarrow \mathbb{C}$ si dice misurabile se la sua estensione $\tilde{f} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{C}$ definita da

$$\tilde{f}(x) = \begin{cases} f(x), & x \in E, \\ 0, & x \in \mathbb{R}^n \setminus E, \end{cases}$$

è misurabile. In tal caso

$$\int_E f(x) dx \stackrel{\text{def}}{=} \int \tilde{f}(x) \chi_E(x) dx,$$

dove $\chi_E(x) = 1$ per $x \in E$ e $\chi_E(x) = 0$ per $x \in \mathbb{R}^n \setminus E$.

Discutiamo ora il seguente esempio illustrativo.

Esempio E.2 Sia $f : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ definita da

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\sin(x)}{x}, & x > 0, \\ 1, & x = 0. \end{cases}$$

Allora la f è continua per $x \geq 0$ e quindi misurabile. Vale l'integrale di Riemann generalizzata

$$\int_0^\infty \frac{\sin(x)}{x} dx \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{N \rightarrow +\infty} \int_0^N \frac{\sin(x)}{x} dx = \frac{\pi}{2}.$$

Purtroppo questo integrale non è un integrale di Lebesgue. Infatti,

$$f_+(x) = \begin{cases} \frac{\sin(x)}{x}, & 2(n-1)\pi \leq x \leq (2n-1)\pi, \\ 0, & \text{altrove;} \end{cases}$$

$$f_-(x) = \begin{cases} -\frac{\sin(x)}{x}, & (2n-1)\pi \leq x \leq 2n\pi, \\ 0, & \text{altrove,} \end{cases}$$

dove $n = 1, 2, 3, \dots$. Osservando che

$$\int_{2(n-1)\pi}^{(2n-1)\pi} \sin(x) dx = - \int_{(2n-1)\pi}^{2n\pi} \sin(x) dx = 1,$$

si vede facilmente che

$$\int f_+(x) dx \geq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)\pi} = +\infty,$$

$$\int f_-(x) dx \geq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n\pi} = +\infty.$$

Quindi $\int f(x) dx$ non esiste nel senso di Lebesgue.

3 Alcuni Teoremi Importanti

Il seguente risultato riguarda lo scambio tra limite e integrazione.

Teorema E.3 (della convergenza dominata, di Lebesgue) Sia $\{f_n\}_{n=1}^\infty$ una successione di funzioni misurabili tali che

a. $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x)$ per quasi ogni x ,

b. per $n = 1, 2, 3, \dots$ si ha $|f_n(x)| \leq g(x)$ per quasi ogni x , dove g è sommabile.

Allora

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n(x) dx = \int f(x) dx.$$

La seconda condizione è assolutamente necessaria.

Esempio E.4 Sia $\phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ una funzione continua e non negativa tale che

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \phi(x) = 0, \quad \int_{-\infty}^{\infty} \phi(x) dx = 1.$$

Ponendo $f_n(x) = \phi(x - n)$, si vede facilmente che

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \underbrace{\int f_n(x) dx}_{\text{sempre uguale ad 1}} = 1, \quad \int \underbrace{\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)}_{\text{uguale a 0 q.o.}} dx = 0.$$

Dunque non è consentita l'applicazione del Teorema della Convergenza Dominata.

Esempio E.5 Sia $\phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$ una funzione continua e non negativa tale che

$$\phi(0) > 0, \quad \lim_{x \rightarrow \pm\infty} x\phi(x) = 0, \quad \int_{-\infty}^{\infty} \phi(x) dx = 1.$$

Ponendo $f_n(x) = n\phi(nx)$, si vede subito che $f_n(x) \rightarrow 0$ per $x \neq 0$ e $f_n(0) \rightarrow +\infty$. Quindi

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \underbrace{\int f_n(x) dx}_{\text{sempre uguale ad 1}} = 1, \quad \int \underbrace{\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)}_{\text{uguale a 0 q.o.}} dx = 0.$$

Dunque non è consentita l'applicazione del Teorema della Convergenza Dominata.

Il Teorema della Convergenza Dominata è fondamentale e ha molti corollari di importanza. Per esempio, sia $f(\cdot, \xi) : \mathbb{R}^n \times \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ una funzione sommabile che dipende in modo continuo dal parametro $\xi \in \Omega$. Allora $\int f(x, \xi) dx$ dipende in modo continuo da $\xi \in \Omega$ **se esiste una funzione sommabile** $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{C}$ **tale che** $|f(x, \xi)| \leq g(x)$ per quasi ogni $x \in \mathbb{R}^n$ e ogni $\xi \in \Omega$. Infatti, scegliendo $\eta \in \Omega$, basterebbe considerare una successione in $\{\eta_n\}_{n=1}^{\infty}$ in Ω convergente ad η e la successione di funzioni $f_n(x) = f(x, \eta_n)$ per $n = 1, 2, 3, \dots$ per dimostrare il corollario.

L'ultimo risultato riguarda il cambio dell'ordine di integrazione.

Teorema E.6 (Fubini) Sia $f : \mathbb{R}^{n+m} \rightarrow \mathbb{C}$, scritta come funzione di $z = (x, y)$ con $x \in \mathbb{R}^n$, $y \in \mathbb{R}^m$ e $z \in \mathbb{R}^{n+m}$, misurabile e non negativa, oppure sommabile. Allora

$$\int_{\mathbb{R}^{n+m}} f(z) dz = \int_{\mathbb{R}^n} \left(\int_{\mathbb{R}^m} f(x, y) dy \right) dx = \int_{\mathbb{R}^m} \left(\int_{\mathbb{R}^n} f(x, y) dx \right) dy. \quad (\text{E.1})$$

In particolare, la (D.1) vale nei seguenti casi:

1. almeno uno degli integrali $\int \int |f(x, y)| dy dx$ e $\int \int |f(x, y)| dx dy$ è finito.
2. La f è non negativa quasi ovunque.

Appendice F

FUNZIONI ANALITICHE

Nel presente corso faremo uso di alcune proprietà (da discutere in questo paragrafo) delle funzioni analitiche.

Sia $f : G \rightarrow \mathbb{C}$, dove G è un aperto in \mathbb{C} . Allora f si dice *analitica* se è derivabile rispetto alla variabile complessa $z \in G$ e la sua derivata f' è continua. In altre parole, per ogni $w \in G$ esiste un numero complesso $f'(w)$ tale che

$$f(z) = f(w) + (z - w)[f'(w) + \varepsilon(z)],$$

dove $|\varepsilon(z)| \rightarrow 0$ se $|z - w| \rightarrow 0$ per $z \in G$; inoltre, la funzione $f' : G \rightarrow \mathbb{C}$ è continua. Una funzione analitica è continua. Inoltre valgono le regole per l'analiticità della somma, del prodotto e della composta di due funzioni analitiche analoghe quelle che valgono per le funzioni derivabili in una variabile reale.

Sia $f : G \rightarrow \mathbb{C}$ una funzione definita su un aperto G in \mathbb{C} che è rappresentabile come la somma di una serie di potenze avente raggio di convergenza positiva in ogni punto $w \in G$. Cioè, per ogni $w \in G$ esistono coefficienti $\{a_n(w)\}_{n=0}^{\infty}$ ed un numero positivo $R(w)$ tali che

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(w)(z - w)^n, \quad |z - w| < R(w). \quad (\text{F.1})$$

In tal caso f è analitica indefinitamente derivabile:

$$f^{(k)}(z) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+k)(n+k-1) \cdots (n+1) a_{n+k}(w)(z - w)^n, \quad |z - w| < R(z_0),$$

mentre $a_n(w) = f^{(n)}(w)/(n!)$. D'altra parte, una funzione analitica $f : G \rightarrow \mathbb{C}$ si può scrivere nella forma (F.1) per un opportuno $R(w) > 0$ per ogni $w \in G$.

Sia $f : G \rightarrow \mathbb{C}$ una funzione analitica su un aperto G in \mathbb{C} . All'aperto $G \subset \mathbb{C}$ facciamo corrispondere un aperto $\tilde{G} \subset \mathbb{R}^2$ tale che $(x, y) \in \tilde{G}$ se e solo se $x + iy \in G$. Ora definiamo $u, v : \tilde{G} \rightarrow \mathbb{R}$ dalla formula

$$f(x + iy) = u(x, y) + i v(x, y), \quad (x, y) \in \tilde{G}.$$

Allora $u, v : \tilde{G} \rightarrow \mathbb{R}$ sono differenziabili (nel senso del corso di Analisi Matematica III), esiste un numero infinito di derivate parziali successive di u e v rispetto ad x ed y , e valgono le cosiddette *equazioni di Cauchy-Riemann*¹

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x}. \quad (\text{F.2})$$

In tal caso, abbiamo

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} = 0, \quad \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = -\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} = 0. \quad (\text{F.3})$$

Usando l'uguaglianza (simbolica) $(u + iv)(dx + i dy) = (u dx - v dy) + i(v dx + u dy)$, si vede facilmente (dalla (F.2)) che le forme differenziali $u dx - v dy$ e $v dx + u dy$ sono ambedue chiuse. Quindi, se \tilde{G} (oppure G) è semplicemente connesso, queste due forme differenziali sono esatte. Di conseguenza, se G è semplicemente connesso e γ è una curva chiusa e rettificabile (cioè, di lunghezza ben definita e finita) in G , allora

$$\int_{\tilde{\gamma}} (u dx - v dy) = 0, \quad \int_{\tilde{\gamma}} (v dx + u dy) = 0,$$

dove $\tilde{\gamma} = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x + iy \in \gamma\}$. Ciò implica che

$$\int_{\gamma} f(z) dz = \int_{\tilde{\gamma}} (u dx - v dy) + i \int_{\tilde{\gamma}} (v dx + u dy) = 0. \quad (\text{F.4})$$

L'affermazione (F.4) si chiama il *Teorema di Cauchy*. È il risultato più importante della teoria delle funzioni analitiche. Osserviamo che purtroppo il ragionamento seguito non è una dimostrazione esaustiva e quindi completamente rigorosa.

Enunciamo adesso due altri importanti teoremi (collegati al precedente).

Teorema F.1 *Sia $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ una successione di funzioni analitiche sull'aperto G che converga ad una funzione $f : G \rightarrow \mathbb{C}$ uniformemente in $z \in K$ per un qualunque compatto K in G . Allora f è analitica.*

¹Se si specifica il valore della f nel punto $a \in G$, allora $f(z) = 2u(\frac{1}{2}[z + \bar{a}], \frac{1}{2i}[z - \bar{a}]) - \overline{f(a)} = 2iv(\frac{1}{2}[z + \bar{a}], \frac{1}{2i}[z - \bar{a}]) + \overline{f(a)}$ per $z \in G$. Vedi [16].

Teorema F.2 Sia $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ una successione di funzioni analitiche sull'aperto G tale che la serie di funzioni

$$\sum_{n=1}^{\infty} f_n(z)$$

converga uniformemente in $z \in K$ per un qualunque compatto K in G . Allora la sua somma rappresenta una funzione analitica su G .

Discutiamo due risultati semplici ed importanti per le funzioni analitiche.

Teorema F.3 Siano $f, g : G \rightarrow \mathbb{C}$ due funzioni analitiche sull'aperto connesso G tali che $f(z) = g(z)$ per ogni $z \in E$, dove E è un sottoinsieme di G con almeno un punto di accumulazione all'interno di G . Allora $f(z) = g(z)$ per ogni $z \in G$.

In particolare, applicando il Teorema F.3 per $g(z) \equiv 0$, si vede facilmente che una funzione analitica $f \not\equiv 0$ ha un numero finito di zeri oppure i suoi zeri si accumulano sulla frontiera di G .

Adesso enunciamo il fondamentale *Teorema di Liouville*.

Teorema F.4 Sia $f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ una funzione analitica definita sull'intero piano complesso. Allora f è non limitata oppure costante.

La dimostrazione è abbastanza facile. Di seguito ne diamo lo schema qui. Sia $f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ una funzione analitica e sia C_R il cerchio di centro 0 e raggio R in \mathbb{C} con orientamento positivo. Allora $(2\pi i)^{-1} \int_{C_R} (z-w)^{-1} dz = 1$ per $w \in \mathbb{C}$ con $|w| < R$ (lo si controlli!) implica² che

$$f(w) = \frac{1}{2\pi i} \int_{C_R} \frac{f(z)}{z-w} dz, \quad |w| < R.$$

Ciò comporta [perché?] che

$$f'(w) = \frac{1}{2\pi i} \int_{C_R} \frac{f(z)}{(z-w)^2} dz, \quad |w| < R.$$

Di conseguenza, se $|f(z)| \leq M$ per $z \in \mathbb{C}$, risulterebbe

$$|f'(w)| \leq \frac{1}{2\pi} 2\pi R \frac{M}{(R-|w|)^2}, \quad R > |w|,$$

²Si scriva $f(z) = f(w) + [f(z) - f(w)]$ e si osservi che $[f(z) - f(w)]/(z-w)$ è analitica in $z \in \mathbb{C}$. Poi si applichi il Teorema di Cauchy.

e quindi $f'(w) = 0$. Siccome $w \in \mathbb{C}$ è arbitrario, f deve essere una funzione costante. Come corollario si afferma che una funzione analitica $f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ con limite zero per $|z| \rightarrow +\infty$ deve annullarsi in ogni $z \in \mathbb{C}$.

Definiamo ora le funzioni meromorfe e discutiamo le loro singolarità. In primo luogo una funzione analitica $f : G \rightarrow \mathbb{C}$ con $f \not\equiv 0$ ha un numero finito o un'infinità numerabile di zeri. Un numero complesso z_0 si dice *zero di ordine m* per f se $f(z) = (z - z_0)^m g(z)$ per $g : G \rightarrow \mathbb{C}$ una funzione analitica e $g(z_0) \neq 0$. In altri termini, z_0 è uno zero di ordine m se e solo se $f(z_0) = f'(z_0) = \dots = f^{(m-1)}(z_0) = 0$ e $f^{(m)}(z_0) \neq 0$. Se G è un aperto in \mathbb{C} , $w \in G$ e f è analitica su $G \setminus \{w\}$, il punto w si dice *polo di ordine m* se esiste una funzione analitica $g : G \rightarrow \mathbb{C}$ con $g(w) \neq 0$ tale che $f(z) = g(z)/(z - w)^m$ per $z \in G \setminus \{w\}$.

Sia G un aperto in \mathbb{C} . Una funzione f si dice *meromorfa* su G se esiste un sottoinsieme finito oppure numerabile E di G senza punti di accumulazione all'interno di G tale che f sia analitica in $G \setminus E$ ed ogni punto di E sia un polo della f .

Teorema F.5 (Principio dell'argomento) *Sia f una funzione meromorfa nell'aperto G . Sia γ una curva chiusa, semplice e rettificabile in G che non passa per i poli e per gli zeri di f , con un orientamento tale che il sottodominio Ω di G racchiuso da γ si trova alla sinistra di γ . Allora*

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{f'(z)}{f(z)} dz = \sum_{k=1}^n N(z_k) - \sum_{j=1}^m P(p_j),$$

dove z_1, \dots, z_n sono gli zeri in Ω , p_1, \dots, p_m sono i poli in Ω , $N(z_k)$ è l'ordine dello zero z_k e $P(p_j)$ è l'ordine del polo p_j .

Dimostrazione. Posta

$$f(z) = g(z) \frac{\prod_{k=1}^n (z - z_k)^{N(z_k)}}{\prod_{j=1}^m (z - p_j)^{P(p_j)}},$$

dove $g(z)$ è una funzione meromorfa in G che non ha zeri nè poli in Ω , si ha

$$\frac{f'(z)}{f(z)} = \sum_{k=1}^n \frac{N(z_k)}{z - z_k} - \sum_{j=1}^m \frac{P(p_j)}{z - p_j} + \frac{g'(z)}{g(z)},$$

dove $g'(z)/g(z)$ è continua in $\Omega \cup \gamma$ e analitica in Ω . Il teorema segue quindi dal Teorema di Cauchy. \square

Corollario F.6 (Teorema di Rouché) *Siano f, g funzioni meromorfe nell'aperto G . Sia γ una curva chiusa, semplice e rettificabile in G che non passa per i poli e per gli zeri di f e g , con un orientamento tale che il sottodominio Ω di G racchiuso da γ si trova alla sinistra di γ . Se*

$$|f(z) - g(z)| < |g(z)|, \quad z \in \gamma, \quad (\text{F.5})$$

allora

$$Z_f - P_f = Z_g - P_g,$$

dove Z_f e P_f sono il numero degli zeri e dei poli della f in Ω e Z_g e P_g sono il numero degli zeri e dei poli della g in Ω .

Dimostrazione. L'ipotesi (F.5) implica che f/g manda γ nella palla $\{w \in \mathbb{C} : |w - 1| < 1\}$. In questa palla si può definire $\log(w)$ come funzione analitica tale che $\log(w) \rightarrow 0$ se $w \rightarrow 1$. In tal caso, $(\log(f/g))' = (f/g)'/(f/g) = (f'/f) - (g'/g)$. Quindi, utilizzando il Teorema di Cauchy e il Teorema F.5, si ha

$$0 = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \left(\frac{f'(z)}{f(z)} - \frac{g'(z)}{g(z)} \right) dz = (Z_f - P_f) - (Z_g - P_g).$$

□

Usando il Teorema di Rouché si trova facilmente una dimostrazione del Teorema Fondamentale dell'Algebra. Sia $p(z) = z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_n$ un polinomio complesso di grado n e con coefficiente principale 1. Applichiamo il Teorema di Rouché per $f(z) = p(z)$ e $g(z) = z^n$. Siccome esiste $R > 0$ tale che

$$\left| \frac{f(z)}{g(z)} - 1 \right| = \left| 1 + \frac{a_1}{z} + \dots + \frac{a_n}{z^n} \right| < 1, \quad |z| = R,$$

si può applicare il Teorema di Rouché per $\gamma = \{z \in \mathbb{C} : |z| = R\}$ e $\Omega = \{z \in \mathbb{C} : |z| < R\}$. Abbiamo $Z_g = n$ e $P_f = P_g = 0$. Quindi $Z_f = n$; di conseguenza $p(z)$ ha n zeri nel dominio $\Omega = \{z \in \mathbb{C} : |z| < R\}$.

Un'altra dimostrazione si basa sul Teorema di Liouville. Se $p(z)$ è un polinomio in z di grado $n \in \mathbb{N}$ senza zeri complessi, la funzione $f(z) = 1/p(z)$ sarebbe una funzione analitica in tutto il piano complesso tale che $f(z) \rightarrow 0$ se $|z| \rightarrow \infty$. Ciò implica che $f(z) = 0$ per ogni $z \in \mathbb{C}$. Contraddizione. Di conseguenza, $p(z)$ ha almeno uno zero complesso.

Appendice G

APPROSSIMAZIONE DA POLINOMI

In quest'appendice dimostriamo il famoso teorema di Weierstrass sull'approssimazione delle funzioni continue da polinomi. Noi seguiamo il testo di Walter Rudin [12, Teorema 8.24]. La dimostrazione fornita nell'appendice si deve a Bernstein.

Teorema G.1 [Weierstrass] *Se f è una funzione complessa, continua in $[a, b]$, allora esiste una successione di polinomi P_n tale che*

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P_n(x) = f(x)$$

uniformemente in $x \in [a, b]$. Se f è reale, si possono prendere i P_n reali.

Dimostrazione. Senza perdere la generalità supponiamo che $[a, b] = [0, 1]$. Inoltre supponiamo che $f(0) = f(1) = 0$. Perché, se il teorema è dimostrato in questo caso, si consideri

$$g(x) = f(x) - f(0) - x[f(1) - f(0)], \quad 0 \leq x \leq 1.$$

Allora $g(0) = g(1) = 0$ e, se g può essere ottenuto come limite di una successione uniformemente convergente di polinomi, è chiaro che lo stesso vale per f , visto che $f - g$ è un polinomio.

Inoltre, per definizione, poniamo $f(x)$ uguale a zero per x fuori da $[0, 1]$. Allora f è uniformemente continua su tutta la retta reale.

Poniamo

$$Q_n(x) = c_n(1 - x^2)^n, \quad n \in \mathbb{N},$$

dove c_n è scelto in modo tale che

$$\int_{-1}^1 Q_n(x) dx = 1, \quad n \in \mathbb{N}. \quad (\text{G.1})$$

Abbiamo bisogno di alcune informazioni sull'ordine di grandezza dei c_n . Dal momento che

$$\begin{aligned} \int_{-1}^1 (1-x^2)^n dx &= 2 \int_0^1 (1-x^2)^n dx \geq 2 \int_0^{1/\sqrt{n}} (1-x^2)^n dx \\ &\geq 2 \int_0^{1/\sqrt{n}} (1-nx^2) dx = \frac{4}{3\sqrt{n}} > \frac{1}{\sqrt{n}}, \end{aligned}$$

dalla (G.1) segue che

$$c_n < \sqrt{n}. \quad (\text{G.2})$$

Si può facilmente dimostrare la disuguaglianza $(1-x^2)^n \geq 1-nx^2$ che abbiamo usato prima.¹

Per ogni $\delta > 0$, la (G.2) implica

$$Q_n(x) \leq \sqrt{n}(1-\delta^2)^n, \quad \delta \leq |x| \leq 1, \quad (\text{G.3})$$

e quindi $Q_n \rightarrow 0$ uniformemente in $\delta \leq |x| \leq 1$.

Sia ora

$$P_n(x) = \int_{-1}^1 f(x+t)Q_n(t) dt, \quad 0 \leq x \leq 1.$$

Le ipotesi su f ci permettono a dimostrare, con un semplice cambio di variabile, che

$$P_n(x) = \int_{-x}^{1-x} f(x+t)Q_n(t) dt = \int_0^1 f(t)Q_n(t-x) dt,$$

e l'ultimo integrale è chiaramente un polinomio in x . Perciò la $\{P_n\}$ è una successione di polinomi che sono reali se f è reale.

Dato $\varepsilon > 0$, scegliamo $\delta > 0$ tale che per $|y-x| < \delta$ si ha

$$|f(y) - f(x)| < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Sia $M = \sup |f(x)|$. Servendoci dalla (G.1), della (G.3) e della relazione $Q_n(x) \geq 0$, vediamo che, per $0 \leq x \leq 1$,

$$\begin{aligned} |P_n(x) - f(x)| &= \left| \int_{-1}^1 [f(x+t) - f(x)]Q_n(t) dt \right| \leq \int_{-1}^1 |f(x+t) - f(x)|Q_n(t) dt \\ &\leq 2M \int_{-1}^{-\delta} Q_n(t) dt + \frac{\varepsilon}{2} \int_{-\delta}^{\delta} Q_n(t) dt + 2M \int_{\delta}^1 Q_n(t) dt \\ &\leq 4M\sqrt{n}(1-\delta^2)^n + \frac{\varepsilon}{2} < \varepsilon \end{aligned}$$

per n abbastanza grande; il che conclude la dimostrazione del teorema. \square

¹È un corollario della disuguaglianza di Bernouilli.

Bibliografia

- [1] M. Abramowitz and I.A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*, Dover Publ., New York, 1964.
- [2] James Ward Brown and Ruel V. Churchill, *Fourier Series and Boundary Value Problems*, McGraw-Hill, New York, 1959.
- [3] R. Courant and D. Hilbert, *Methoden der Mathematischen Physik*, Vol. I, Springer, Berlin, 1967.
- [4] R. Courant and D. Hilbert, *Methoden der Mathematischen Physik*, Vol. II, Springer, Berlin, 1967.
- [5] J.B. Conway, *Functions of One Complex Variable*, Graduate Texts in Mathematics **11**, Springer, Berlin, 1975.
- [6] M.S.P. Eastham, *The Spectral Theory of Periodic Differential Equations*, Scottish Academic Press, Edinburgh, 1973.
- [7] Enrico Giusti, *Analisi Matematica 1-2* (due volumi), Bollati Boringhieri, Torino, 1989.
- [8] I.S. Gradshteyn and I.M. Ryzhik, *Tables of Integrals, Series, and Products*, Corrected and Enlarged Edition, Academic Press, New York, 1980.
- [9] N.N. Lebedev, *Special Functions and their Applications*, Dover Publ., New York, 1965.
- [10] A.I. Markushevich, *Theory of Functions of a Complex Variable*, Vols. 1-3, Chelsea Publ., New York, 1965.
- [11] R.G. Newton, *Scattering of Waves and Particles*, Springer, New York, 1982; Dover, New York, 2002.
- [12] Walter Rudin, *Principles of Mathematical Analysis*, Third ed., McGraw-Hill, New York, 1976. Esiste la traduzione italiana.

- [13] L. Schwartz, *Théorie des Distributions*, 2 vols., Hermann, Paris, 1966.
- [14] I.N. Sneddon, *Special Functions of Mathematical Physics and Chemistry*, Oliver and Boyd, Edinburgh and London, 1956.
- [15] Murray R. Spiegel, *Vector Analysis*, Schaum's Outline Series, McGraw-Hill, New York 1959 (traduzione italiana: *Analisi Vettoriale*).
- [16] William T. Shaw, *Recovering holomorphic functions from their real or imaginary parts without the Cauchy-Riemann equations*, SIAM Review **46**(4), 717–728 (2004).
- [17] Gabor Szegő, *Orthogonal Polynomials*, American Mathematical Society Colloquium Publications, Vol. **23**, 1939; Reprinted 1991.
- [18] A.N. Tichonov e A.A. Samarskij, *Equazioni della Fisica Matematica*, Ed. Mir, Mosca, 1981.
- [19] D.A. Varshalovich, A.N. Moskalev, and V.K. Khersonskii, *Quantum Theory of Angular Momentum*, World Scientific, Singapore, 1988; also: Nauka, Leningrad, 1975 (in Russian).
- [20] V.S. Vladimirov, *Equazioni della Fisica Matematica*, Mir Italia-URSS, Mosca, 1987; anche Nauka, Mosca, 1981 [in Russo].
- [21] G.N. Watson, *A Treatise on the Theory of Bessel Functions*, Second Ed., Cambridge University Press, London, 1962.
- [22] E.T. Whittaker and G.N. Watson, *A Course of Modern Analysis*, Fourth ed., Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1927.