

# Analisi Matematica

## Soluzioni prova scritta n. 1

Corso di laurea in Fisica, 2020-2021

1 giugno 2021

1. Calcolare al variare di  $a \in \mathbb{R}$

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[4]{1+2x} - \sqrt{e^x} + \sin(ax^2)}{1 - \cos(3x)}.$$

*Soluzione.* Ricordiamo gli sviluppi di Taylor:

$$(1+x)^\alpha = 1 + \alpha x + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2}x^2 + o(x^2)$$

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2} + o(x^2)$$

$$\sin x = x + o(x)$$

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2} + o(x^2)$$

da cui

$$(1+2x)^{\frac{1}{4}} = 1 + \frac{2x}{4} - \frac{3}{32}(2x)^2 + o(x^2)$$

$$e^{\frac{x}{2}} = 1 + \frac{x}{2} + \frac{x^2}{8} + o(x^2)$$

$$\sin(ax^2) = ax^2 + o(x^2)$$

$$1 - \cos(3x) = \frac{(3x)^2}{2} + o(x^2)$$

e quindi per  $x \rightarrow 0$

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt[4]{1+2x} - \sqrt{e^x} + \sin(ax^2)}{1 - \cos(3x)} &= \frac{1 + \frac{x}{2} - \frac{3}{8} \cdot x^2 - 1 - \frac{x}{2} - \frac{x^2}{8} + ax^2 + o(x^2)}{\frac{9}{2} \cdot x^2 + o(x^2)} \\ &= \frac{ax^2 - \frac{1}{2}x^2 + o(x^2)}{\frac{9}{2}x^2 + o(x^2)} \rightarrow \frac{a - \frac{1}{2}}{\frac{9}{2}} = \frac{2a - 1}{9}. \end{aligned}$$

□

2. Al variare di  $x \in \mathbb{R}$  e  $p = 2, 3, 4$  studiare la convergenza della serie

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(n!)^p}{(3n)!} x^n.$$

*Soluzione.* Si tratta di una serie di potenze:

$$\sum_{n=0}^{+\infty} a_n x^n, \quad a_n = \frac{(n!)^p}{(3n)!}.$$

Possiamo determinare il raggio di convergenza tramite il criterio del rapporto:

$$\begin{aligned} \frac{a_{n+1}}{a_n} &= \frac{(n+1)!^p \cdot (3n)!}{(3n+3)! \cdot n!^p} = \frac{(n+1)^p}{(3n+3)(3n+2)(3n+1)} \\ &= \frac{n^p + o(n^p)}{27n^3 + o(n^3)} \rightarrow \begin{cases} +\infty & \text{se } p > 3 \\ \frac{1}{27} & \text{se } p = 3 \\ 0 & \text{se } p < 3. \end{cases} \quad \text{per } n \rightarrow +\infty \end{aligned}$$

Dunque se  $p > 3$  il raggio di convergenza della serie è  $R = 0$  e dunque la serie converge solo se  $x = 0$ . Se  $p < 3$  il raggio di convergenza è  $+\infty$  e la serie converge (assolutamente) per ogni  $x \in \mathbb{R}$ .

Se  $p = 3$  il raggio di convergenza è  $R = 27$  e dunque la serie converge assolutamente se  $|x| < 27$  e non converge (e i termini non sono neanche infinitesimi) se  $|x| > 27$ . Se  $|x| = 27$  osserviamo che si ha

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{(n+1)^3}{27(n+1)\left(n+\frac{2}{3}\right)\left(n+\frac{1}{3}\right)} \geq \frac{1}{27}$$

e dunque

$$\frac{|a_{n+1}x^{n+1}|}{|a_nx^n|} = \frac{a_{n+1}}{a_n} \cdot 27 \geq 1.$$

Significa che  $|a_nx^n|$  è crescente (e positiva) quindi non può essere infinitesima. Dunque per  $|x| = 27$  la serie non converge perché non è soddisfatta la condizione necessaria.  $\square$

3. Si risolva il problema di Cauchy:

$$\begin{cases} u' = \frac{4}{3}x\sqrt{u} \ln(1+x^2) \\ u(\sqrt{3}) = \frac{4}{9}(-1 + \ln 8)^2. \end{cases}$$

Si calcoli  $u(1)$ . Qual è l'intervallo massimale di esistenza delle soluzioni? Su quale intervallo la soluzione è unica?

*Soluzione.* Si tratta di una equazione del primo ordine a variabili separabili  $u' = g(x)h(u)$ . Osserviamo che siccome  $h(0) = 0$  la funzione  $u = 0$  è una soluzione stazionaria dell'equazione differenziale ma non soddisfa il dato iniziale del problema di Cauchy. E' utile osservare che la funzione  $h(y)$  non è derivabile per  $y = 0$  e quindi potrebbe non esserci unicità della soluzione e dobbiamo quindi aspettarci che la soluzione con dato iniziale positivo possa annullarsi e congiungersi con la soluzione stazionaria.

In ogni caso quando  $u(x) \neq 0$  possiamo separare le variabili e ottenere

$$\frac{u'}{\sqrt{u}} = \frac{4}{3} \cdot x \ln(1 + x^2)$$

da cui, integrando  $\int \frac{du}{\sqrt{u}} = 2\sqrt{u}$ , si ottiene:

$$2\sqrt{u} = \frac{2}{3} \int (2x) \ln(1 + x^2) dx.$$

Con la sostituzione  $1+x^2 = t$ ,  $2x dx = dt$  l'integrale si riconduce a  $\int \ln t dt = t \ln t - t$  da cui

$$\sqrt{u} = \frac{1}{3} [(1 + x^2) \ln(1 + x^2) - x^2 + c].$$

Osserviamo qui che il procedimento che stiamo svolgendo è valido solamente se il lato destro della precedente equazione è positivo. Questo perché  $u \neq 0$  (in quanto abbiamo diviso per  $\sqrt{u}$ ) e  $\sqrt{u} \geq 0$ .

Imponendo la condizione iniziale  $u(\sqrt{3}) = \frac{4}{9}(-1 + \ln 8)^2$  si trova

$$2(-1 + \ln 8) = 4 \ln 4 - 3 + c$$

da cui ricordando che  $\ln 8 = 3 \ln 2$  e  $\ln 4 = 2 \ln 2$ :

$$c = 1 - \ln 4.$$

Troviamo quindi

$$u(x) = \frac{1}{9} [(1 + x^2) \ln(1 + x^2) - x^2 + 1 - \ln 4]^2$$

ricordando però che la quantità tra parentesi quadre deve essere positiva.

Per capire se tale quantità si può annullare abbiamo un suggerimento dal testo, calcolando  $u(1)$  troviamo infatti:

$$u(1) = \frac{1}{9} [2 \ln 2 - \ln 4]^2 = 0.$$

Potremmo fare uno studio di funzione per capire se effettivamente  $u > 0$  per ogni  $x > 1$  ma è più semplice guardare direttamente l'equazione differenziale per capire che  $u' \geq 0$  se  $x > 0$  e  $u' = 0$  solo se  $u = 0$ . Dunque abbiamo trovato una unica soluzione  $u$  definita sull'intervallo  $(1, +\infty)$ . Osserviamo però che tale soluzione non è massimale, la possiamo estendere ponendo  $u = 0$  per  $x \leq 1$  ottenendo quindi una soluzione globale:

$$u(x) = \begin{cases} \frac{1}{9} [(1+x^2) \ln(1+x^2) - x^2 + 1 - \ln 4]^2 & \text{se } x > 1 \\ 0 & \text{se } x \leq 1. \end{cases}$$

I due tratti di questa funzione sono entrambi soluzioni dell'equazione differenziale e coincidono per  $x = 1$ , dunque  $u$  è effettivamente una funzione continua. Ma è anche derivabile in quanto entrambi i tratti, soddisfacendo la stessa equazione differenziale, hanno la stessa derivata (nulla) in  $x = 1$ .

Questa soluzione è unica nell'intervallo  $[0, +\infty)$  in quanto la soluzione è crescente per  $x \geq 0$  e chiaramente  $u$  non può diventare negativa in quanto l'equazione differenziale contiene l'espressione  $\sqrt{u}$ .

Per  $x < 0$  invece ci possono essere delle soluzioni che, al decrescere di  $x$ , si staccano dalla soluzione nulla. Infatti la funzione

$$u(x) = \frac{1}{9} [(1+x^2) \ln(1+x^2) - x^2 + c]^2$$

è definita anche per  $x < 0$  e, al variare di  $c$ , si può annullare in qualunque punto. □