

## 1. naloga: Airyjevi funkciji

Samo Krejan, 28231092

### 1 Uvod

Airyjevi funkciji Ai in Bi se v fiziki pojavljata predvsem v optiki in kvantni mehaniki [3]. Definirani sta kot neodvisni rešitvi enačbe

$$y''(x) - xy(x) = 0$$

in sta predstavljeni v integralni obliki

$$\text{Ai}(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \cos(t^3/3 + xt) dt, \quad \text{Bi}(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \left[ e^{-t^3/3+xt} + \sin(t^3/3 + xt) \right] dt.$$

Za majhne  $x$  lahko funkciji Ai in Bi izrazimo z Maclaurinovima vrstama

$$\text{Ai}(x) = \alpha f(x) - \beta g(x), \quad \text{Bi}(x) = \sqrt{3} \left[ \alpha f(x) + \beta g(x) \right],$$

kjer v  $x = 0$  veljata zvezi  $\alpha = \text{Ai}(0) = \text{Bi}(0)/\sqrt{3} \approx 0.355028053887817239$  in  $\beta = -\text{Ai}'(0) = \text{Bi}'(0)/\sqrt{3} \approx 0.258819403792806798$ . Vrsti za  $f$  in  $g$  sta

$$f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \left( \frac{1}{3} \right)_k \frac{3^k x^{3k}}{(3k)!}, \quad g(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \left( \frac{2}{3} \right)_k \frac{3^k x^{3k+1}}{(3k+1)!},$$

kjer je

$$(z)_n = \Gamma(z+n)/\Gamma(z), \quad (z)_0 = 1.$$

Za velike vrednosti  $|x|$  Airyjevi funkciji aproksimiramo z njunima asimptotskima razvojem. Z novo spremenljivko  $\xi = \frac{2}{3}|x|^{3/2}$  in asimptotskimi vrstami

$$L(z) \sim \sum_{s=0}^{\infty} \frac{u_s}{z^s}, \quad P(z) \sim \sum_{s=0}^{\infty} (-1)^s \frac{u_{2s}}{z^{2s}}, \quad Q(z) \sim \sum_{s=0}^{\infty} (-1)^s \frac{u_{2s+1}}{z^{2s+1}},$$

s koeficienti

$$u_s = \frac{\Gamma(3s + \frac{1}{2})}{54^s s! \Gamma(s + \frac{1}{2})}$$

za velike pozitivne  $x$  izrazimo

$$\text{Ai}(x) \sim \frac{e^{-\xi}}{2\sqrt{\pi}x^{1/4}} L(-\xi), \quad \text{Bi}(x) \sim \frac{e^{\xi}}{\sqrt{\pi}x^{1/4}} L(\xi),$$

za po absolutni vrednosti velike negativne  $x$  pa

$$\begin{aligned} \text{Ai}(x) &\sim \frac{1}{\sqrt{\pi}(-x)^{1/4}} \left[ \sin(\xi - \pi/4) Q(\xi) + \cos(\xi - \pi/4) P(\xi) \right], \\ \text{Bi}(x) &\sim \frac{1}{\sqrt{\pi}(-x)^{1/4}} \left[ -\sin(\xi - \pi/4) P(\xi) + \cos(\xi - \pi/4) Q(\xi) \right]. \end{aligned}$$

## 2 Naloga

Z uporabo kombinacije Maclaurinove vrste in asimptotskega razvoja poišči čim učinkovitejši postopek za izračun vrednosti Airyjevih funkcij  $Ai$  in  $Bi$  na vsej realni osi z **absolutno** napako, manjšo od  $10^{-10}$ . Enako naredi tudi z **relativno** napako in ugotovi, ali je tudi pri le-tej dosegljiva natančnost, manjša od  $10^{-10}$ . Pri oceni napak si pomagaj s programi, ki znajo računati s poljubno natančnostjo, na primer z MATHEMATICO in/ali paketi MPMATH in DECIMAL v programskem jeziku PYTHON.

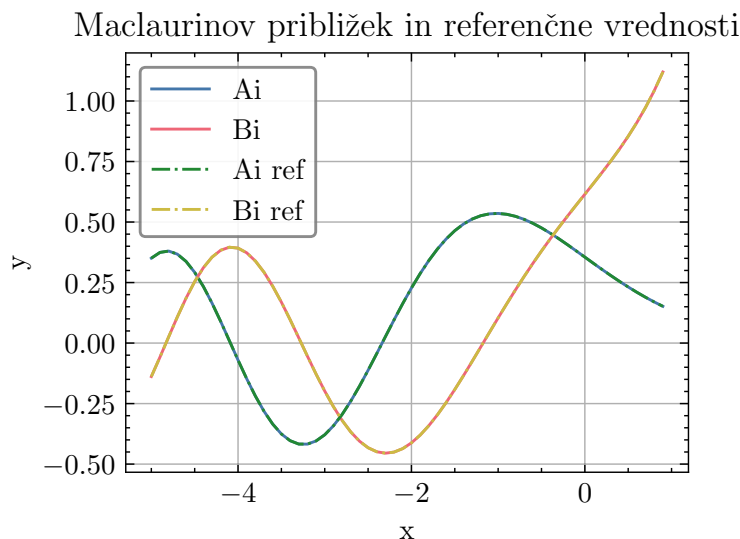
### 2.1 Maclaurinov približek

Člene vrst  $f$  in  $g$  zapišemo rekurzivno, in  $n$ -ti člen zapišemo kot produkt prejšnjega in količnika:

$$f_n = f_{n-1} \cdot \frac{f_n}{f_{n-1}} = f_{n-1} \cdot \frac{x^3}{3n(3n-1)}, \quad f_0 = 1$$

$$g_n = g_{n-1} \cdot \frac{g_n}{g_{n-1}} = g_{n-1} \cdot \frac{x^3}{3n(3n+1)}, \quad g_0 = x$$

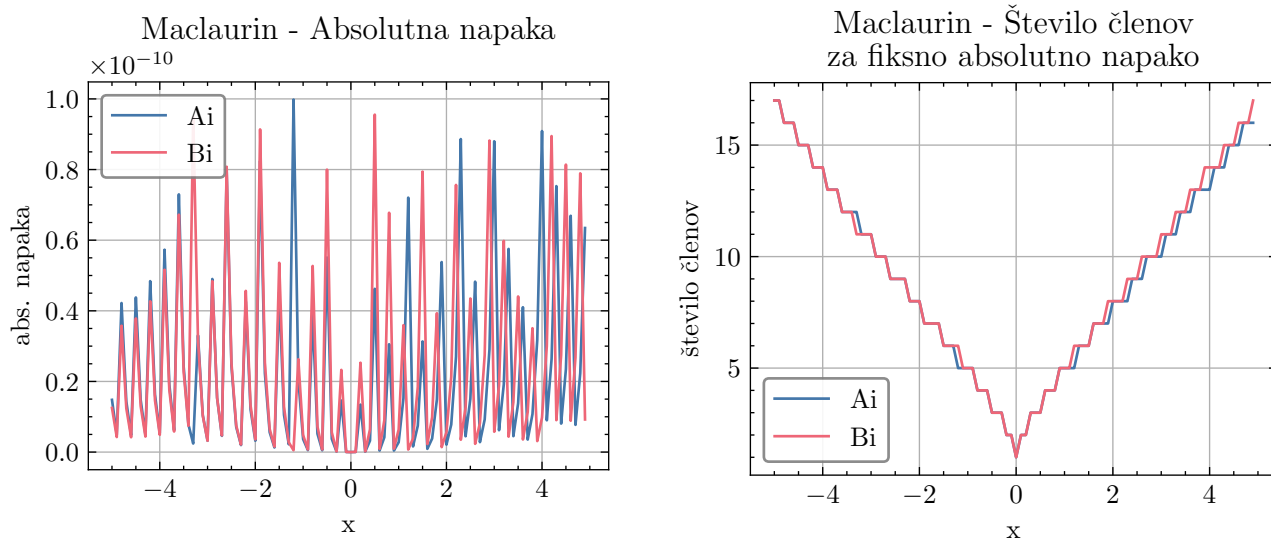
Dobljene rezultate bomo skozi nalogo primerjali z vgrajenima funkcijama `mpmath.airyai()` in `mpmath.airybi()`, ki gotovo od dejanske vrednosti odstopata manj kot  $\cdot 10^{-20}$  [4].



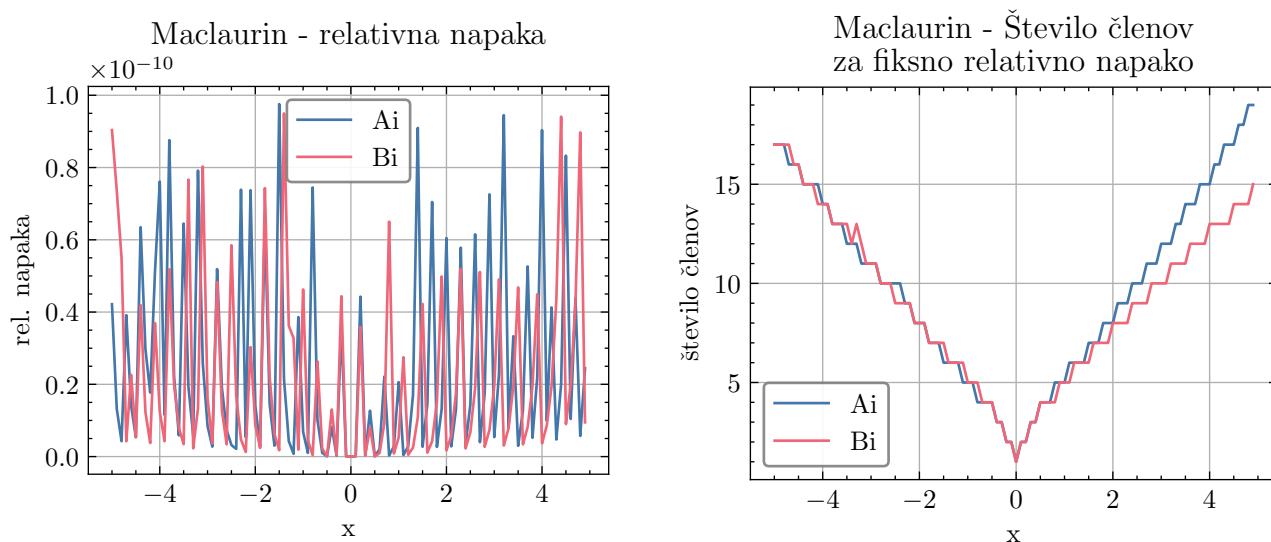
Slika 1: Maclaurinov približek  $Ai$  in  $Bi$  primerjan z vgrajenima funkcijama

Že na prvi pogled, ko grafiramo dobljene vrednosti za obe funkciji in jih primerjamo z vgrajenima funkcijama vidimo (slika: 1), da je Maclaurinov približek precej uspešen. To še dodatno potrđita sliki 2 in 3, kjer vidimo, da nam je na območju  $(-4, 4)$  uspelo *ujet* tako željeno absolutno kot relativno napako z manj kot dvajsetimi členi.

Zanimivost, ki se mi jo zdi vredno omeniti lahko opazimo na desni sliki 3, kjer vidimo, da se število potrebnih členov funkcije  $Ai$  hitro večja. To je seveda smiselno, ko pomislimo, da tam  $Ai$  dosega vrednosti zelo blizu 0 in je tako seveda za enako relativno natančnost, potrebna veliko boljša absolutna natančnost.



Slika 2: Absolutna napaka naše implementacije in število členov potrebnih, da le ta ostane pod  $10^{-10}$ . Iz grafov vidimo, da se napaka sicer z oddaljenostjo od izhodišča strmo večja, a vsakič ko bi le ta zgrešila željeno natančnost se vrsti doda en člen. To pojasni močno zobničasto naravo napake.



Slika 3: Relativna napaka in potrebno število členov vrste za doseg te napake. Karakteristika je ekvivalentna tisti pri absolutni napaki. Tudi potrebno število členov se ne spremeni znatno, le pri večjih pozitivnih vrednostih opazimo, da potrebujemo vedno več členov za funkcijo  $Ai$ .

## 2.2 Asimptotski približek za velike negativne $x$

Člene vrst razvoja funkcij  $P$  in  $Q$  prav tako, kot pri Maclaurinovem razvoju zapišemo rekurzivno, saj tako močno izboljšamo hitrost algoritma.

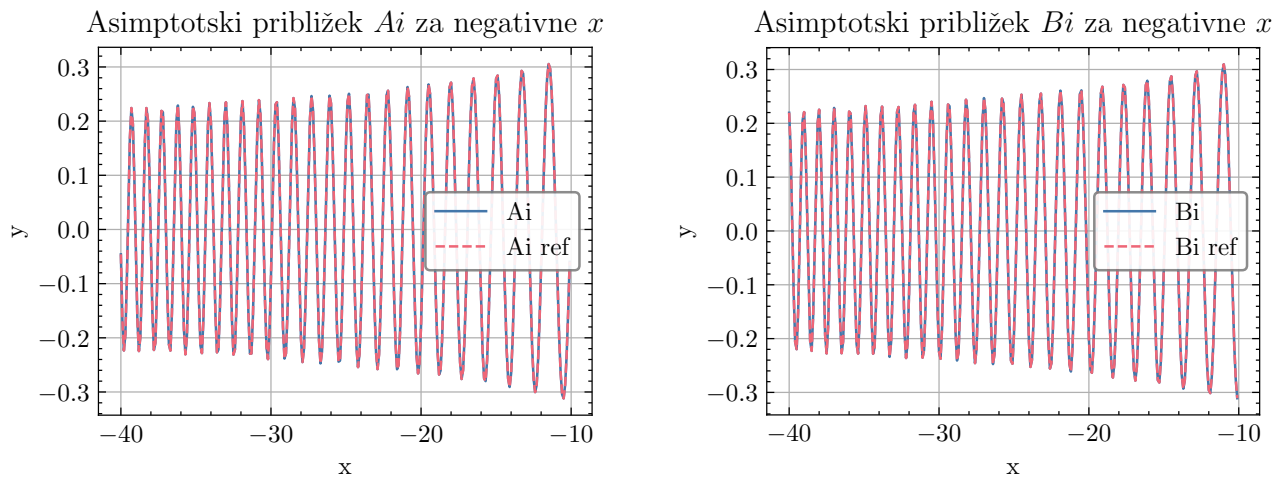
$$p_n = p_{n-1} \cdot \frac{p_n}{p_{n-1}} = -p_{n-1} \cdot \frac{(6n-1/2)(6n-5/2)(6n-7/2)(6n-11/2)}{(2n-1)(2n)18^2x^2}, \quad p_0 = 1$$

$$q_n = q_{n-1} \cdot \frac{q_n}{q_{n-1}} = -q_{n-1} \cdot \frac{(6n-1/2)(6n-5/2)(6n+1/2)(6n+5/2)}{(2n+1)(2n)18^2x^2}, \quad q_0 = \frac{5}{72x}$$

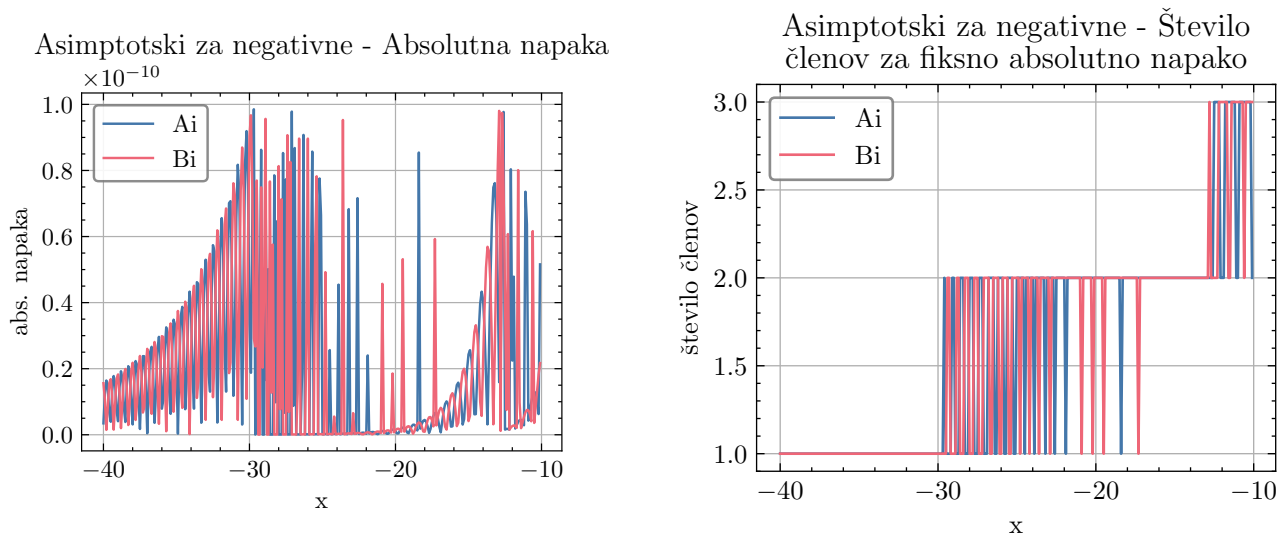
Pri obeh asimptotskih približkih moramo sicer paziti, da ne uporabimo preveč členov v vrsti. Izkaže se

namreč, da se začne napaka pri nekem členu nazaj večati. Iz tega razloga vrsto odrežemo, ko naslednji člen postane večji od prejšnjega. Poraja se vprašanje, če je to res najboljša meja za *odsek* vrste:

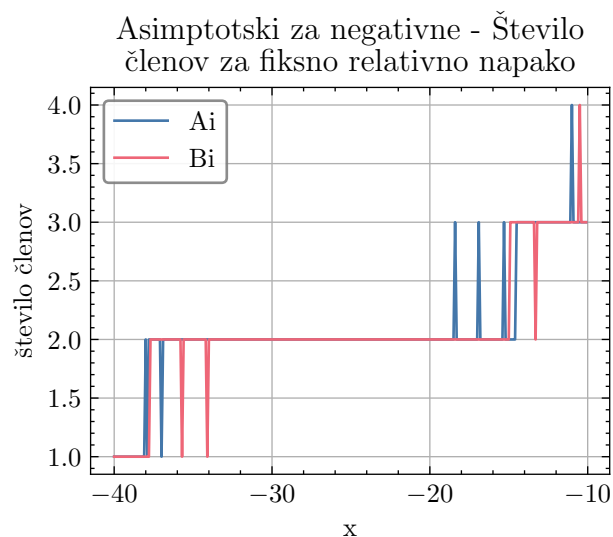
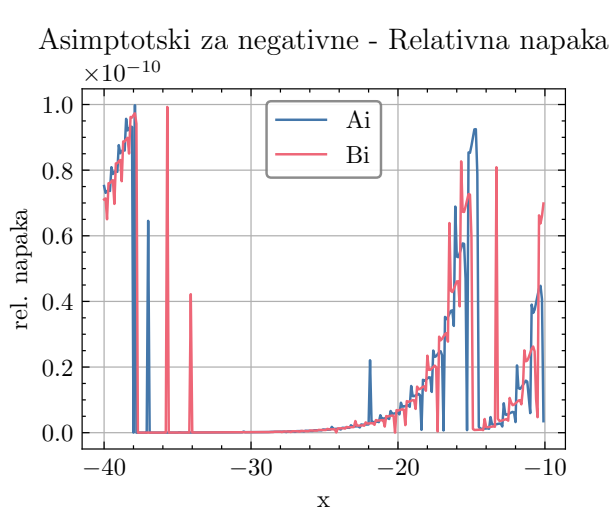
Odgovor je da je to tok blizu, da je praktično optimalno. (Jakob Kralj, 2025)



Slika 4: Asimptotski približek za  $A_i$  (levo) in  $B_i$  (desno) primerjan z vgrajenima funkcijama.



Slika 5: Absolutna napaka (levo) in število členov asimptotske vrste potrebnih za doseg le te. Zanimivo vidimo, da bolj kot je negativen  $x$  manj manjša je napaka in je zato posledično potrebnih manj členov.



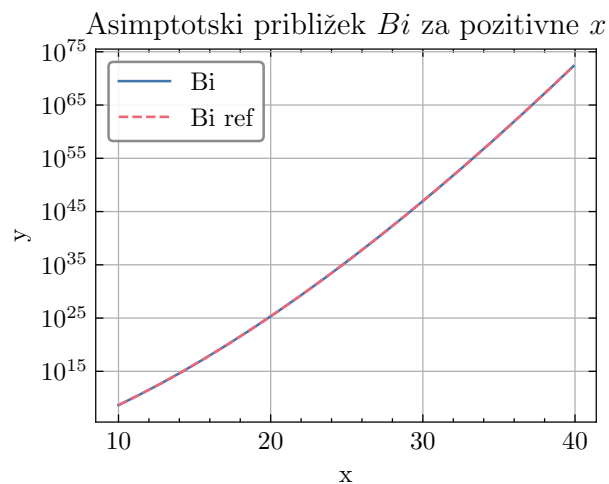
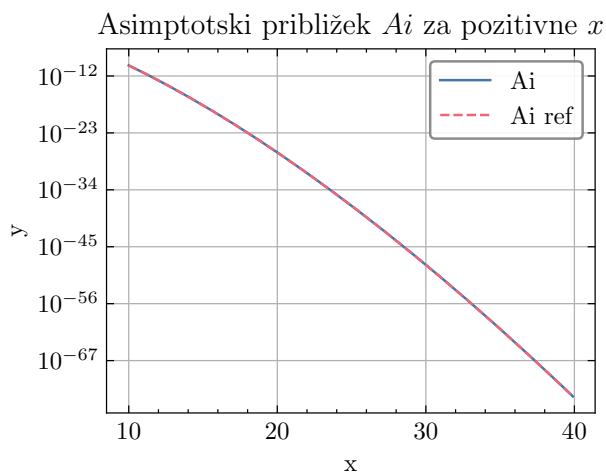
Slika 6: Relativna napaka (levo) in število členov potrebnih za doseg le te (desno). Sama karakteristika je seveda zelo podobna kot pri absolutni napaki (glej sliko 5) a lahko opazimo, da je v splošnem za konstantno relativno napako potrebnih nekoliko več členov

### 2.3 Asimptotski približek za velike pozitivne $x$

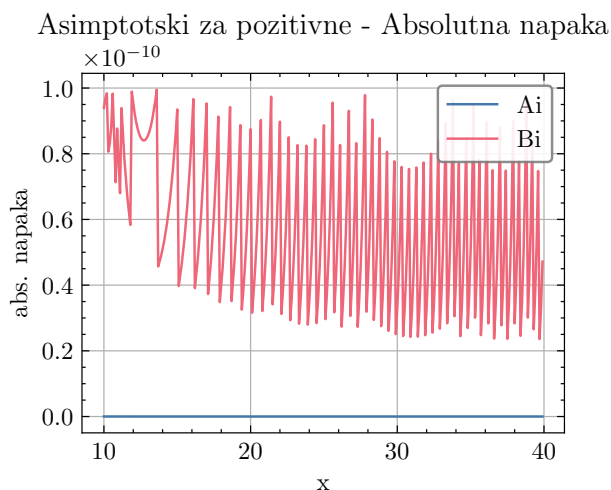
Za velike pozitivne  $x$  uporabimo vrsto  $L$  opisano v poglavju 1. Katere člene lahko spet zapišemo rekurzivno za potrebe optimizacije:

$$l_n = l_{n-1} \cdot \frac{l_n}{l_{n-1}} = l_{n-1} \cdot \frac{(3n + 1/2)(3n + 5/2)}{(n + 1)18x}, \quad l_0 = 1$$

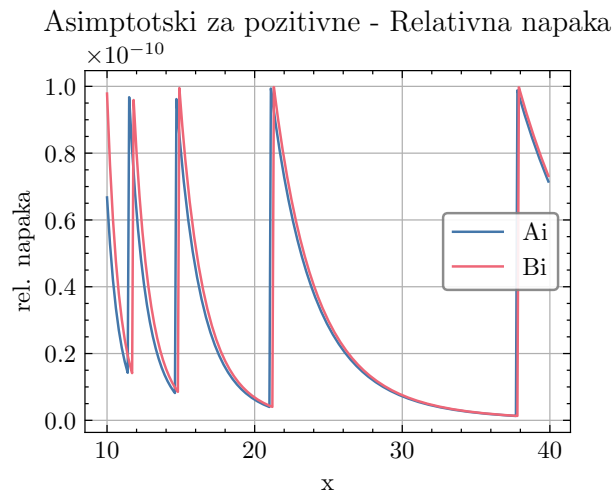
Pristop od tu naprej je seveda ekvivalenten tistemu za velike negativne  $x$ .



Slika 7: Asimptotski približek za  $Ai$  (levo) in  $Bi$  (desno) primerjan z vgrajenima funkcijama v logori-temski skali.

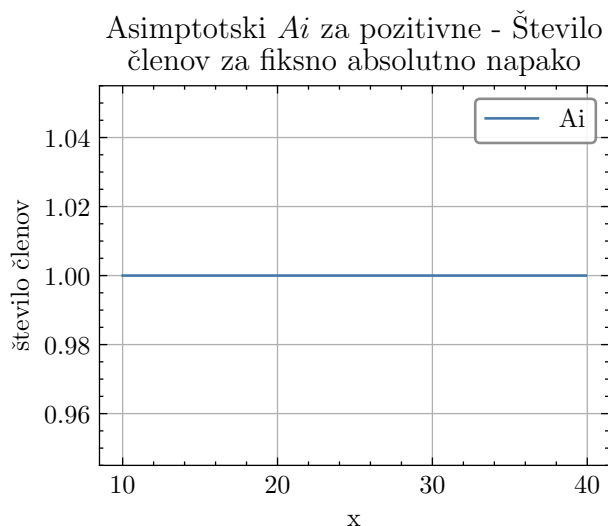


(a) Absolutna napaka asimptotske vrste za pozitivne  $x$ , napaka za  $Ai$  je praktično 0 saj je tudi sama vrednost funkcije zelo blizu ničle.

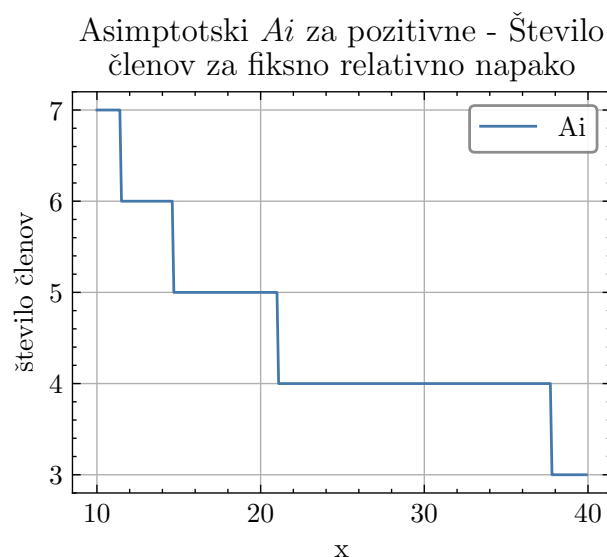


(b) Relativna napaka asimptotske vrste za pozitivne  $x$ . Opazimo, da sta napaki nadvse podobni, kar je smiselno glede na naravo razvoja funkcij.

Slika 8: Primerjava absolutne in relativne napake



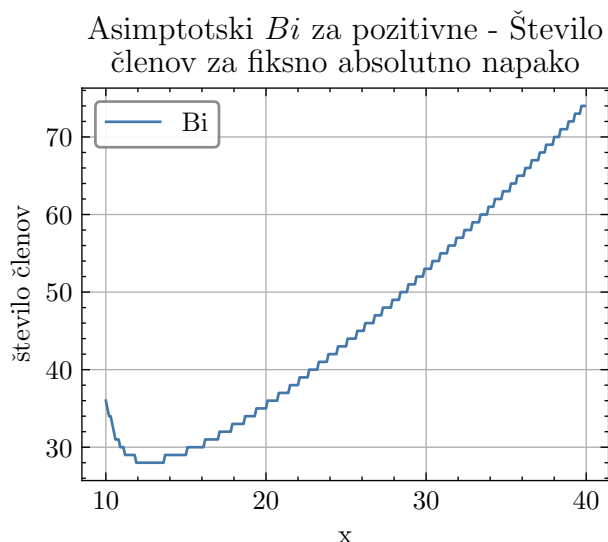
(a) Število členov potrebnih za fiksno absolutno napako. Ta ostane 1 saj se vrednost funkcije praktično ne spreminja, ko pride tako blizu ničle.



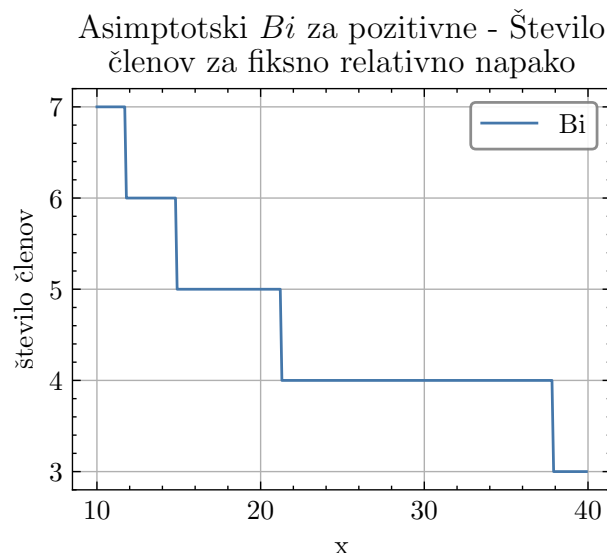
(b) Število členov potrebnih za fiksno relativno napako. Vidimo, da se le ta manjša.

Slika 9: Število členov za fiksno absolutno (levo) in relativno (desno) napako za  $Ai$

Vidimo, da se asimptotski razvoj za pozitivne  $x$  obnaša zelo podobno, ko zahtevamo konstantno relativno napako, čeprav se funkciji močno razlikujeta -  $Ai$  eksponentno pada, medtem ko  $Bi$  eksponentno narašča (vidno na sliki: 7). Razlika med funkcijama se zares izrazi šele ko fiksiramo absolutno napako. Očitno enaka relativna napaka pomeni mnogo večjo absolutno napako pri  $Bi$  in skoraj nično napako pri  $Ai$ . Posledično za enako absolutno napako seveda potrebujemo mnogo več delcev.



(a) Število členov potrebnih za fiksno absolutno napako. Ta z večanjem  $x$  hitro raste.



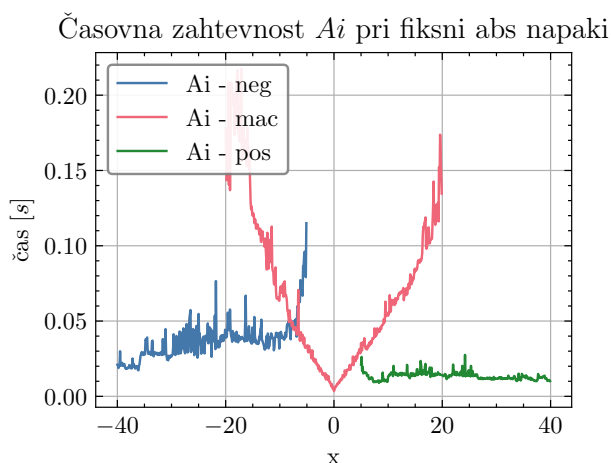
(b) Število členov potrebnih za fiksno relativno napako. Karakteristika je podobna tisti pri 9b

Slika 10: Število členov za fiksno absolutno (levo) in relativno (desno) napako za  $Bi$

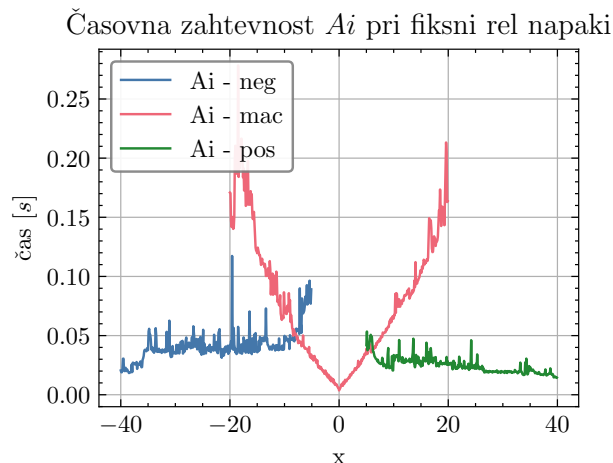
## 2.4 Zlepek

Hitro postane očitno, da nobena izmed metod ni učinkovita po celotni realni osi. Maclaurinov približek deluje le za relativno majhne  $x$  po absolutni vrednosti, saj za večje potrebujemo mnogo členov, kar pa vzame veliko časa. Tu v pomoč prideta asimptotska razvoja posebaj za velike negativne  $x$  in velike pozitivne  $x$ . Torej kar preostane ugotoviti je na katerih točkah bomo nehali upoštevati Maclaurinov razvoj in začeli uporabljati asimptotski razvoj. Za potrebe iskanja teh točk grafiramo čas porabljen za izračun funkcij z različnimi metodami preko realne osi z različnimi zahtevami za napako (sliki 11 in 12).

Za vsakega izmed štirih *režimov* lahko tako zgrafiramo *zlepek*, kjer so meje med posameznimi uporabljenimi metodami določene s presečišči na grafih porabljenega časa.



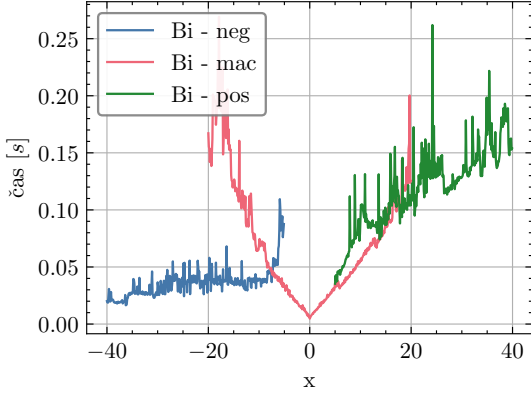
(a) Čas potreben za 100 iteracij  $Ai$  pri vsaki vrednosti  $x$  za različne metode pri konstantni absolutni napaki.



(b) Čas potreben za 100 iteracij  $Ai$  pri vsaki vrednosti  $x$  za različne metode pri konstantni relativni napaki.

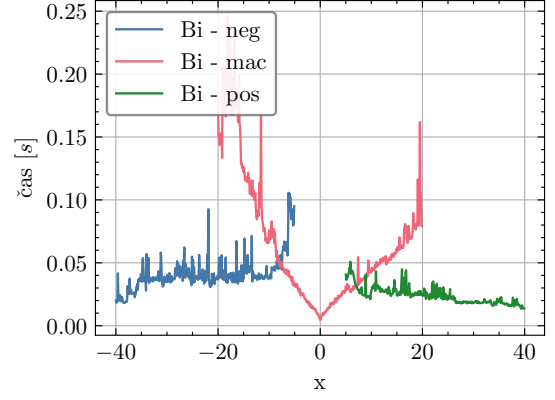
Slika 11: Časovna zahtevnost  $Ai$

Časovna zahtevnost  $Bi$  pri fiksni abs napaki



(a) Čas potreben za 100 iteracij  $Bi$  pri vsaki vrednosti  $x$  za različne metode pri konstantni absolutni napaki.

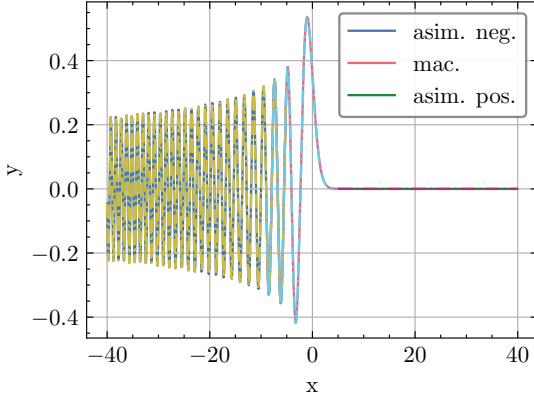
Časovna zahtevnost  $Bi$  pri fiksni rel napaki



(b) Čas potreben za 100 iteracij  $Bi$  pri vsaki vrednosti  $x$  za različne metode pri konstantni relativni napaki.

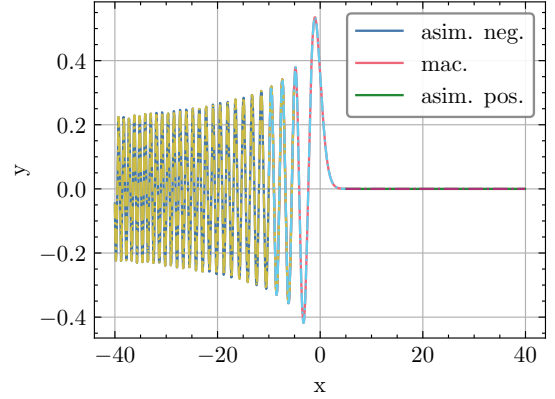
Slika 12: Časovna zahtevnost  $Bi$

Zlepek  $Ai$  s fiksno absolutno napako



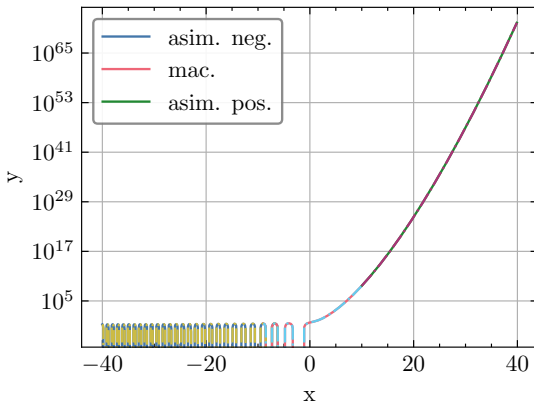
(a) Čas potreben za 100 iteracij  $Ai$  pri vsaki vrednosti  $x$  za različne metode pri konstantni absolutni napaki.

Zlepek  $Ai$  s fiksno relativno napako



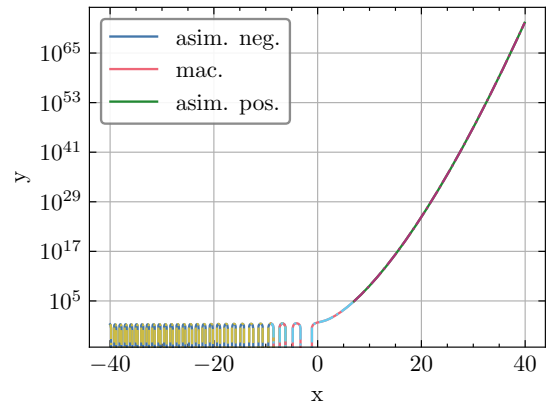
(b) Čas potreben za 100 iteracij  $Ai$  pri vsaki vrednosti  $x$  za različne metode pri konstantni relativni napaki.

Zlepek  $Bi$  s fiksno absolutno napako



(a) Čas potreben za 100 iteracij  $Bi$  pri vsaki vrednosti  $x$  za različne metode pri konstantni absolutni napaki.

Zlepek  $Bi$  s fiksno relativno napako



(b) Čas potreben za 100 iteracij  $Bi$  pri vsaki vrednosti  $x$  za različne metode pri konstantni relativni napaki.



Pri naši implementaciji se seveda zanašamo, da vemo koliko členov je potrebnih za željeno numerično natančnost. Mislim, da razen pri asimptotski vrsti pozitivnih  $x$  za funkcijo  $Bi$  ne bi smelo biti težko postaviti zgornjih mej za število potrebnih členov. Tudi, če meje za število členov ne bi imeli, bi naša funkcija delovala dobro, saj smo v asimptotskem razvoju implementirali pogoj za zaustavitev, ko se napaka začne večati, za Maclaurinovo vrstopa lahko preprosto postavimo mejo za maksimalno  $\approx 50$  členov, kar nam zagotovi željeno natančnost v vseh režimih. S tem bi sicer zgubili nekaj na časovni zahtevnosti, a bi morda pridobili nekaj na spominu.

### 3 Dodatna naloga

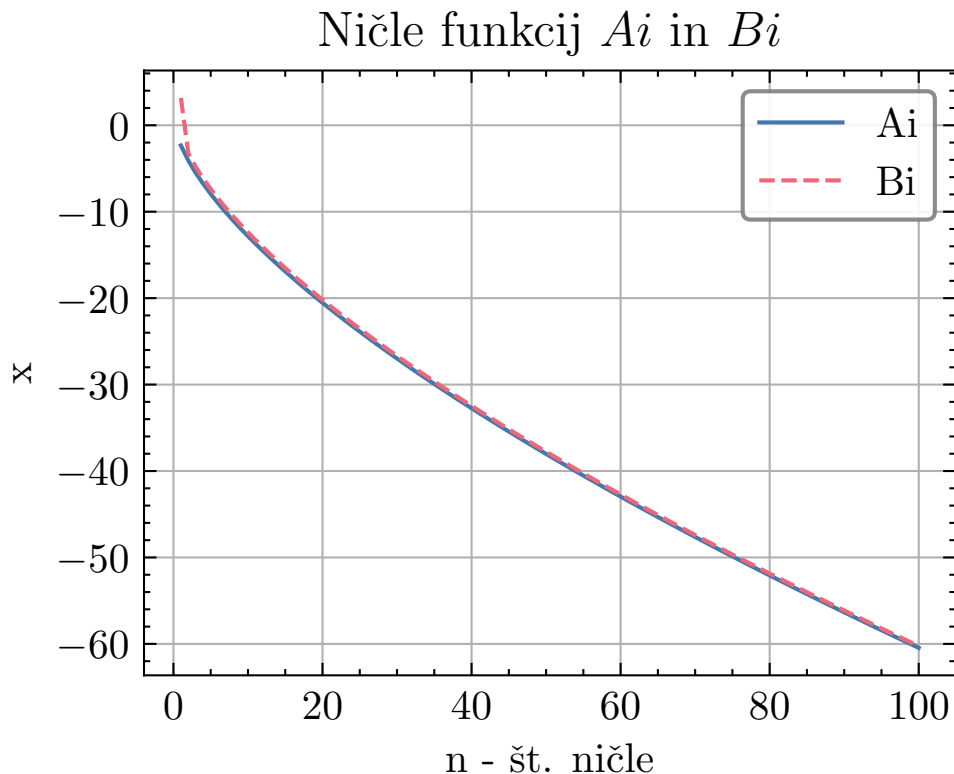
Ničle funkcije  $Ai$  pogosto srečamo v matematični analizi pri določitvi intervalov ničel specialnih funkcij in ortogonalnih polinomov [5] ter v fiziki pri računu energijskih spektrov kvantnomehanskih sistemov [1]. Poišči prvih sto ničel  $\{a_s\}_{s=1}^{100}$  Airyjeve funkcije  $Ai$  in prvih sto ničel  $\{b_s\}_{s=1}^{100}$  funkcije  $Bi$  pri  $x < 0$  ter dobljene vrednosti primerjaj s formulama

$$a_s = -f\left(\frac{3\pi(4s-1)}{8}\right), \quad b_s = -f\left(\frac{3\pi(4s-3)}{8}\right), \quad s = 1, 2, \dots,$$

kjer ima funkcija  $f$  asimptotski razvoj [2]

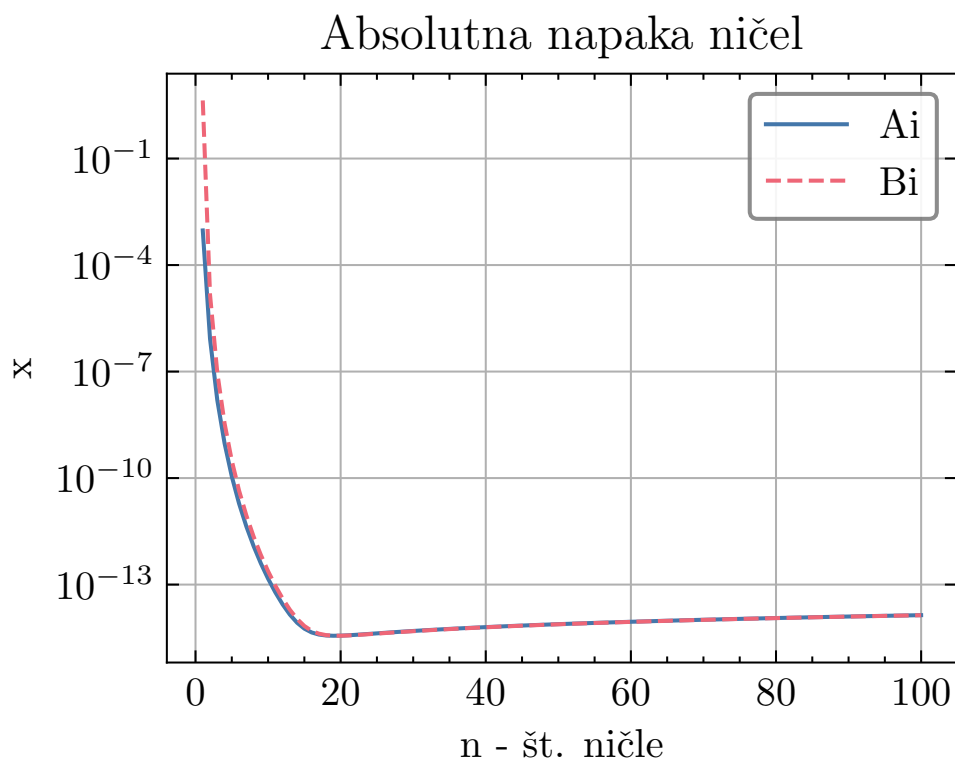
$$f(z) \sim z^{2/3} \left( 1 + \frac{5}{48} z^{-2} - \frac{5}{36} z^{-4} + \frac{77125}{82944} z^{-6} - \frac{108056875}{6967296} z^{-8} + \dots \right).$$

Vrsto za  $a_s$  in  $b_s$  smo implementirali s funkcijo  $f$  in rezultate primerjali z vgrajenima funkcijama `mpmath.airyaizero()` in `mpmath.airybizero()`



Slika 15:  $x$  vrednost  $n$ -te ničle

Vidimo sicer, da za nekaj začetnih ničel vrsta ni najbolj natančna, a že po petih členih absolutna napaka pade pod  $\cdot 10^{-10}$ .



Slika 16: Absolutna napaka  $n$ -te ničle

## 4 Zaključek

Menim, da je bila naloga opravljena uspešno. Na testnem območju nam je uspelo ujeti željene natančnosti v precej dobrem času glede na to da smo uporabili Python.

Tekom dela sem naletel na mnoge probleme, ki so bili zame novi. Od tega, da sem se naučil delati s knjižnico *mpmath*, ki omogoča računanje do poljubne numerične natančnosti, do tega da sem zaradi ekstenzivnega testiranja paraleliziral nekatere procese. Poleg tega, se mi je v kodo prikradlo nekaj hroščev, ki so skupaj vzeli vsaj nekaj ur mojega življenja, saj so bili zelo dobro skriti. Za pomoč pri odkrivanju teh hroščev in razjasnjevanje misterij neznane knjižnice se moram zahvaliti *Chat – GPT*ju, ki je marsikatero nejasnost hitro razrešil.

Kljub temu, da mi je naloga definitivno vzela veliko več časa kot sem pričakoval (krat 2 in naslednja časovna enota), sem v izdelovanju naloge užival, posebjaj za to, ker sem se naučil več novega kot sem pričakoval.

## Literatura

- [1] E. M. Lifshitz L. D. Landau. *Course in theoretical physics, Vol. 3: Quantum mechanics*. Pergamon Press, Oxford 1991.
- [2] I. A. Stegun M. Abramowitz. *Handbook of mathematical functions*. Dover Publications, Mineola 1972.
- [3] M. Soares O. Vallée. *Airy functions and applications to physics*. Imperial College Press, 2004.
- [4] Luka Skeledžija. Airyjevi funkciji, 2023. Accessed: github 12. 10. 2025.
- [5] G. Szegő. Orthogonal polynomials. *AMS*, Providence 1939.