

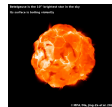
Podstawy astrofizyki i astronomii

Andrzej Odrzywołek

Zakład Teorii Względności i Astrofizyki, Instytut Fizyki Teoretycznej UJ

23 kwietnia 2023

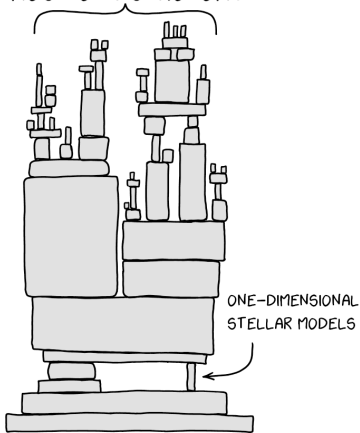
MESA



Symulacja komputerowa ewolucji 1D gwiazdy na przykładzie „Słońca”

Badanie ewolucji gwiazdy polega na numerycznym rozwiązywaniu 4 równań struktury gwiazdy naprzemiennie z układem równań opisującym kinetykę reakcji termojądrowych.

MOST OF ASTRONOMY



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dr} = -\frac{Gm\rho}{r^2}, \\ \frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho, \\ \frac{L}{4\pi r^2} = -D \frac{d(aT^4)}{dr} \text{ lub } \frac{d \ln T}{d \ln P} = 1 - \frac{1}{\gamma} \\ \frac{dL}{dm} = \epsilon - \epsilon_v, \\ P(\rho, T, X_i, \dots), \\ \kappa(\rho, T, X_i), \\ \epsilon(T, X_i, \rho), \\ \dot{X}_i = f(X_i, T, \rho). \end{array} \right.$$

Większość podanych dalej informacji opiera się o obliczenia wykonane programem do ewolucji gwiazd MESA¹.

- Modules for Experiments in Stellar Astrophysics, mesa-r22.11.1
- <https://doi.org/10.5281/zenodo.2602941>
- szybki, wykorzystujący wielordzeniowe procesory, także Apple M1
- wymagany 64-bitowy Linux lub Mac OS
- Fortran, ale to co musimy znać to `.TRUE.` i `.FALSE.`; kod obsługujemy za pomocą tekstowych plików konfiguracyjnych
- wbudowana ascetyczna, ale przemyślana, wizualizacja wyników w czasie rzeczywistym, do oglądania na monitorze
- oglądanie ewolucji gwiazdy na żywo jest najprzyjemniejszym sposobem studiowania teorii i ewolucji gwiazd
- informacje z tego wykładu pozwolą na zrozumienie jedynie niewielkiej liczby wbudowanych opcji

¹Prezentowane obliczenia w komputerowym modelu mogą różnić się nieznacznie od obserwowanej ewolucji gwiazdy.

Najważniejsze sposoby wizualizacji ewolucji gwiazdy

Diagram HR (Hertzsprung-Russela)

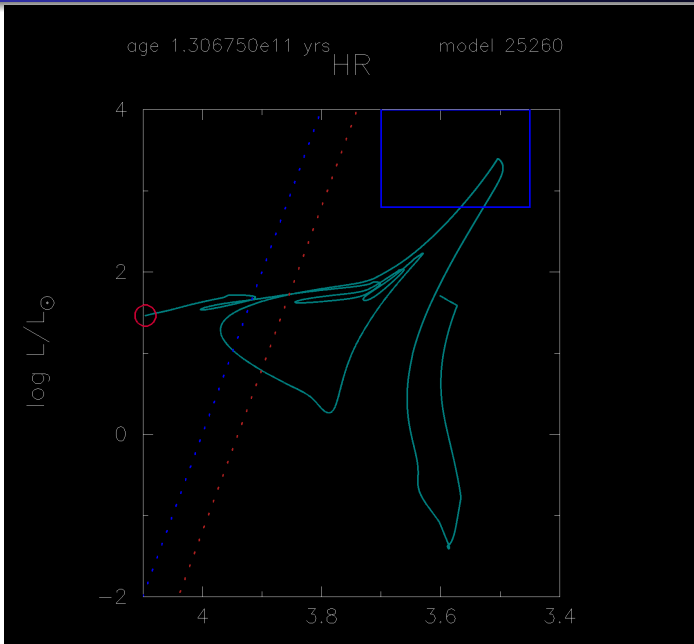


Diagram Kippenhahna („czasoprzestrzenny”)

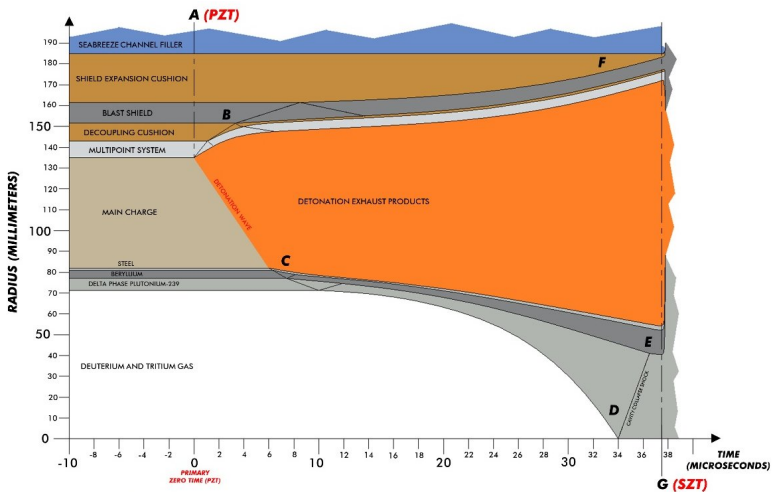


Diagram Kippenhahna („czasoprzestrzenny”)

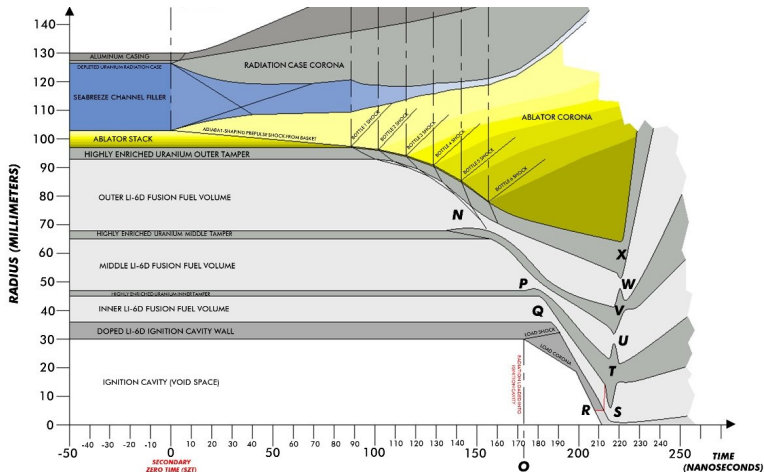
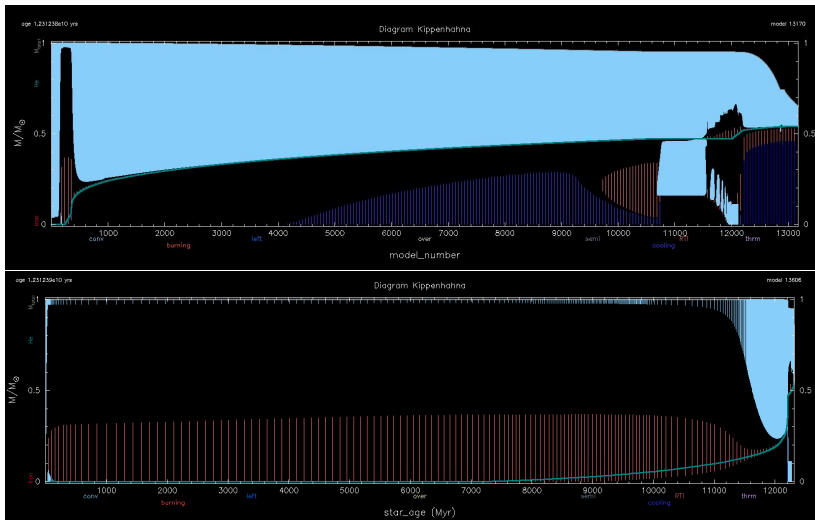


Diagram Kippenhahna („czasoprzestrzenny”)

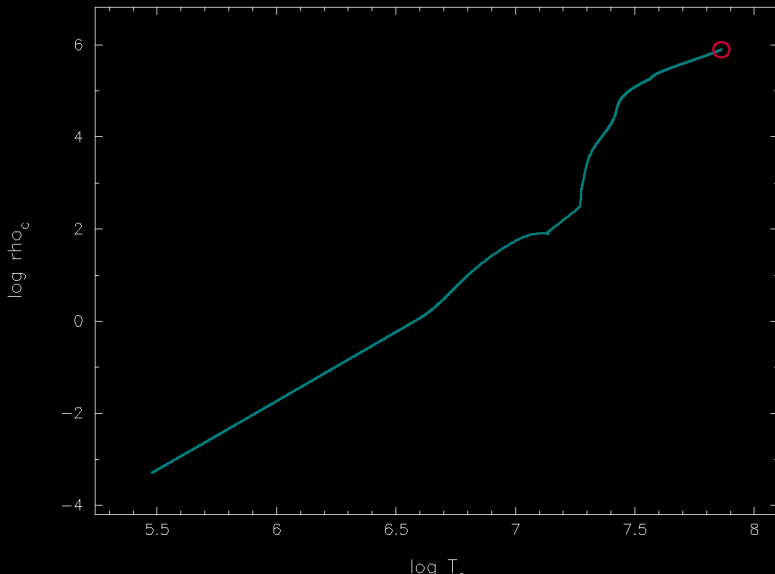


Ewolucja parametrów centralnych

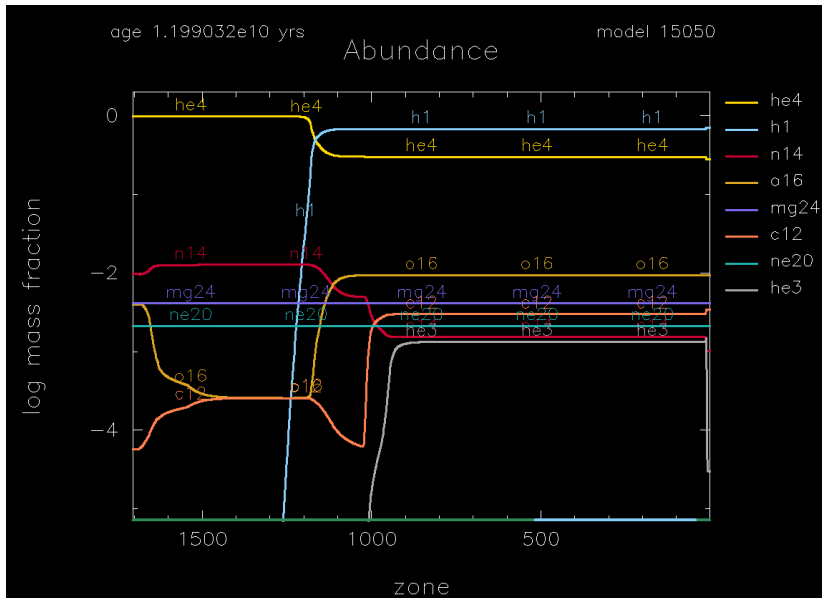
age 1.199044e10 yrs

model 15523

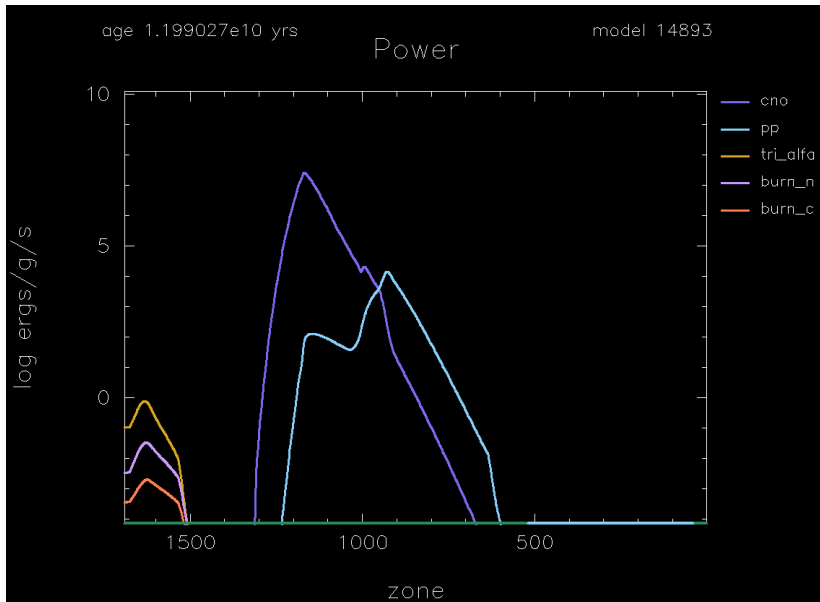
Temperatura – gestosc



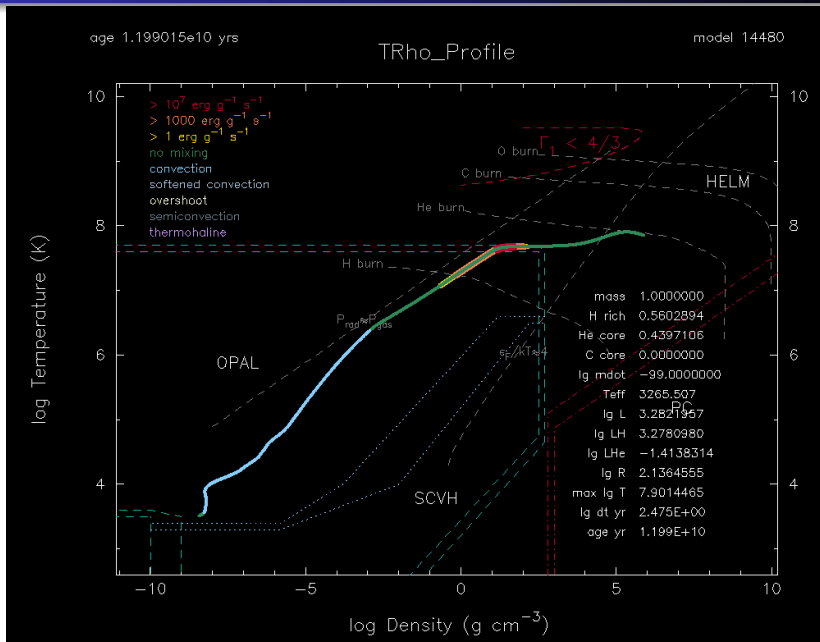
Skład chemiczny/izotopowy



Produkcja energii



Profil gwiazdy (przekrój radialny)



Animacja ewolucji

Wersja 2023:

<https://youtu.be/DndTbq7spPY>

Wersja 2022:

<https://youtu.be/nMSzuHLPwp8?t=4079>

Wersja 2018:

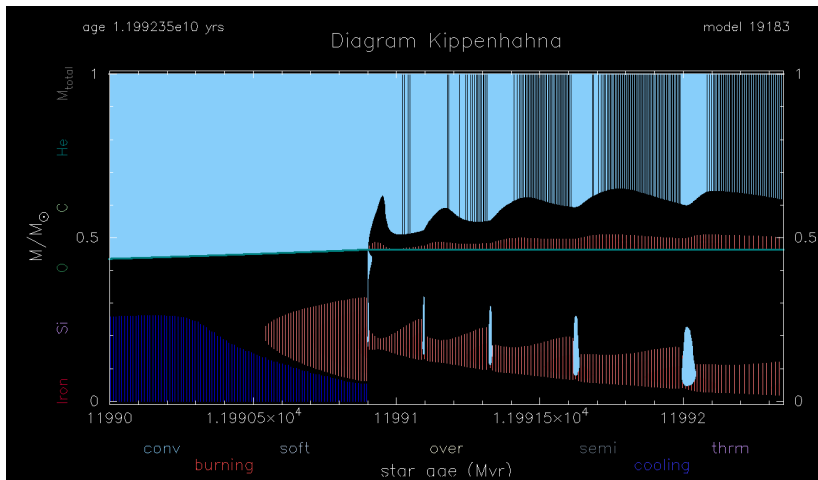
https://youtu.be/itBC_7wW5v0

Wersja 2016:

<https://www.youtube.com/watch?v=UxR7lzafdTI>

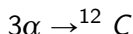
- 1 kolaps obłoku międzygwiazdowego
- 2 protogwiazda (w całości konwektywna)
- 3 termojądrowy zapłon wodoru
- 4 spalanie wodoru w centrum (ciąg główny)
- 5 spalanie wodoru w powłoce (shell burning) i wspinaczka do czerwonych olbrzymów
- 6 zapłon helu (gałąź horyzontalna)
- 7 wyczerpanie He w centrum i spalanie w 2 powłokach (faza AGB)
- 8 utrata otoczki
- 9 mgławica planetarna + biały karzeł w centrum
- 10 czarny karzeł

Impulsy spalania He w shell-u



Reakcja 3α

Jeżeli temperatura i gęstość są dostatecznie wysokie, to rozpoczyna się proces spalania helu:

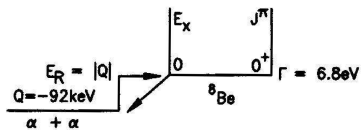
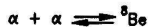


Reakcja ta zachodzi w nietrywialny sposób:

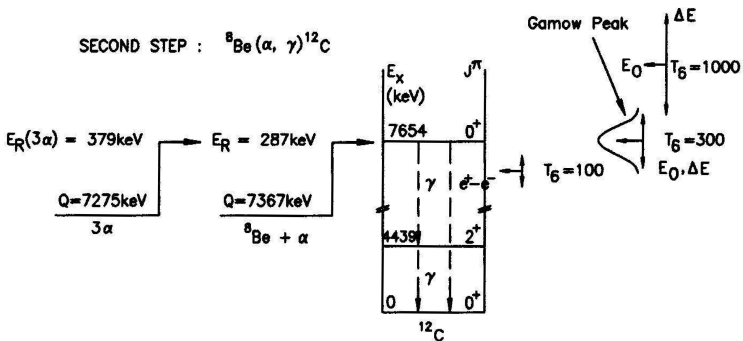
- 1 reakcja $\alpha + \alpha \rightarrow {}^8\text{Be}^*$ produkuje niewielką równowagową ilość ${}^8\text{Be}$
- 2 zachodzi rezonansowa reakcja $\alpha + {}^8\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C}^*$
- 3 deekscytacja ${}^{12}\text{C}^* \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$
- 4 brak podobnych reakcji prowadzących do ${}^{16}\text{O}$ i dalej

Tempo reakcji trójcząłowej jest proporcjonalne do ρ^2 .

FIRST STEP :



SECOND STEP : ${}^8\text{Be}(\alpha, \gamma){}^{12}\text{C}$



Jądro He (helowe)

- skutkiem termojądrowego spalania H (wodoru) w jądrze gwiazdy jest ostatecznie całkowita zamiana na He (hel)
- hel gromadzi się w centrum, ale temperatura jest zbyt mała aby zapoczątkować kolejne reakcje
- jądro kurczy się do rozmiaru kilkudziesięciu tysięcy km
- elektrony stają się zdegenerowane

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-\mu}{kT}}}, \quad \mu \gg 4kT$$

Spalanie w powłoce (shell burning)

- w jądrze He nie zachodzą reakcje termojądrowe
- na jego powierzchni temperatura i gęstość pozwalają na spalanie wodoru
- spalanie zachodzi w bardzo cienkiej (zarówno w sensie promienia jak i całkowitej masy) powłoce sferycznej na brzegu jądra He
- proces ten określamy jako shell burning, co można tłumaczyć jako „spalanie w powłoce [sferycznej]”
- zużyty wodór zbiera się na powierzchni jądra He, co prowadzi do systematycznego zwiększania jego masy

Czerwony olbrzym

- spalanie wodoru w powłoce jest bardzo wydajne, zachodzi na ogół w cyklu CNO
- moc promieniowania całej gwiazdy wzrasta o kilka rzędów wielkości
- jedynie transport konwektywny jest w stanie odprowadzić energię
- gwiazda zamienia się w obiekt będący połączeniem praktycznie punktowego źródła energii oraz rozległej otoczki wodorowej o promieniu setki razy większym od gwiazdy ciągu głównego
- równocześnie temperatura spada
- gwiazdę w tym stanie określamy jako czerwony olbrzym

Dredge-up

Sytuację, w której strefa konwektywna dosięgnęła jądra He określamy jako dredge-up. W efekcie produkty spalania docierają na powierzchnię i możemy obserwować ich widmo.

Betelgeuse is the 10th brightest star in the sky
Its surface is boiling violently



© MPA/Ma, Jing-Ze et al. 2024

The Sun



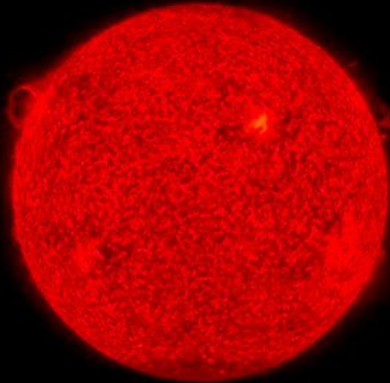
5800 K

Smallest Kepler
red giant



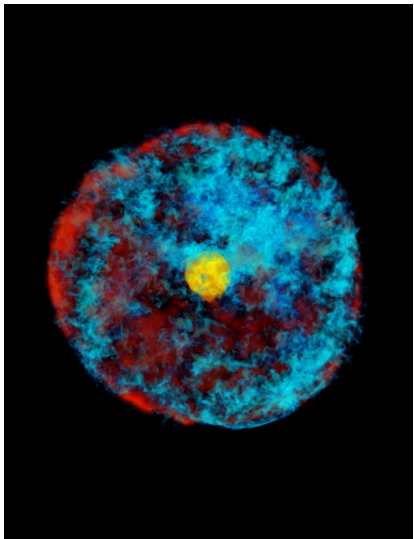
5000 K

Largest Kepler red giant



4500 K

Daniel Huber, University of Sydney



Chłodzenie neutrinowe: rozpad plazmonu

W dostatecznie gęstych jądrach helowych po raz pierwszy w historii życia gwiazdy pojawia się chłodzenie neutrinowe nie związane z reakcjami jądrowymi.

- procesy te polegają na emisji pary $\nu - \bar{\nu}$ (neutrino-antyneutrino)
- produkowane są wszystkie typy neutrin: ν_e, ν_μ, ν_τ
- procesem dominującym w gęstej, zdegenerowanej materii jest neutrinowy rozpad plazmonu („masywnego fotonu”):

$$\gamma^* \rightarrow \nu + \bar{\nu}$$

- skutkiem tego procesu zwykle jest dodatni gradient temperatury w jądrze: temperatura w centrum jest niższa!
- neutrina mają niskie energie, rzędu keV, uważa się je za niewykrywalne

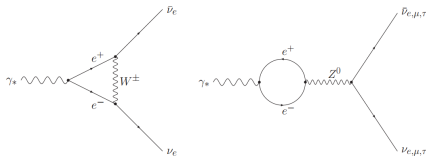
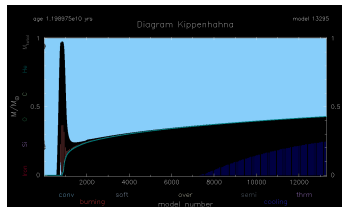


Fig. 3. Fenmann diagrams for plasmon decay.



Końcowe stadia ewolucji gwiazdy typu Słońca

- 1 spalanie H w powłoce; wzrost masy jądra He
- 2 degeneracja i chłodzenie neutrinowe jądra He
- 3 błysk(i) helowy(e), spalanie He w shell-u/ niecentralny zapłon He
- 4 zniesienie degeneracji jądra He
- 5 spalanie He w jądrze
- 6 utworzenie jądra C/O
- 7 impulsy termiczne (spalanie w 2 powłokach: $H \rightarrow He$ oraz $He \rightarrow C/O$)
- 8 odrzucenie otoczki/mgławica planetarna
- 9 biały karzeł
- 10 czarny karzeł (w przyszłości?)

Biały karzeł to stygnący obiekt o rozmiarach rzędu promienia Ziemi, masie rzędu masy Słońca, wysokiej temperaturze i małej jasności absolutnej.

Hipotetyczny przyszły stan białego karła o niskiej temperaturze określamy mianem czarnego karła.





Chcesz wiedzieć więcej?



Seminarium Astrofizyczne, każda środa 12:30, A-1-08 +
streaming przez Microsoft Teams