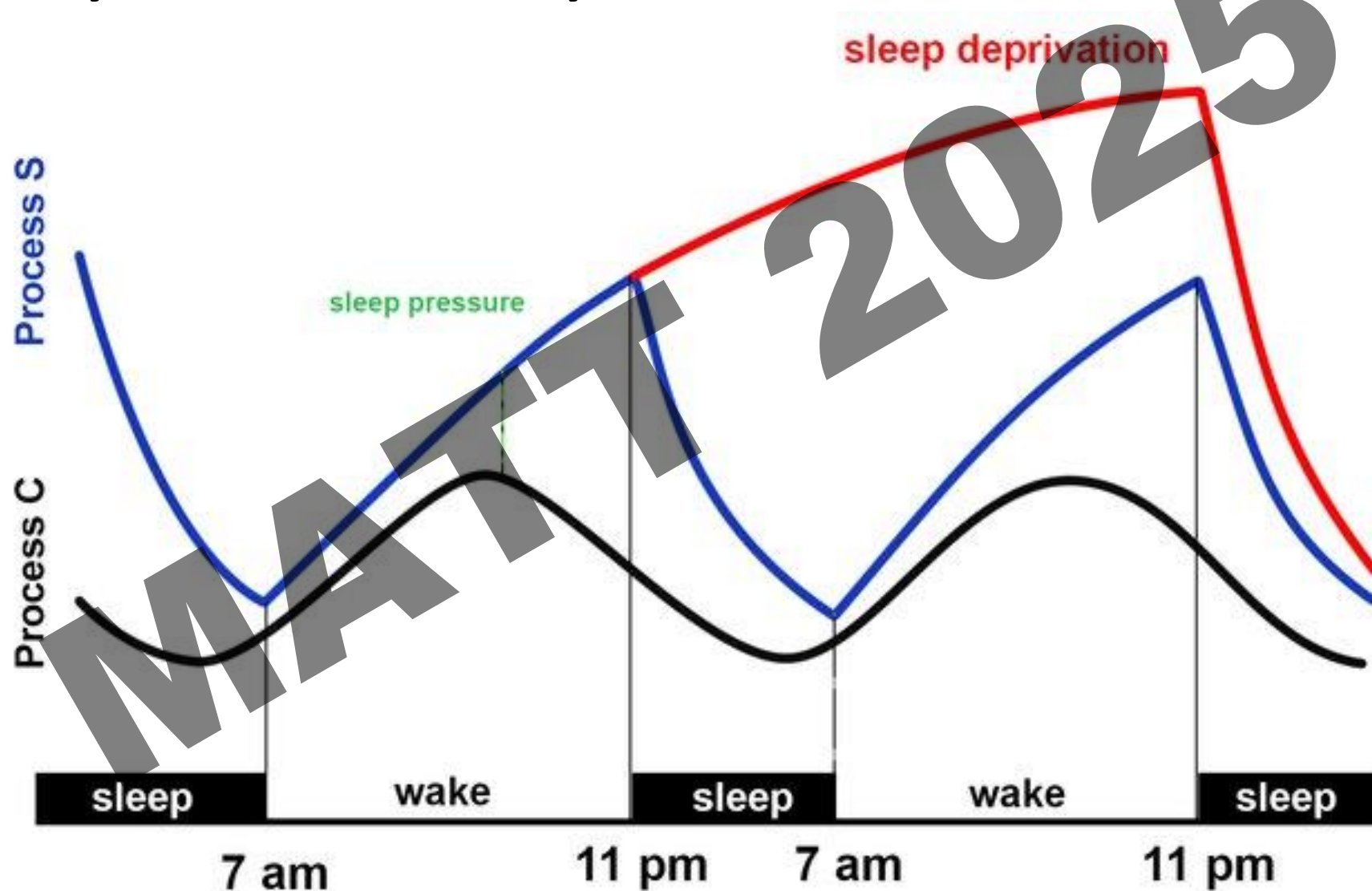


Az Agy egy Alapvető Biofizikai Paramétere Allometrikusan Skálázódik



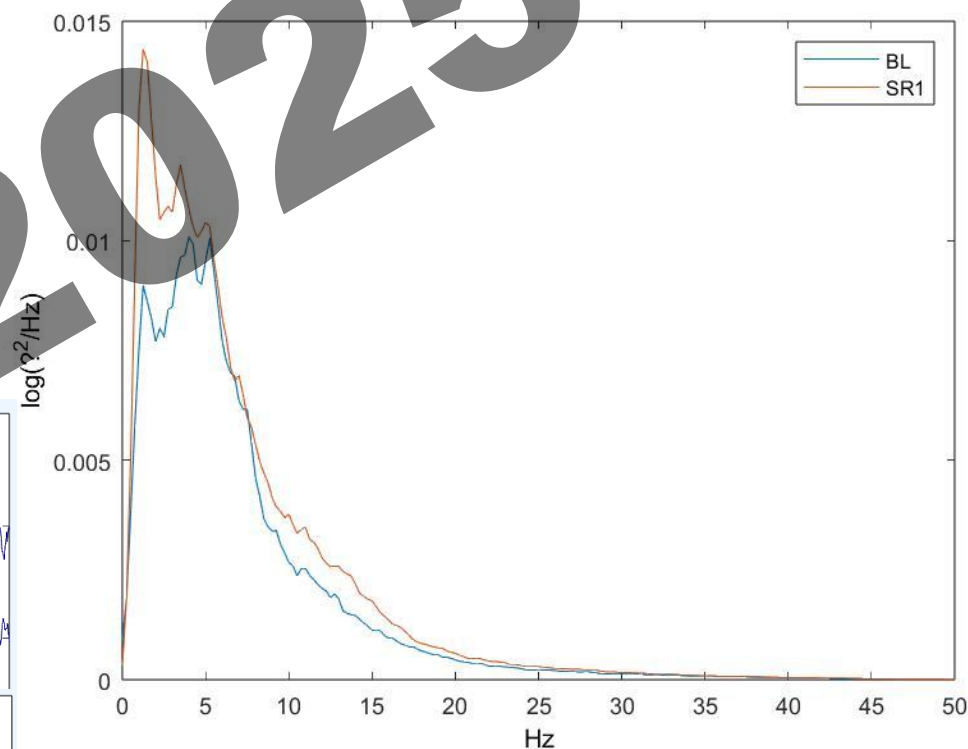
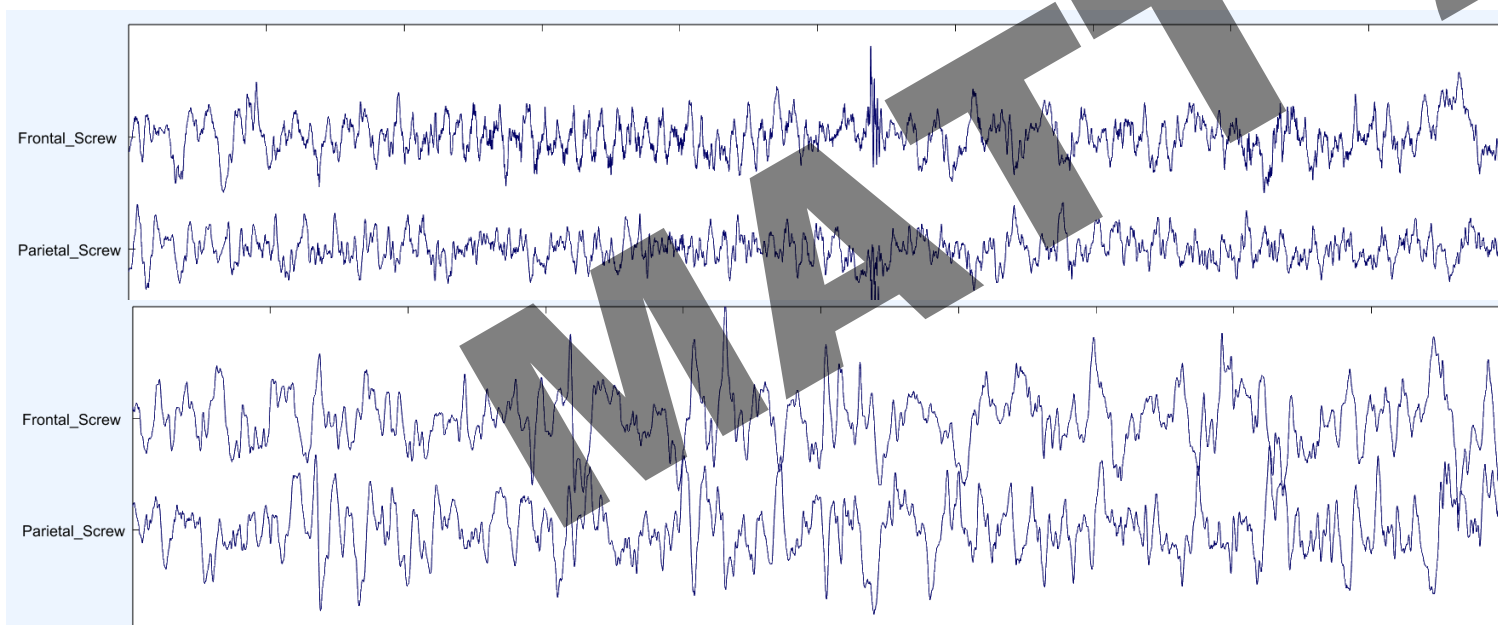
Magyar Tárek Zoltán
Dr. Szalárdy Orsolya
Prof. Dr. Bódizs Róbert

Borbély-féle két-folyamat modell



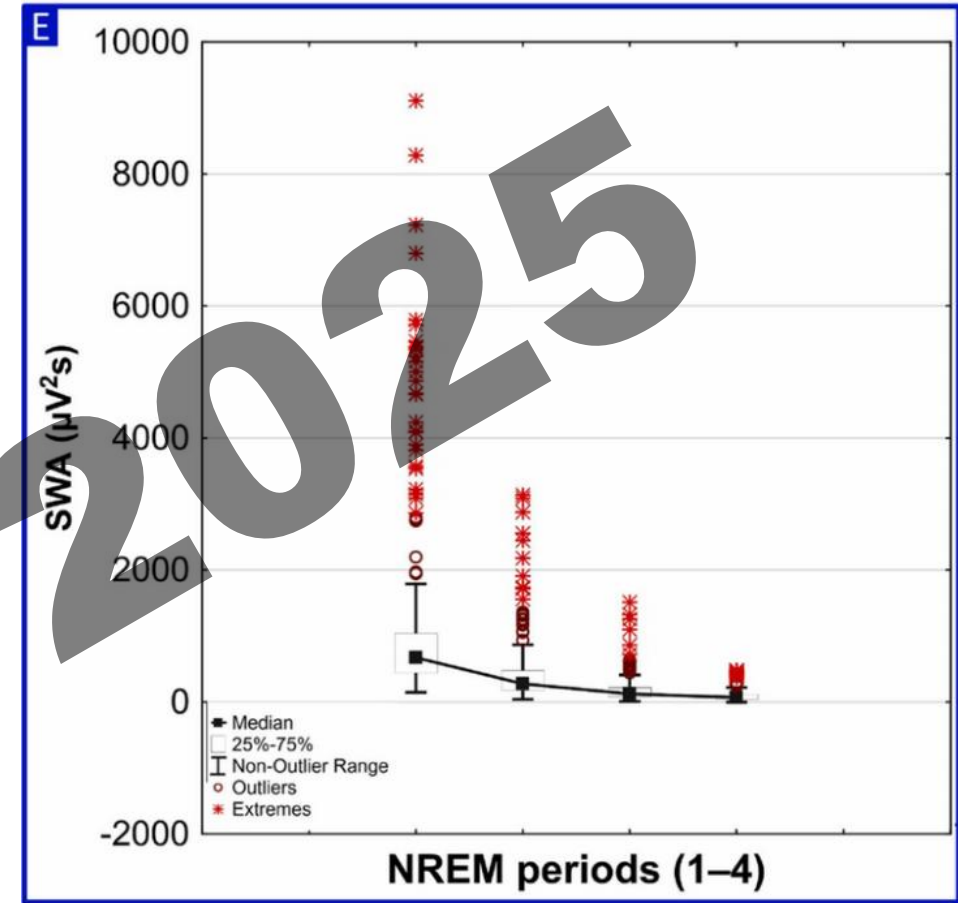
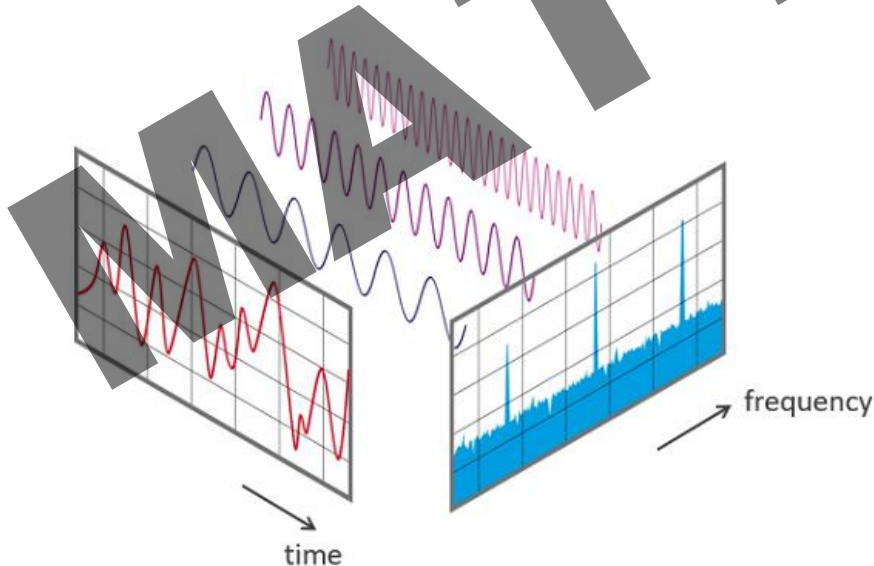
Lassú hullámú aktivitás (SWA; 0.75–4.5 Hz)

- S-folyamat
- Az alváshomeosztázis biomarkere.



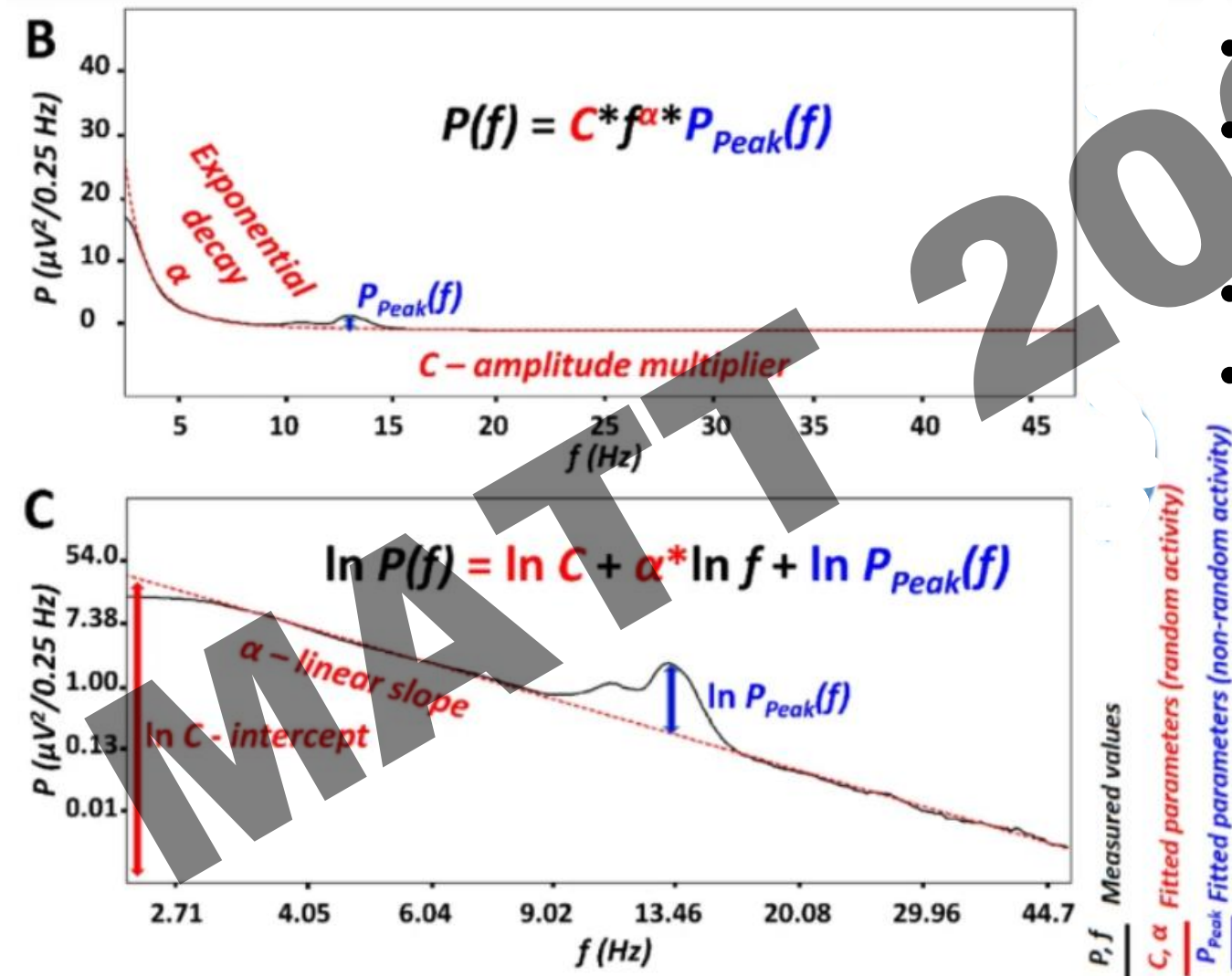
A Fourier transzformáció & SWA korlátai

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N}$$



- Magas inter-individuális variabilitás.
- Referencia hiánya.

A teljesítményspektrum fraktális paraméterei



- Spektrális meredekség
- Spektrális ordináta-tengely metszet
- Spektrális csúcs
- **Spektrális könyök (FOOOF)**

Módszerek: spektrumszámítás

- Teljesítmény spektrum sűrűség (PSD) Welch módszerrel volt számolva
- Hann ablak (szimmetrikus ablak, 4 sec, 50% átfedés)

- $x[n]$: bemeneti jel
- L : szegmens hossz
- K : szegmensek száma
- D : eltolódás
- $w[n]$: ablak függvény
- ω_m : frekvencia sáv
- U : ablak normalizáció

$$\hat{P}_{\text{Welch}}(\omega_m) = \frac{1}{KU} \sum_{k=0}^{K-1} \left| \sum_{n=0}^{L-1} x_k[n] w[n] e^{-j\omega_m n} \right|^2$$

$$\omega_m = 2\pi m / L$$

$$U = \frac{1}{L} \sum w^2[n]$$

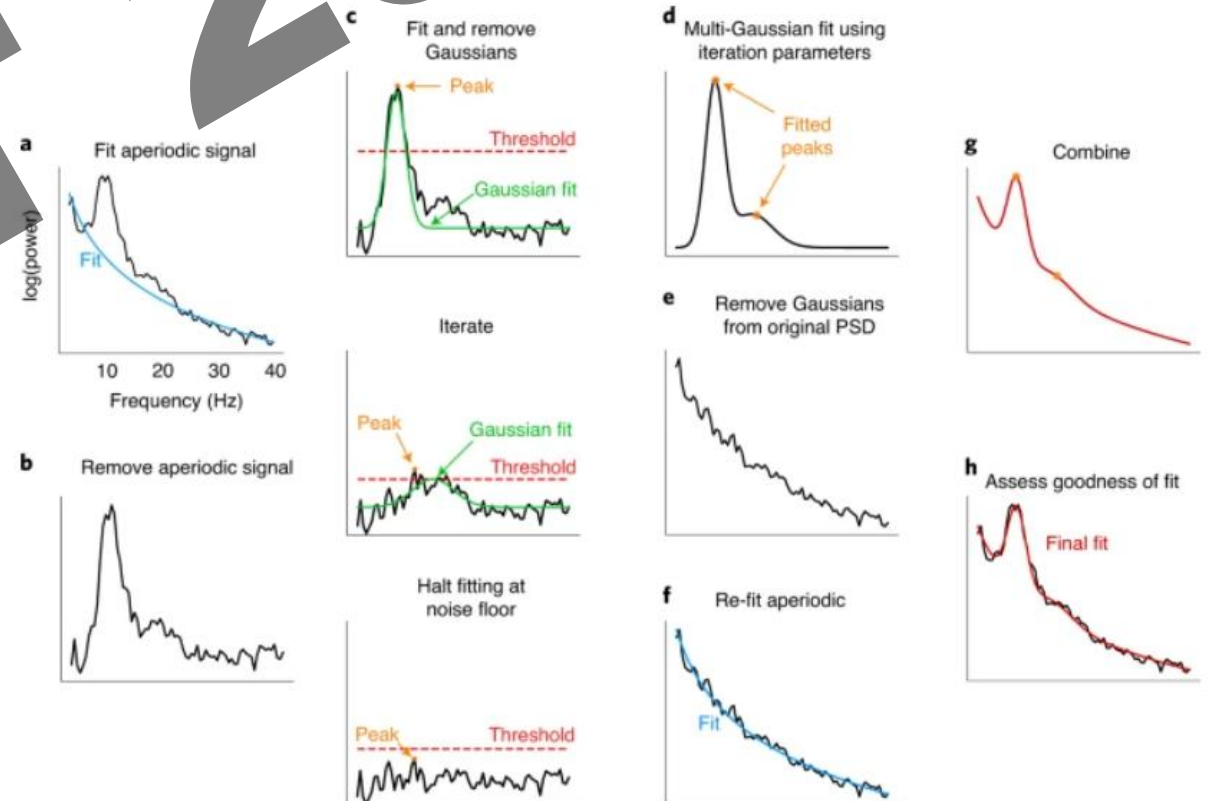
$$L = b - \log(k + F^\chi)$$

Módszerek: spektrális paraméterek

$$G_n = a \times \exp\left(\frac{-(F - c)^2}{2w^2}\right)$$

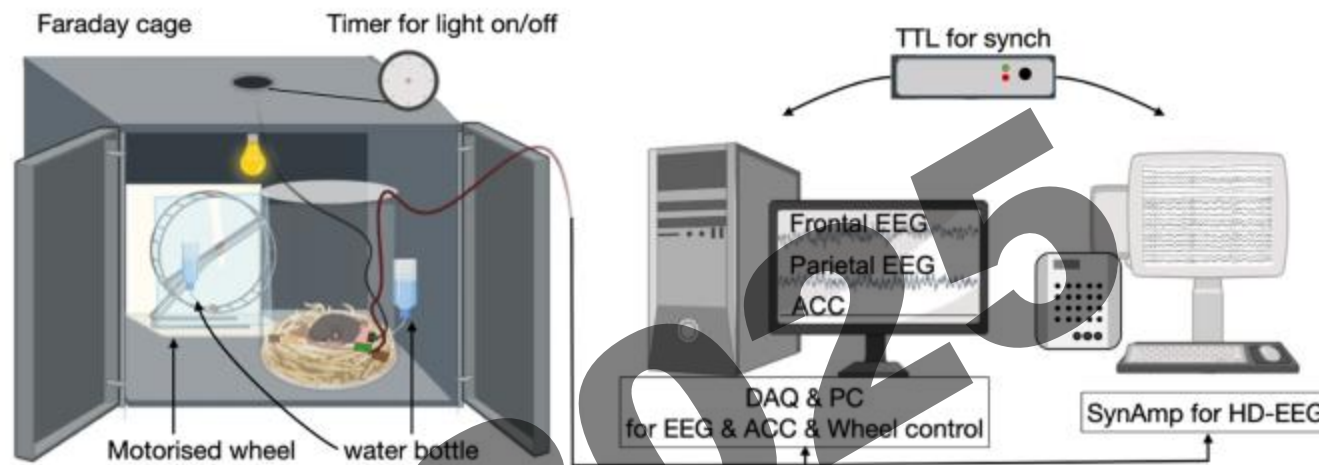
$$\text{knee frequency} = k^{1/\chi}$$

- FOOF - fitting oscillations & one over f
- Több Gauss folyamat (G_n)
- Egy aperiódikus komponens
 - Lorentzian függvény (L)
- **K = könyök**
- χ = spektrális meredekség
- Illesztés: 0.1 – 40 Hz

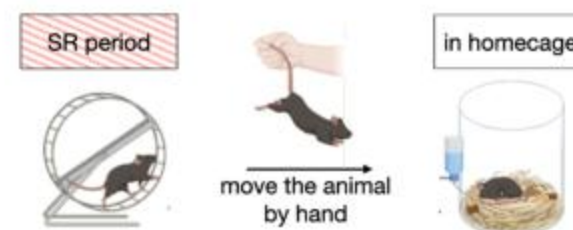
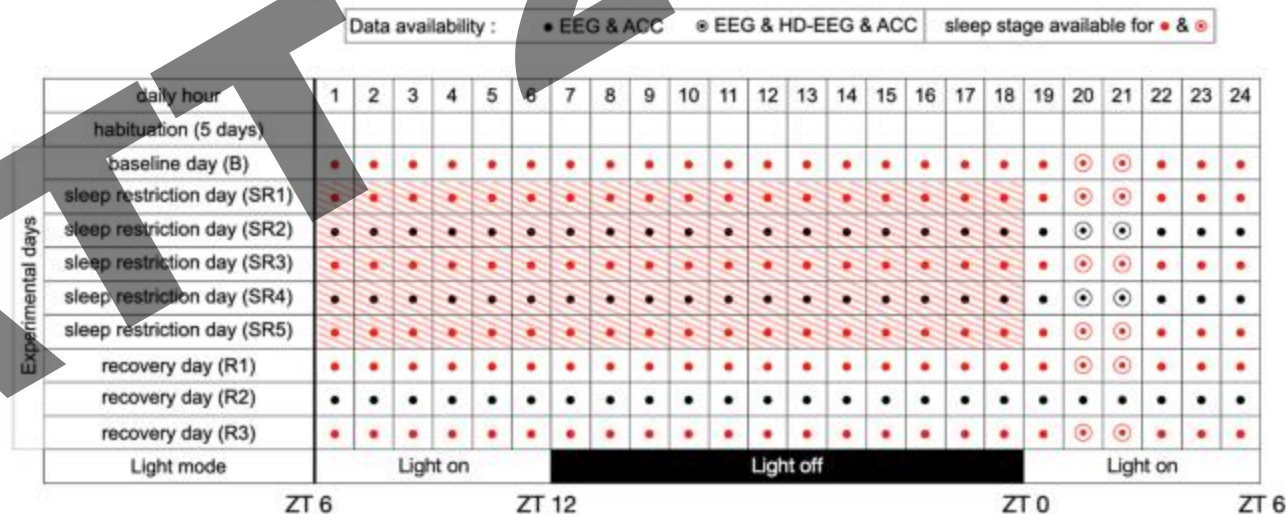


Kísérleti design

a. Experimental setup



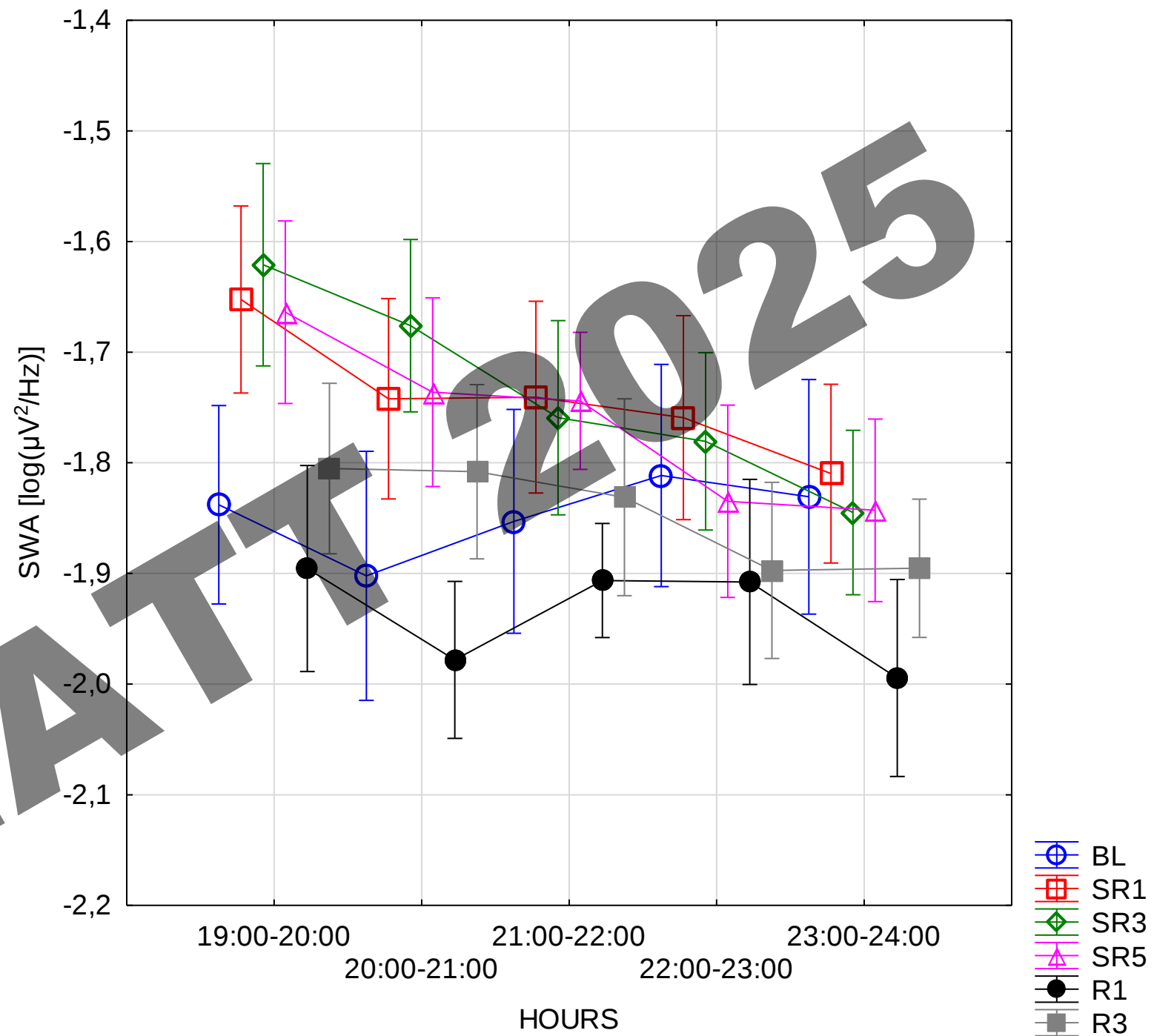
b. Experimental procedure



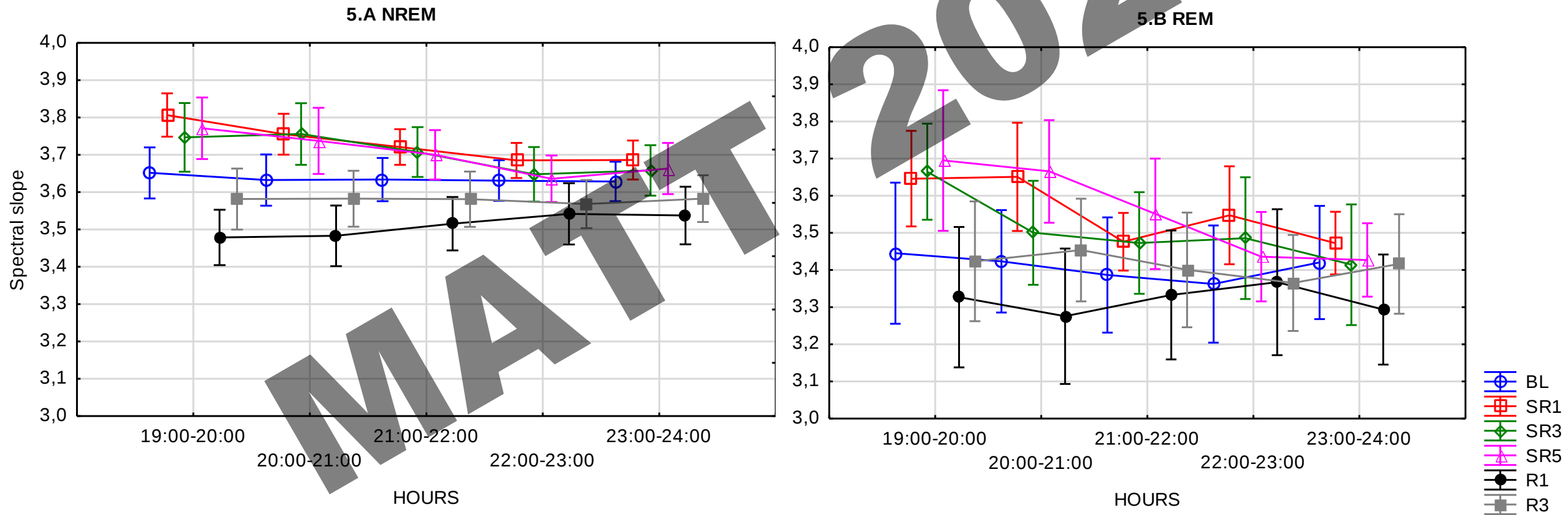
Data availability : ● EEG & ACC ⊙ EEG & HD-EEG & ACC sleep stage available for ● & ⊙

daily hour		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
habituation (5 days)																									
Experimental days	baseline day (B)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	⊙	⊙	●	●	●	●
	sleep restriction day (SR1)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	⊙	⊙	●	●	●	●
	sleep restriction day (SR2)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	⊙	⊙	●	●	●	●
	sleep restriction day (SR3)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	⊙	⊙	●	●	●	●
	sleep restriction day (SR4)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	⊙	⊙	●	●	●	●
	sleep restriction day (SR5)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	⊙	⊙	●	●	●	●
	recovery day (R1)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	⊙	⊙	●	●	●	●
	recovery day (R2)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	recovery day (R3)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	⊙	⊙	●	●	●	●
Light mode		Light on					Light off													Light on					
		ZT 6					ZT 12												ZT 0						ZT 6

SWA
NREM
során



Spektrális meredekség NREM és REM során

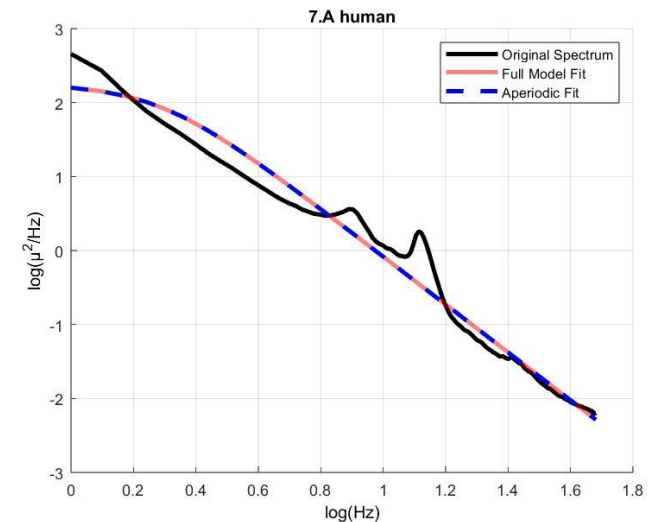
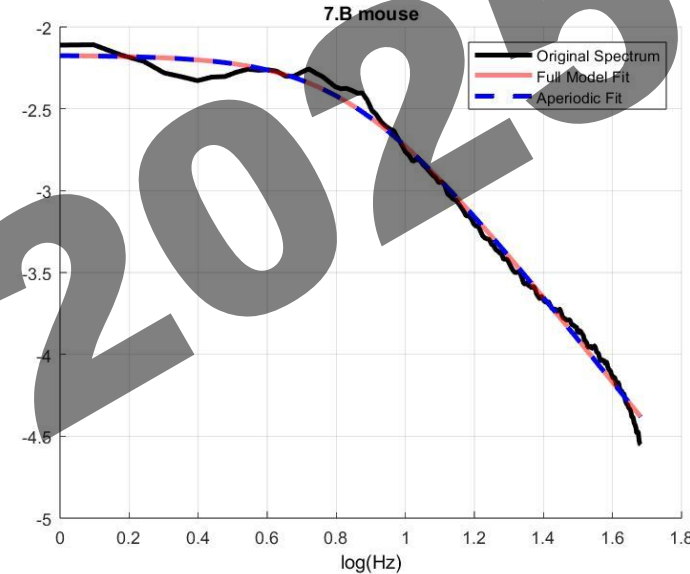


Eredmények

- **SWA** csak NREM alvás során mutat összefüggéseket az alvásmegvonással.
- **Spektrális meredekség** NREM és REM alvás alatt is reflektál az alvásmegvonásra.
- Tehát, a spektrális meredekség az alváshomeosztázisnak egy érzékenyebb indexe.

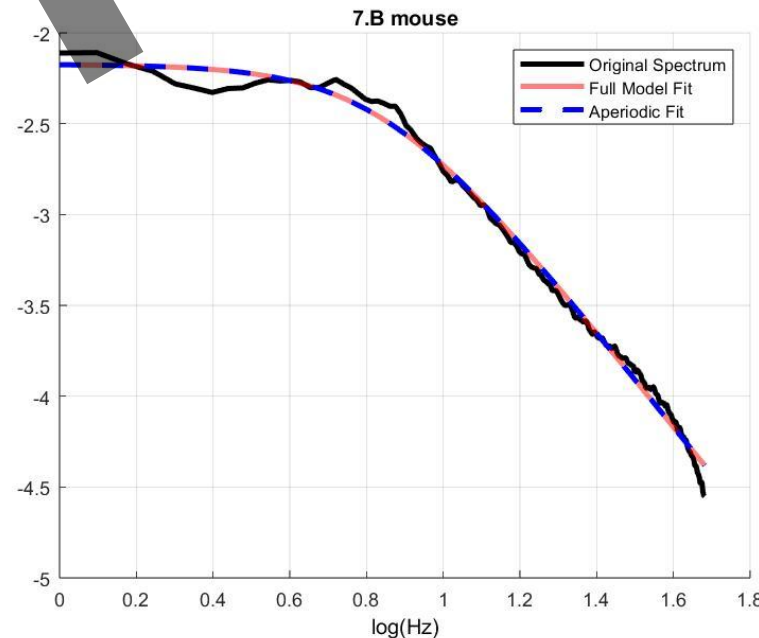
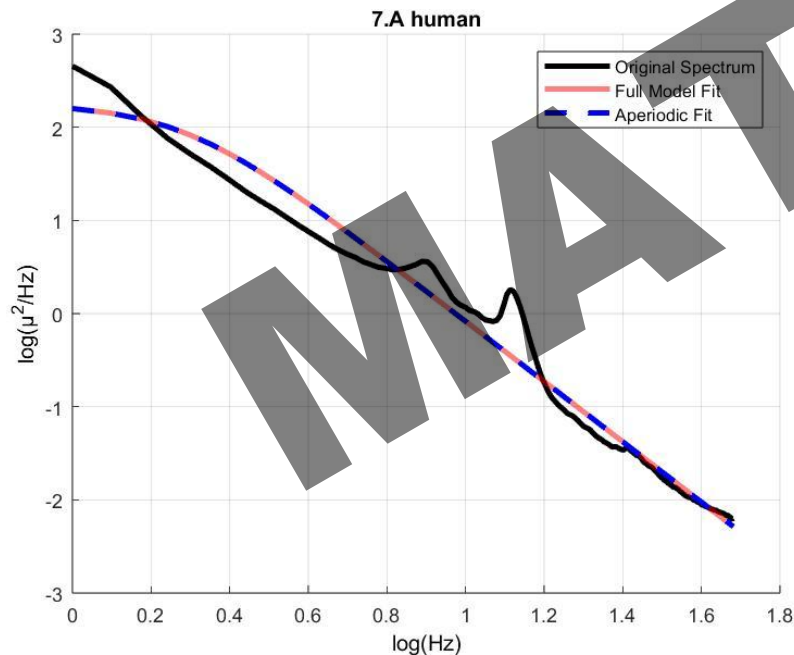
Nem várt eredmény: Spectral knee frekvencia

- Egér spectral knee: ~9–10 Hz
- Humán spectral knee: ~1 Hz
- Tipikus SWA tartomány: 0.75–4.5 Hz
- **A jobbra tolódástól függetlenül reflektál a spectral slope az alváshomeosztázisra!**
- Ez az eredmény megkérdőjelezi az eddigi biomarker határokat.



A véges méret korlátozza a lassú hullámú koherenciát

- A kisebb rendszerek (pl. egéragy) nem képesek fenntartani a globális, lassú frekvenciájú oszcillációkat,
- ami a spektrális könyök jobbra (a magasabb frekvenciák felé) tolódását okozza,
- és a fraktális tartomány csökkenéséhez vezet.



Kritikalitás és skálainvariancia az agyműködésben

- **Komplex rendszerek különböző állapotokkal jellemezhetők, amelyek eltérő energiaszintekkel bírnak.**
 - **Szubkritikusság:** alacsony energiaszintű állapotok (amelyeket az egységesség ural).
 - **Szuperkritikusság:** magas energiaszintű állapotok (amelyeket a véletlenszerű ingadozások uralnak).
 - **E két állapot között** fázistranzíciók zajlanak (kritikalitás).
- **A kritikalitás bizonyos tulajdonságokkal jellemezhető:** skálainvariancia, fraktalitás, hatványfüggvény-eloszlások.
- **Kritikus agy hipotézis:**
 - Az idegi dinamika egy spektrumként értelmezhető: **Kómás agy → szubkritikus vs. Epilepsziás agy → szuperkritikus**
- A két maladaptív állapot között létezik egy (**kritikus**) tartomány, amely optimális kompitációs tulajdonságokkal rendelkezik.
- **A skálainvariáns dinamika az agyban a kritikalitásra utal!**

A kritikalitás véges rendszerekben

- A valódi kritikus viselkedés csak a termodinamikai limitben jelenik meg (végtelen rendszert feltételezve).
- **Azonban, a véges rendszerek lekerekített fázistranzíciókkal jellemezhetőek.**
- A lekerekített átmenetek nyilvánvalóak a **Renormalizációs Csoport (RG) áramlásában**.
 - Az RG-áramlás a rendszer tulajdonságait írja le, ahogy **ránagyítunk vagy kicsinyítünk**.
 - A termodinamikai limitben az RG-áramlás **rögzített egy pontban (skálainvariáns)**.
 - Véges rendszerekben az RG-áramlást **a rendszer határai megszakítják**.

Allometrikus skálázódás

- **A spektrális könyök a kritikalitás véges méretű közelítését tükrözi:** azt a határt írja le, ahol a globális koherencia összeomlik.
- Ez összhangban áll a **véges-méret skálázás (FSS)** elmélettel, vagyis azzal a felismeréssel, hogy a véges rendszerekben tett előrejelzések az **végtelen rendszer dinamikából történő extrapolációtól függenek.**
- Ezért a véges rendszerekben – például a biológiai rendszerekben – a fázisátmenetek **lekerekítettek.**
- Tehát, feltételezésünk szerint a rendszer méret egy releváns mutatója a rendszer viselkedésének a felszíni neurofiziológiai teljesítményspektrum kontextusában.

Hipotézis: A spektrális könyök allometrikusan skálázódik

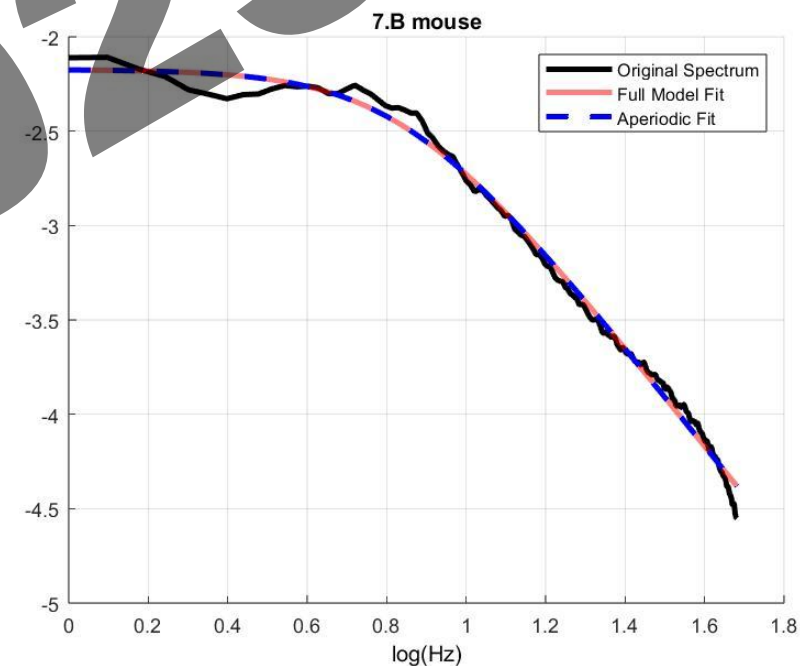
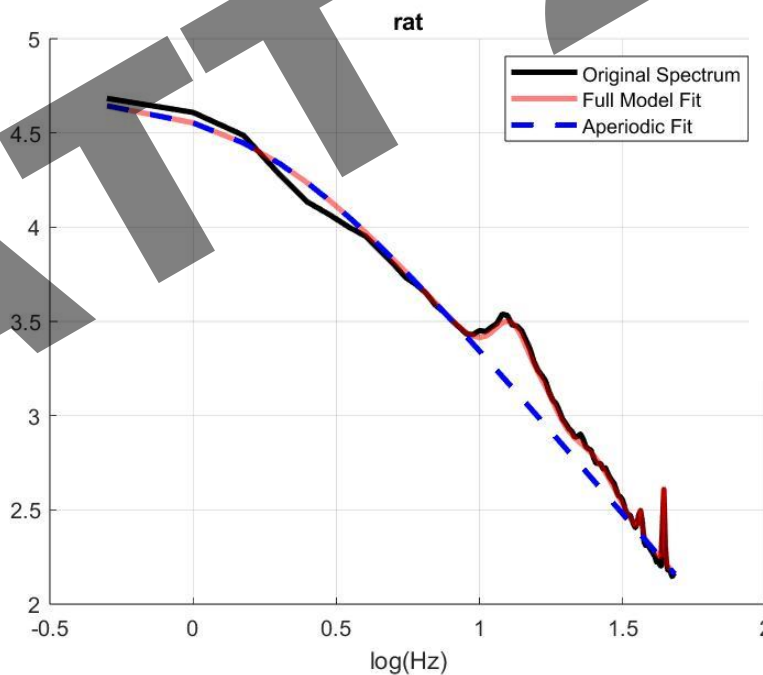
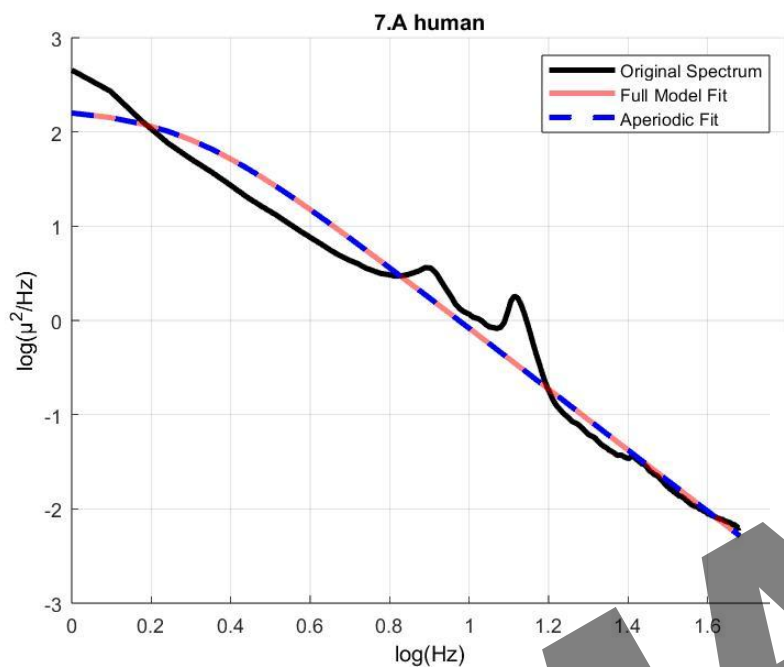
- **A spektrális könyök allometrikusan skálázódik.**
- $X \propto \frac{1}{Y},$
- ahol X az agyméret és Y a spektrális könyök.

Minta

- Kísérleti manipuláció nélküli, 24 órás ECoG felvételek.
- **Egér** (N = 9) - ECoG – frontális csatorna
- **Patkány** (N = 15) - ECoG – frontális csatorna
- **Ember** (N = 6) - ECoG (epilepszia betegek) – frontális csatorna

Agyméret	Egér	Patkány	Ember
Volumen (mm ³)	415 mm ³	1,765 mm ³	1,200,000 mm ³
Denzitás (synapses/mm ³)	7.2×10^8	8.7×10^8	1.1×10^9

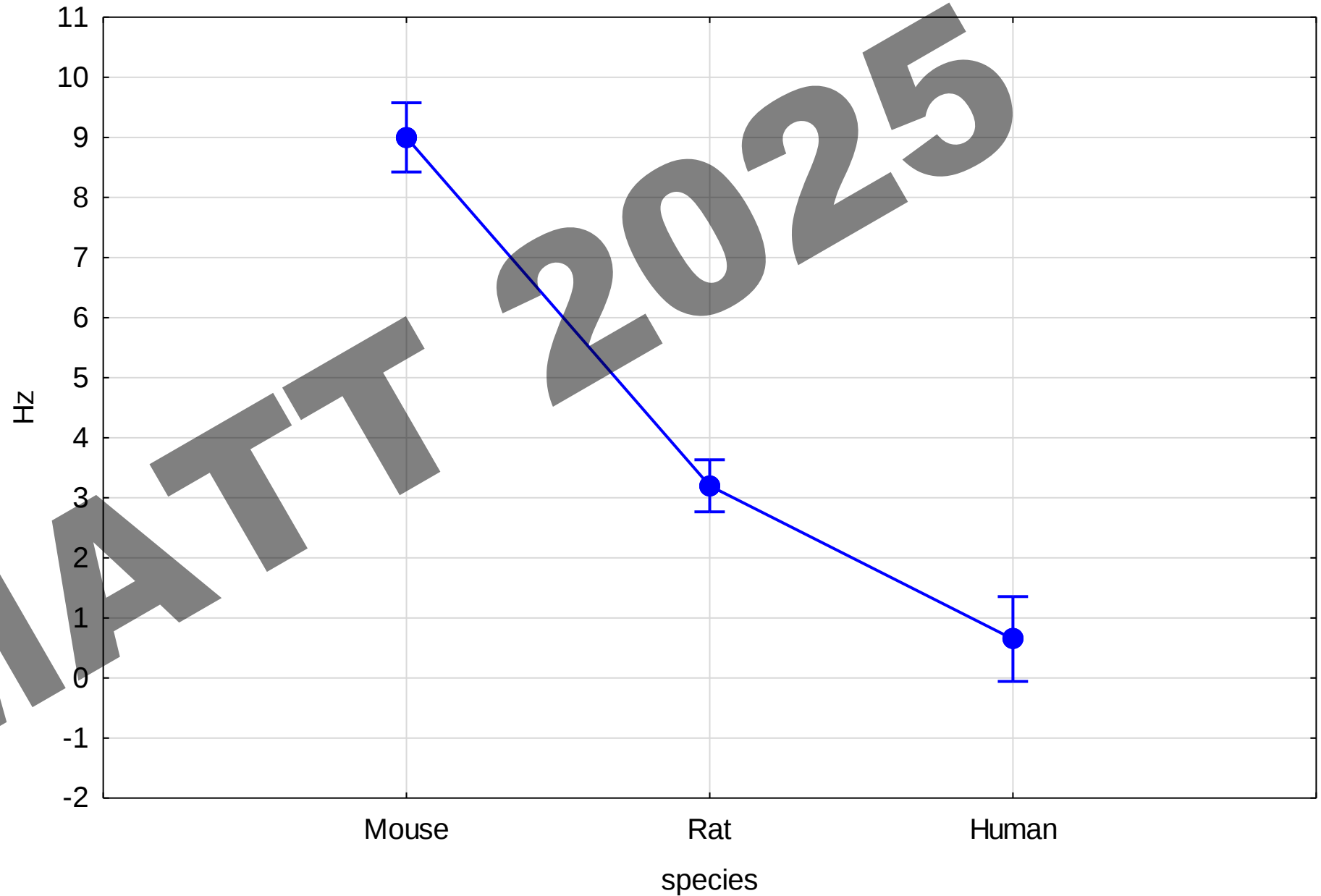
A spektrális könyök komparatív tanulmányozása



Spektrális könyök a 3 fajban

Current effect: $F(2, 28)=49,692$, $p=,00000$

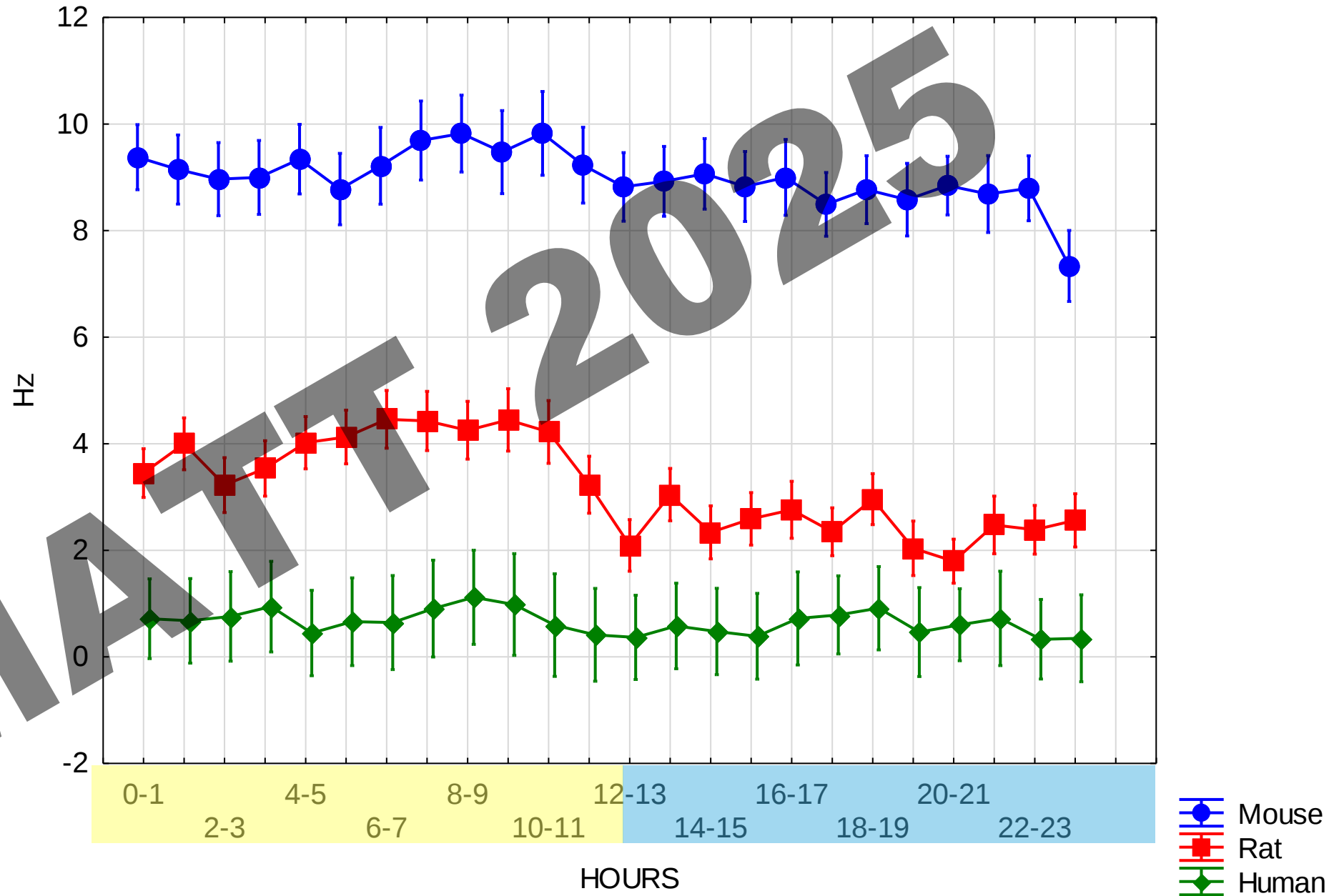
Vertical bars denote $\pm$ standard errors



Spektrális könyök 24 órás dinamikája

Current effect: $F(46, 644)=1,8054$, $p=,00117$

Vertical bars denote $\pm$ standard errors



Diszkusszió & jövőbeni kutatási irányok

- A spektrális könyök allometrikusan skálázódik.
- Amely arra utal, hogy a kisebb agyak kevésbé hatékonyak a lassú oszcillációk generálásában,
- ami potenciálisan kevésbé mély és restoratív alvást eredményezhet.
- **Rhesus Macaque** adatok beszerzése folyamatban.
- Lehetséges bifraktál folyamatok húzódnak meg a frekvenciatartománybeli tulajdonságok mögött, amelyeket a hálózati komplexitás vezérelhet.