

# Elektron-gyorsítás Alfvén-hullám impluzusok által aktív galaxismagokban

Előadó: Kun Emma, PhD hallgató, SZTE

Témavezető: Gergely Árpád László, SZTE

Munkatársak:

Horváth Zsolt, SZTE

Keresztes Zoltán, SZTE

Gabányi Krisztina Éva, SZTE, CSFK KTM

FIKUT VII, 2014, Budapest



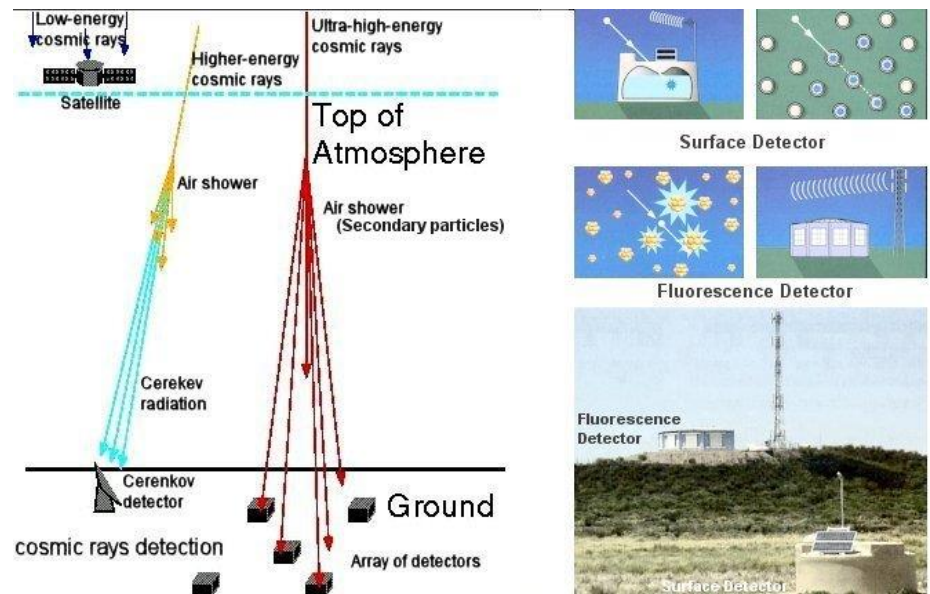
# Tartalom

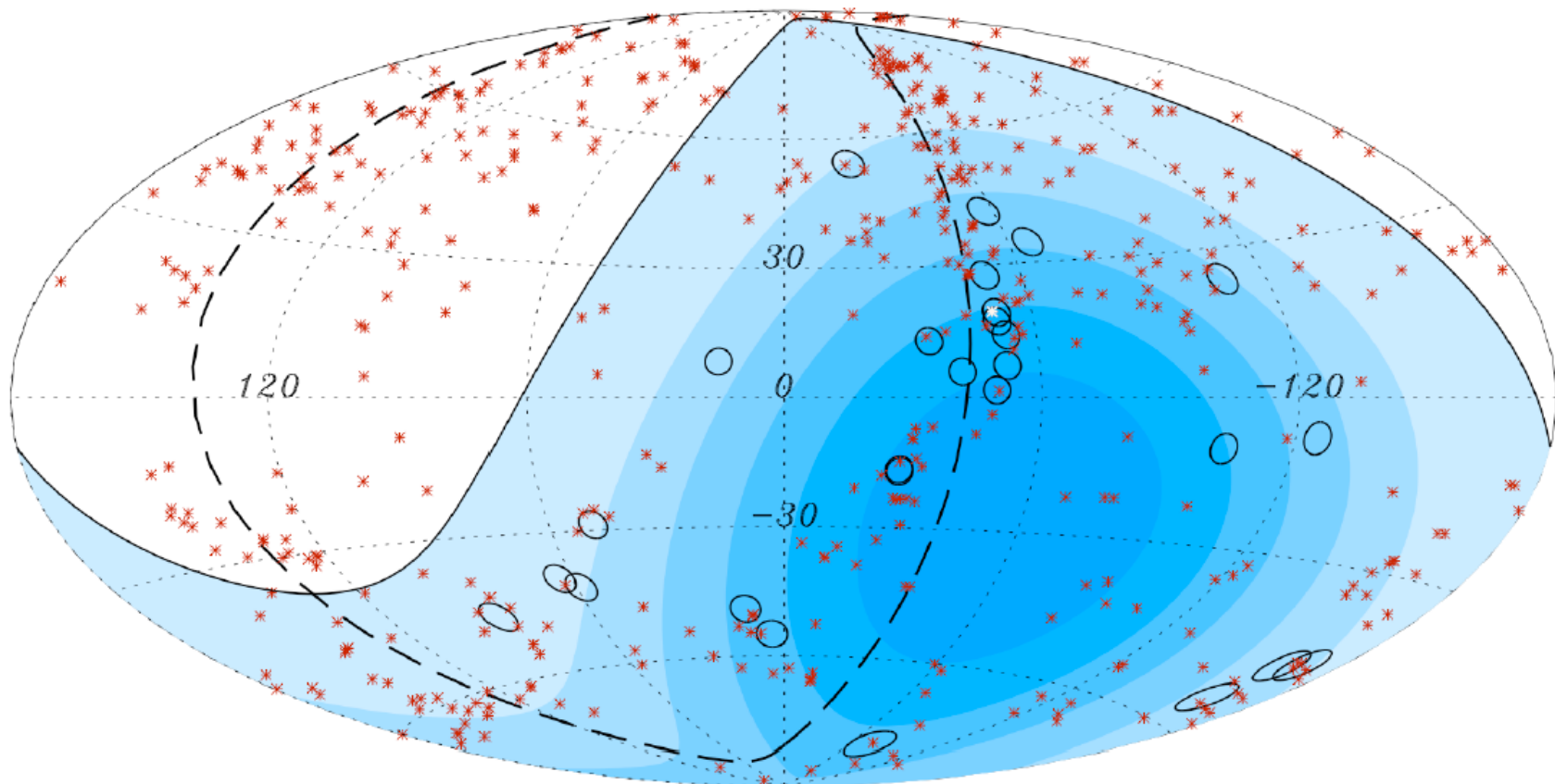
---

- Ultranagy Energiájú Kozmikus Részecskék
- Elektromgyorsítós mechanizmusok
- Alfvén-hullám impulzus
- Asztrofizikai alkalmazás és első eredmények

# UHECRs

- Első detektálás 1962-ben (J. Linsley, 1963, *Phys. Rev. Lett.* 10 146)
- Nagyenergiájú, nyugalmi tömeggel rendelkező töltött részecskék Kinetikus energia  $10^{18}\text{eV}$ - $10^{20}\text{eV}$
- **Elsődleges** UHECRs  
Extragalaktikus eredetű  
 $\alpha$ ,  $p^+$ ,  $e^-$ , kevés antianyag
- **Másodlagos** UHECRs  
Az elsődleges részecske belép a Föld légkörébe, ütközik annak részecskéivel, és a kölcsönhatás másodlagos részecskék kaszkádját indítja el  
 $\gamma$ ,  $p^+$ ,  $e^-$ ,  $n^0$ ,  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ ,  $\mu^-$





AGN-ek (VCV katalógus,  $z < 0.018$ ,  $D < 75$  Mpc, vörös x-ek)

27 UHECR esemény,  $E > 5.7 \times 10^{19}$  eV (GZK limit), fekete körök ( $3.2^\circ$ )

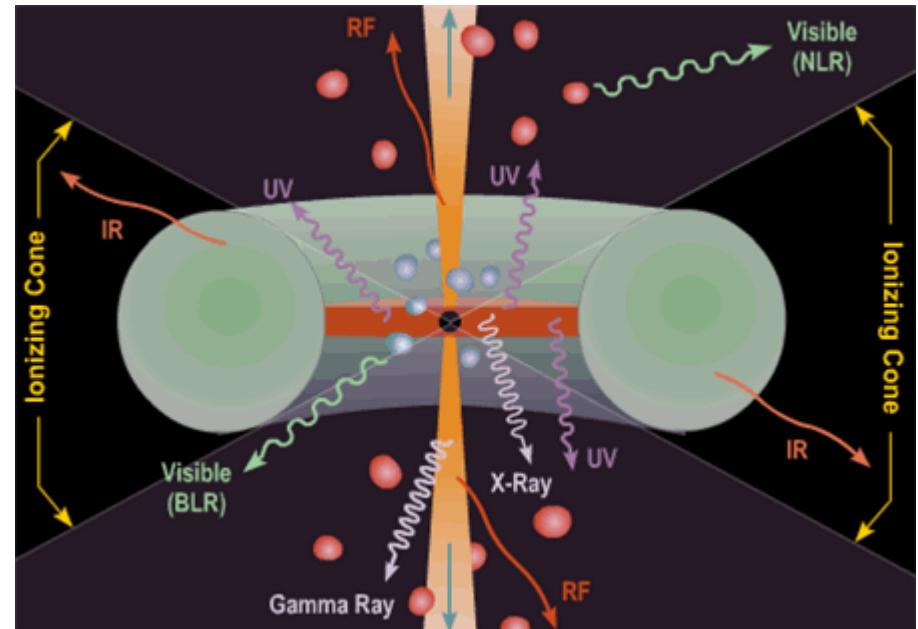
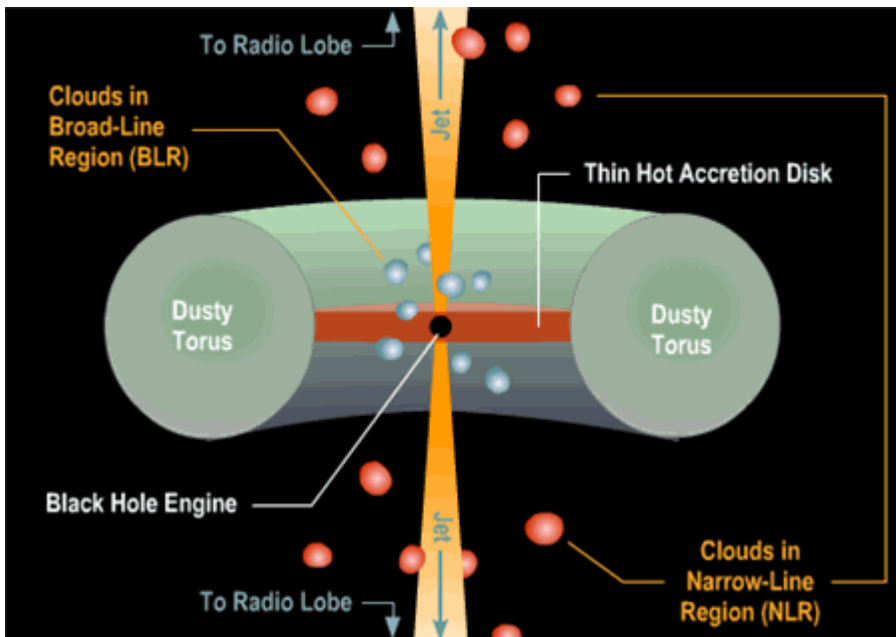
A Pierre Auger Observatórium látómezeje (egyenes vonalak között)

Egyenlő expozíciók (a kéken sáírozott részek)

A szaggatott vonal a Szupergalaktikus síkot, a fehér pont a Centaurus A-t jelzi

# Aktív galaxismagok

- A központi égitest egy  $10^6$ - $10^9$  naptömegű fekete lyuk
- Az akkréció szolgáltatja az energiaforrást
- Az észlelt AGN típus a jetre való rálátási szögtől függ



# Asztrofizikai gyorsítás

- Fermi gyorsítás

Töltött részecskék energiát nyernek ütközésekből, mágneses közegben

- Hillas kritérium

$$W_{\max} \sim z (B/1\mu\text{G}) (R/1 \text{ kpc}) E_e V$$

$z$  töltés  
 $B$  mágneses térerősség  
 $R$  a gyorsító közeg mérete

- $W_{\max} \sim 10^{20} \text{ eV}$

Neutroncsillag, AGN, GRB, sokkok az intergalaktikus közegben

- Problémák a Fermi folyamattal

- túl sok ütközés kell ilyen nagyenergiákra való gyorsításhoz
- többszörös ütközések, inkoherens és sztochasztikus gyorsítások
- a szinkrotron emisszió energiát visz el

- Alternatív mechanizmus szükséges, ami képes nagy energiákra gyorsítani  $p^+, e^-, n^0$ -at, kozmikus feltételek mellett

# EM hullám és részecske kölcsönhatás

- "wakefield" gyorsítás nem a részecskék egymás közötti kölcsönhatása okozza, hanem egy "külső" elektromágneses hullám
- A hullám terjedési sebessége közel a fénysebesség
- Relativisztikus amplitúdó  
A részecske relativisztikus sebességre gyorsul egy oszcillációs periódus alatt
  - E: elektromos tér (hullám)
  - $\omega$ : frekvencia (hullám)
  - $e_j$ : töltés (részecske)
  - $m_j$ : nyugalmi tömeg (részecske)
- A gyorsító tér és a részecskék egy irányba mozognak közel hasonló sebességgel
- Az egyenes vonalú terjedés miatt nincs szinkrotron emisszió

# Alfvén hullámok

- Neutroncsillagok ütközésénél  $10^{20}$  eV -ra gyorsít speciális körülmények között
- Alfvén hullám
  - analógia: hullám terjed egy kifeszített kötél mentén
  - mágneses feszültség szolgáltatja a visszatérítő erőt "magnetic tension" [ $\text{N/m}^3$ ]
  - töltött részecskék együtt oszcillálnak a mágneses térrel
  - transzverzális és diszperziómentes

(©L. H. Lyu and M. Q. Chen, Institute of Space Science)

A 3-D View of Alfvén wave propagation

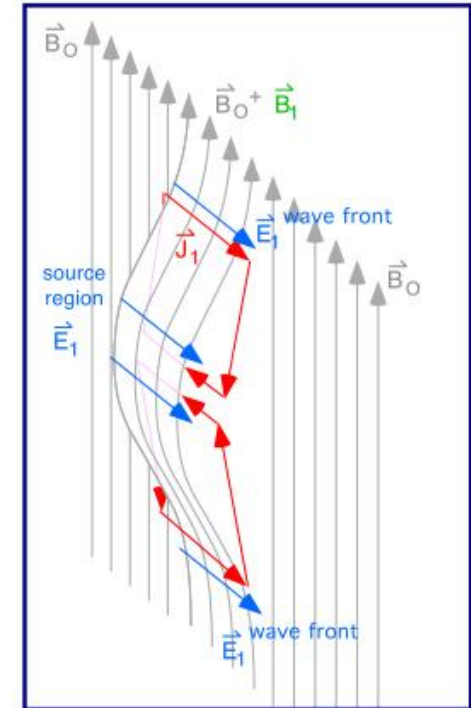
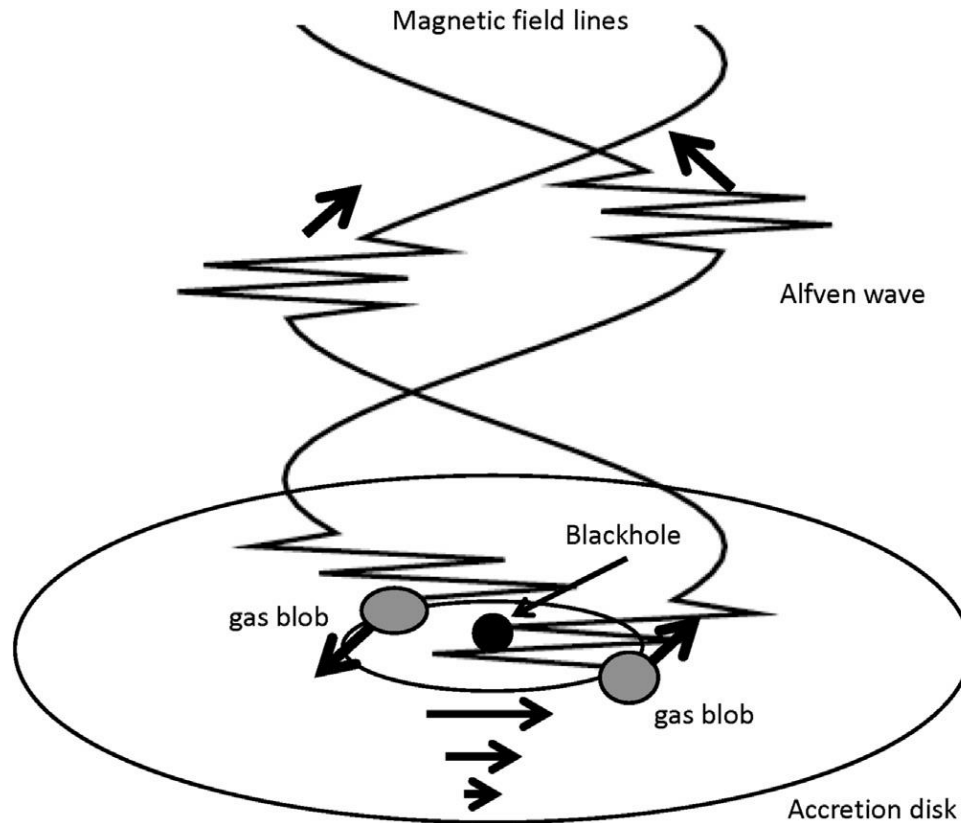


Figure 1



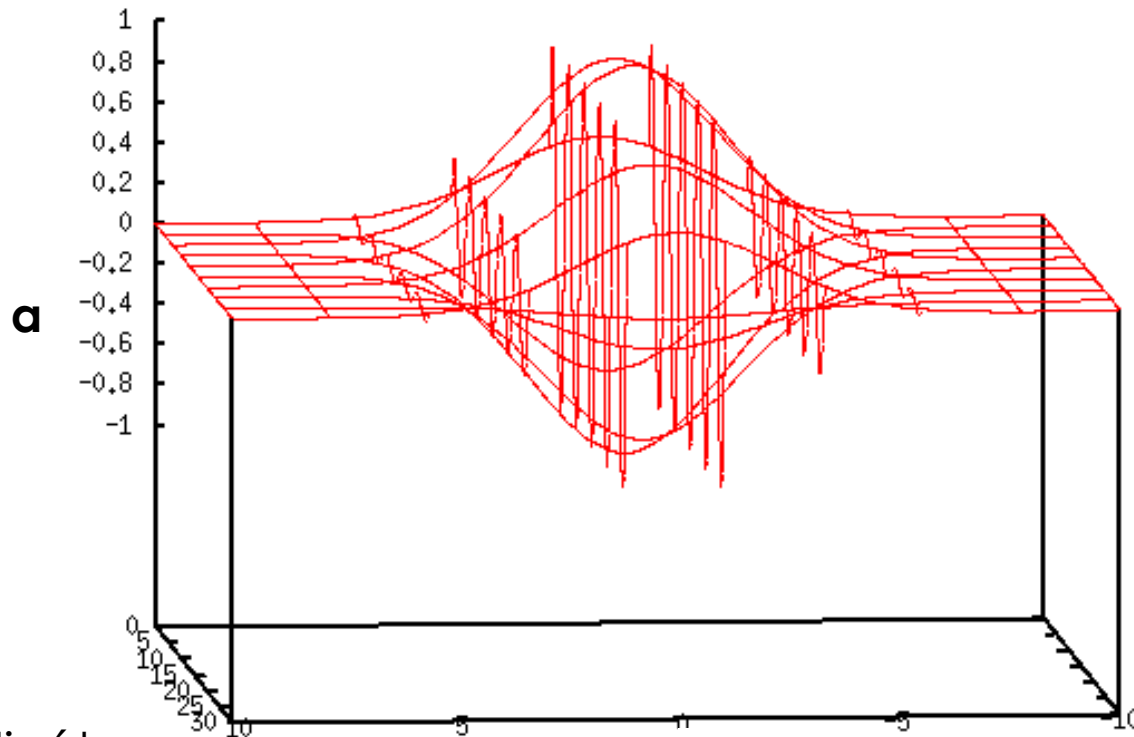
# Alfvén-hullám impulzus generálása



- Erősen és gyengén mágnesezett állapotú anyaggyűrűk váltakoznak az akkréciós korongban
- Erős Alfvén-hullám impulzusok generálódnak a korongban az átmeneteknél

# Vektorpotenciál

$$\mathbf{a} = (0, a \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \cos(kz - \omega t) \mathbf{e}_x, 0, 0)$$



$z$ , axiális koordináta

$r$ , radiális koordináta ( $y=0$ )

## • Vektorpotenciál

- $r$ : radiális koordináta (m)
- $z$ : axiális koordináta (m)
- $r_0$ : a nyálábnyak átmérője (m)
- $k=2\pi/\lambda_A$ : hullámszám (1/m)
- $\omega=ck$ : frekvencia (1/s)
- $z$ : terjedési irány, axiális koordináta (m)

$$\mathbf{a} = a_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \cos(kz - \omega t) \mathbf{e}_x$$

## • A bemenő paraméterek

- $2\pi/\omega_A=2.0 \times 10^2 \times (\dot{m}/0.1)(m/10^8) \text{ s}$
- $\lambda_A=5.8 \times 10^{10} \times (\dot{m}/0.1)(m/10^8) \text{ m}$
- $a_0=2.3 \times 10^{10} \times (\dot{m}/0.1)^{3/2} (m/10^8)^{1/2} (D/3R_g)^{-1/2}$
- $V_A=2.4 \times 10^7 (\dot{m}/0.1)$ 
  - $\dot{m}$ :  $\dot{m}_0$  akkréciós ráta normálva  $\dot{m}_c$  kritikus akkréciós rátával ( $\dot{m}_c=L_{\text{Edd}}/0.06c^2$ )
  - $m$ : központi fekete lyuk tömege napegységben
  - $D$ : a fekete lyukhorizontjától való távolság a jet mentén
- $n_e(r, \gamma_e)=n_1(r/1\text{pc})^{-n} \gamma_e^{-(2\alpha+1)}$ , elektronsűrűség
  - $\gamma_e$ : elektron Lorentz faktor
  - $n_1$ : forrás-függő normáló faktor (1/cm<sup>3</sup>)
  - $n$ : a jet geometriájától függő konstans ( $n=2$  folytonos jet)
  - $r$ : távolság a magtól (pc)
  - $\alpha$ : spektrálindeks

$$R_s=2Gm/c^2$$

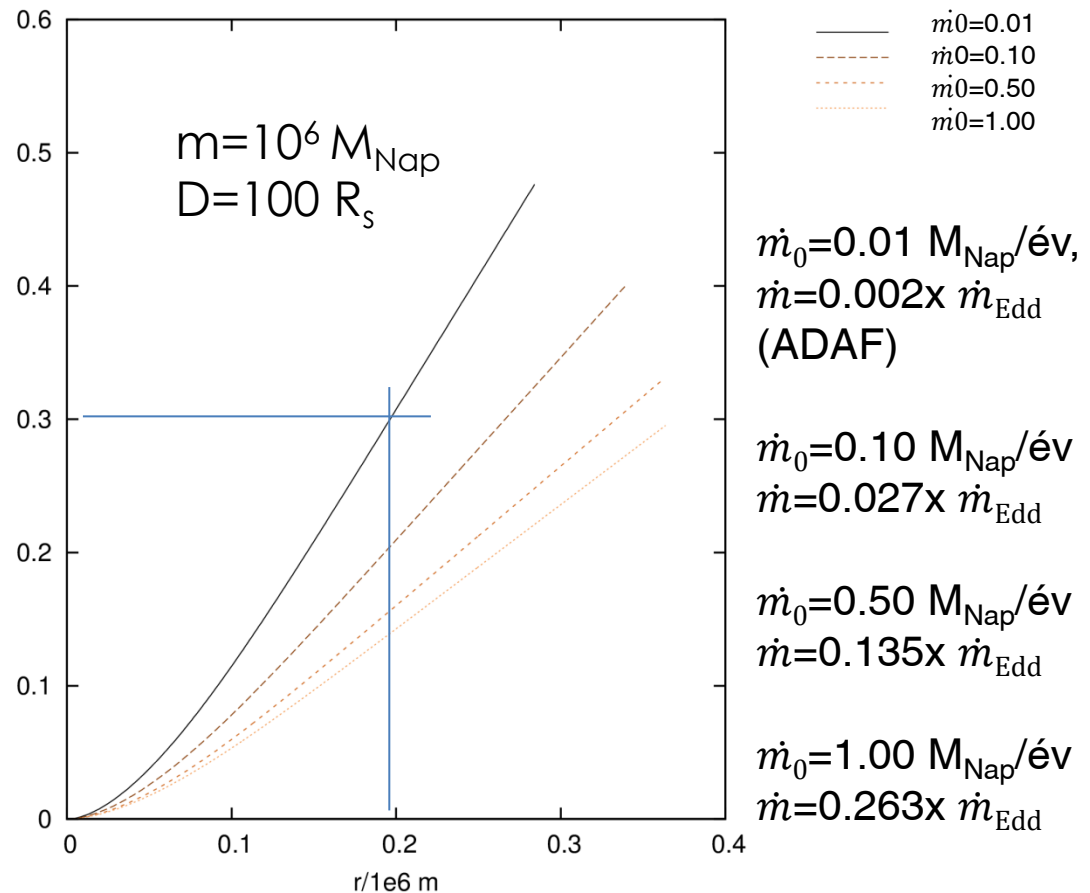
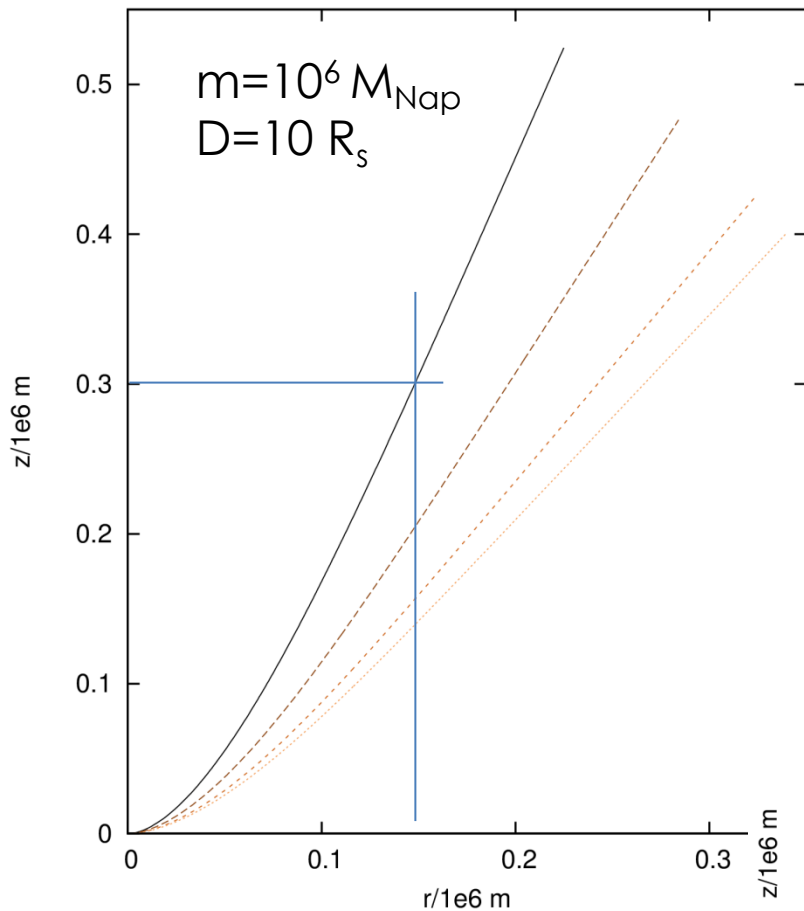
$$L_{\text{Edd}}=1.26 \times 10^{31} (m/m_{\text{Nap}}) W$$

# Első eredmények

- Minkowski téridőben érvényesek a számolások
- Hengerszimmetrikus koordinátarendszer
- 2D (ct, r, z függés,  $\varphi=0$ )

Paramétertér próbálgatása, karakterisztikus viselkedés leírása

- $r_0=1000\text{m}$ ,  $z_0=0$ , az elektron kezdeti koordinátái
- $v_r=0$ ,  $v_z=0.0001\text{c}$ , az elektron kezdősebessége
- $m [m_{\text{Nap}}] \in [10^6, 10^7, 10^8, 10^9]$  szupermasszív fekete lyuk
- $\dot{m}_0 [m_{\text{Nap}}/\text{év}] \in [0.01, 0.1, 0.5, 1]$
- $D[R_s] \in [10, 100]$



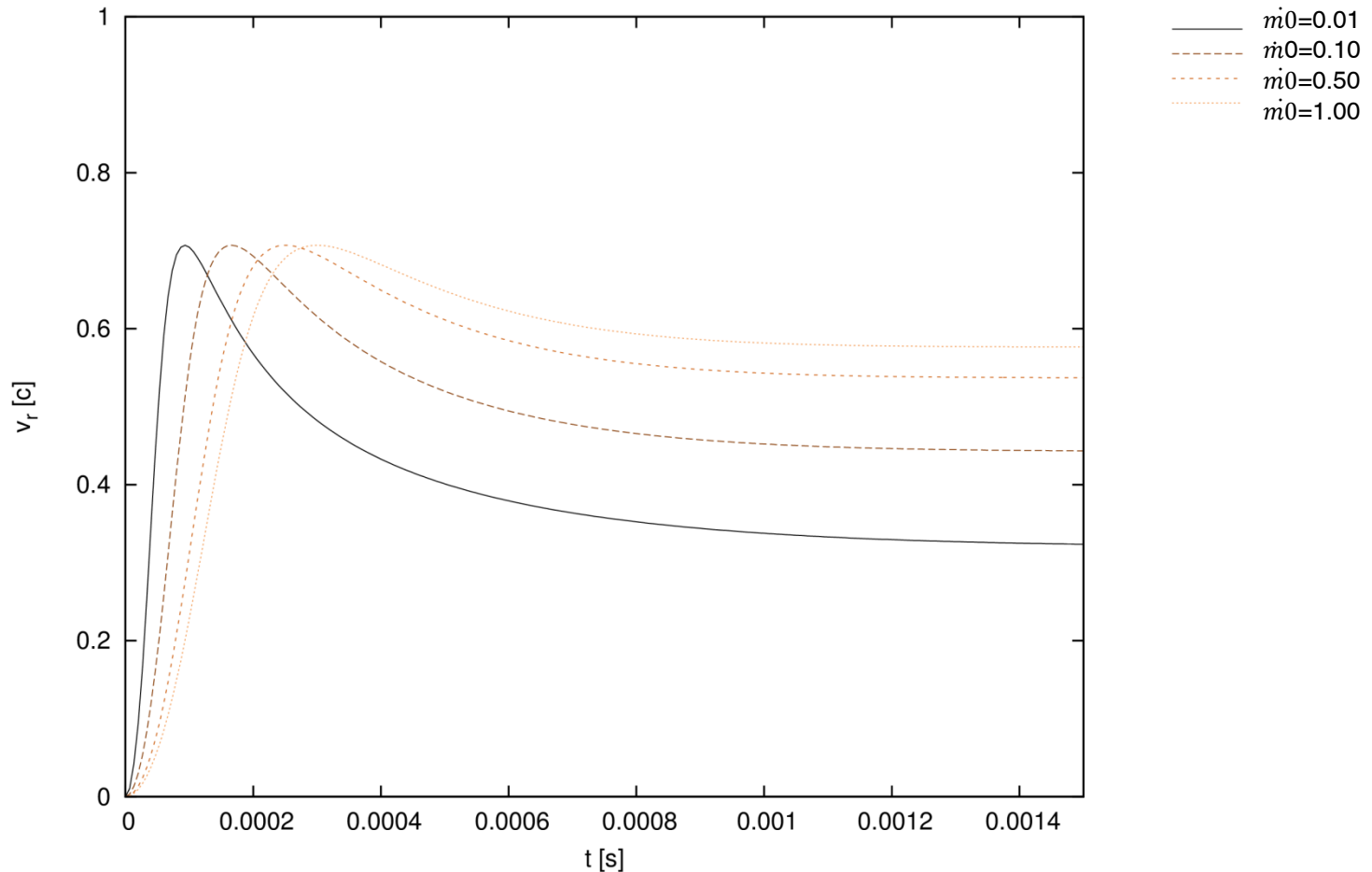
### Adott $z$ , $\dot{m}_0$

$D$  növekszik, a felgyorsult elektron  $z$  tengelytől való kitérésének mértéke növekszik

### Adott $z$ , $D$

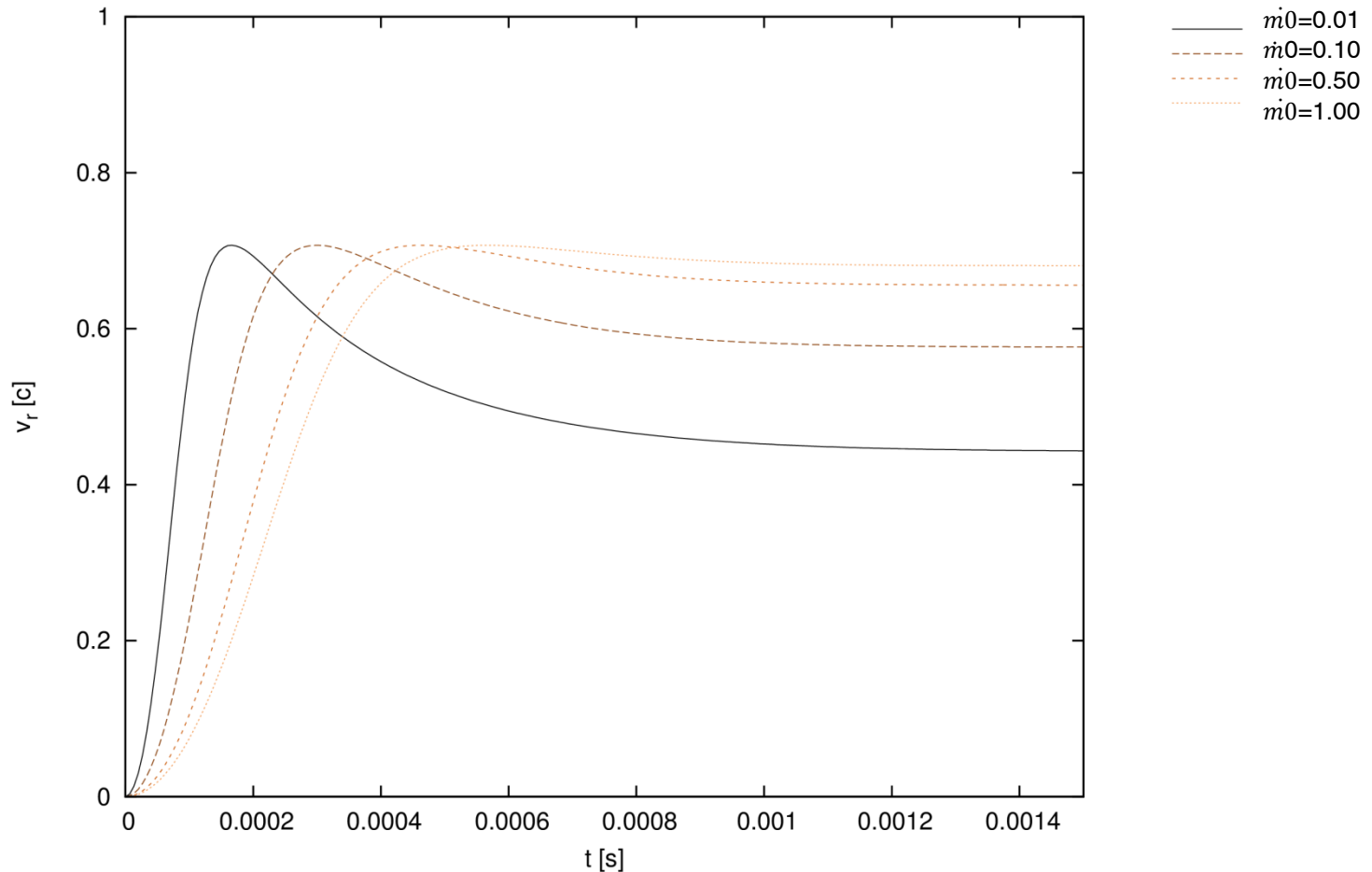
$\dot{m}_0$  növekszik, a felgyorsult elektron  $z$  tengelytől való kitérésének mértéke növekszik

$$m=10^6 M_{\text{Nap}}, D=10 R_s$$



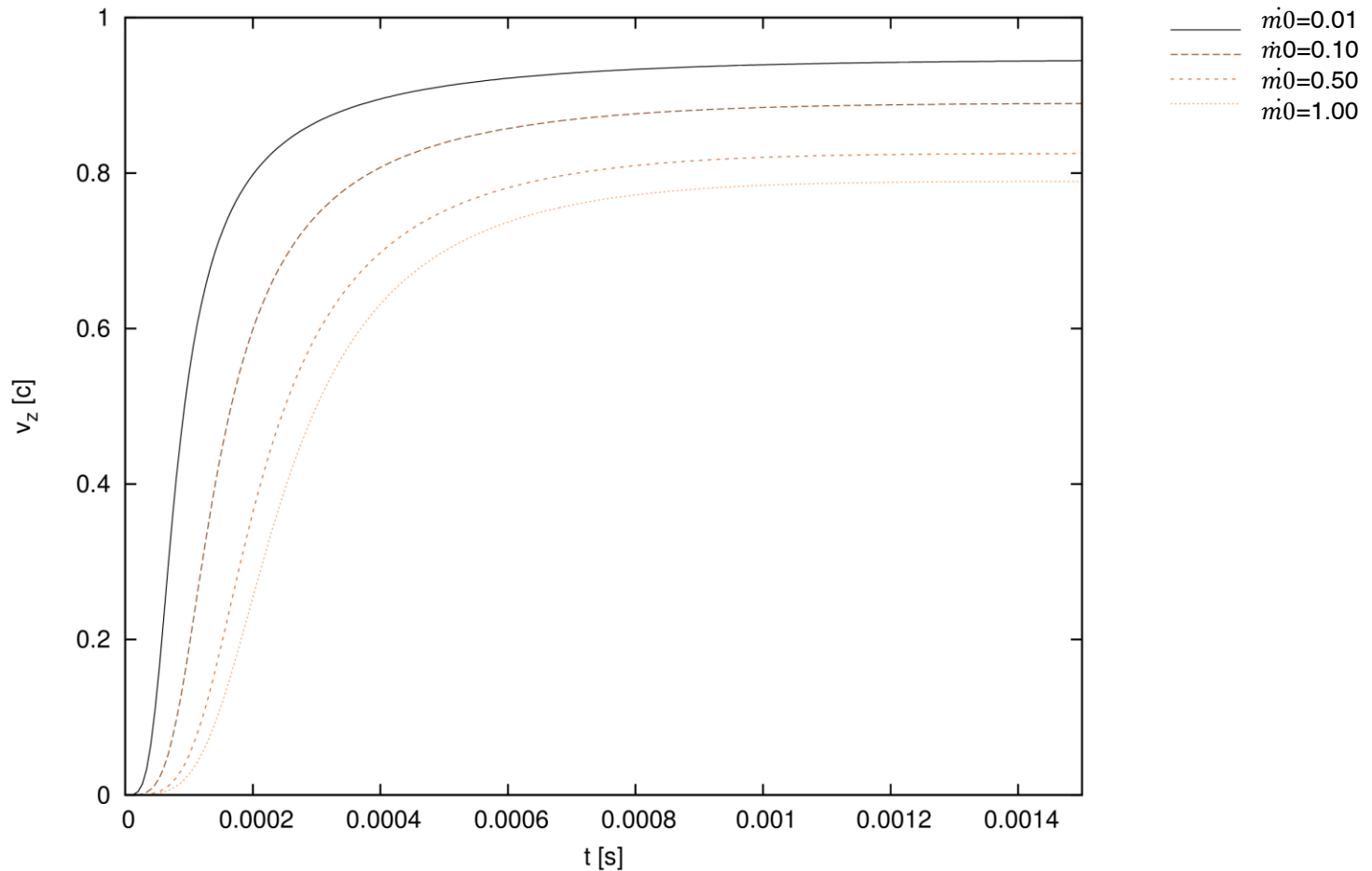
Erős  $r$  irányú lökés éri az elektront, az gyorsul, sebessége elér egy maximális értéket, majd lassul és sebessége beáll egy konstans értékre

$$m=10^6 M_{\text{Nap}}, D=100 R_s$$



Távolabb a horizonttól később éri el a sebesség a maximum értékét, viszont adott akkréciós rátához nagyobb végsebesség tartozik

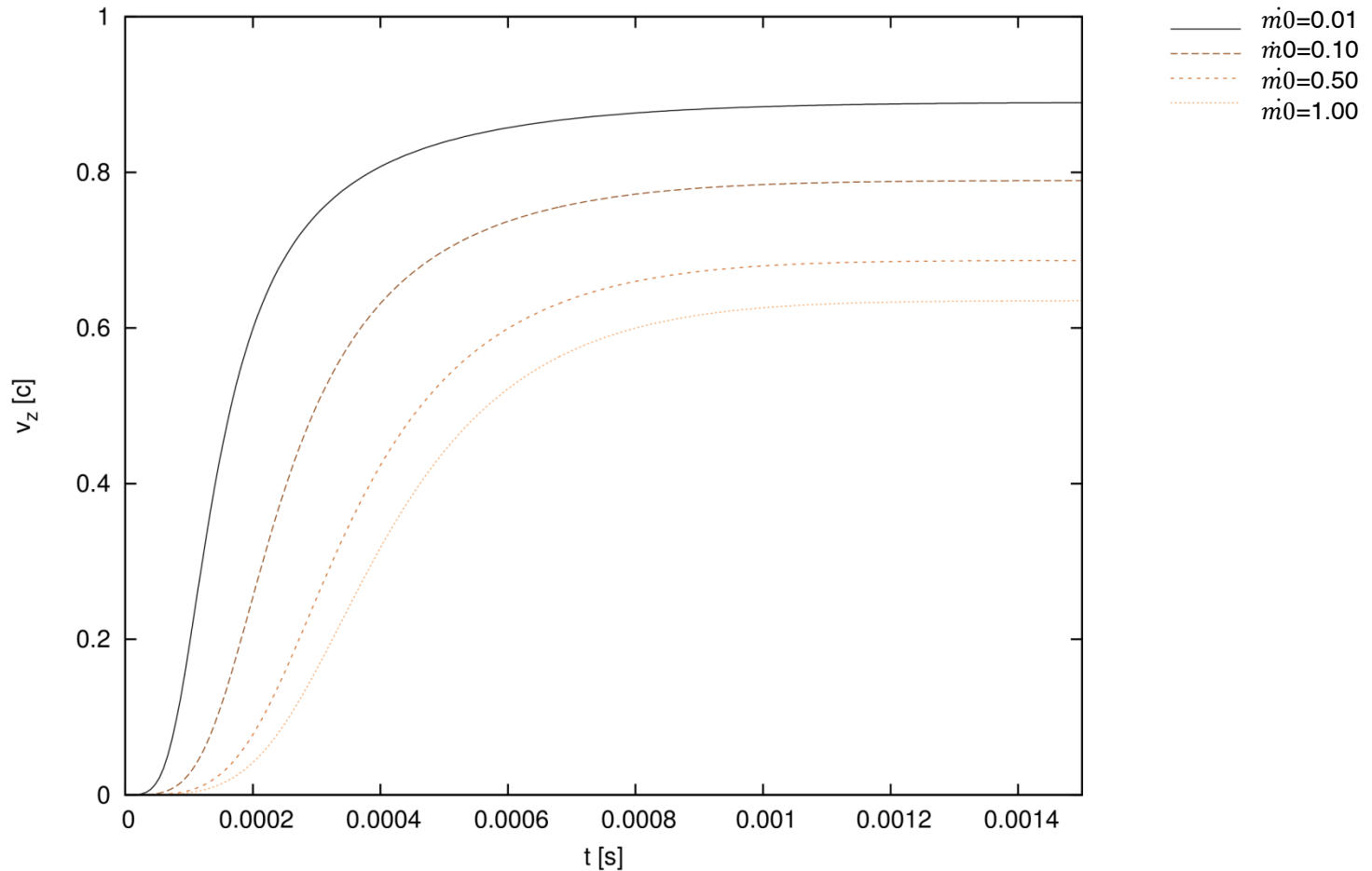
$$m=10^6 M_{\text{Nap}}, D=10 R_s$$



Az elektron z irányú sebessége közel a fénysebesség lesz  $\sim 0.001$ s alatt

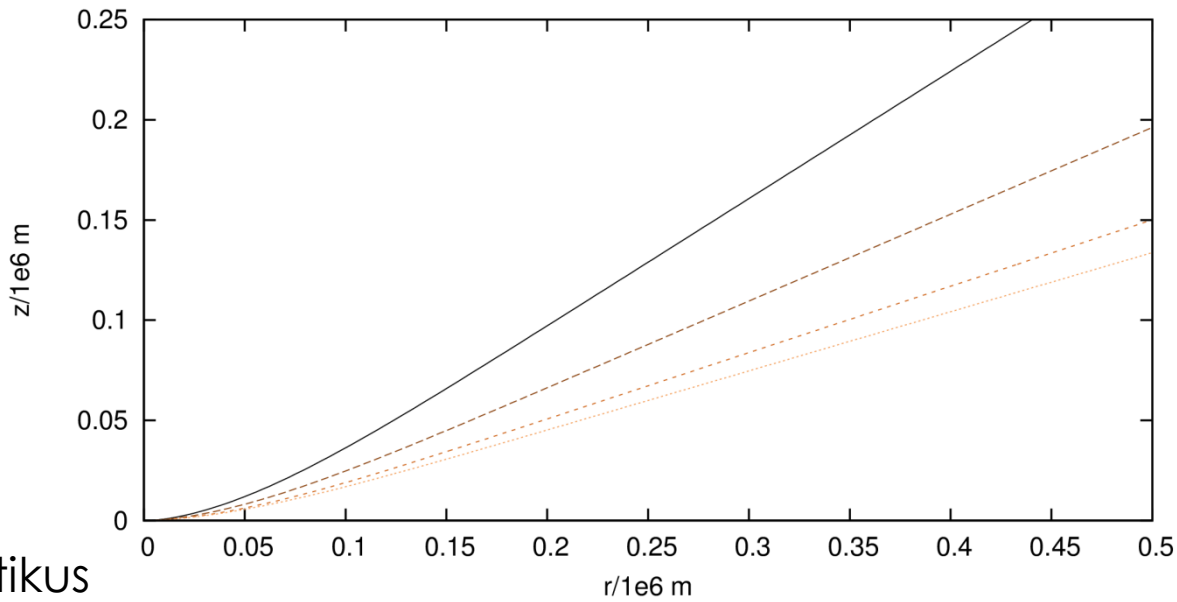


$$m=10^6 M_{\text{Nap}}, D=100 R_s$$



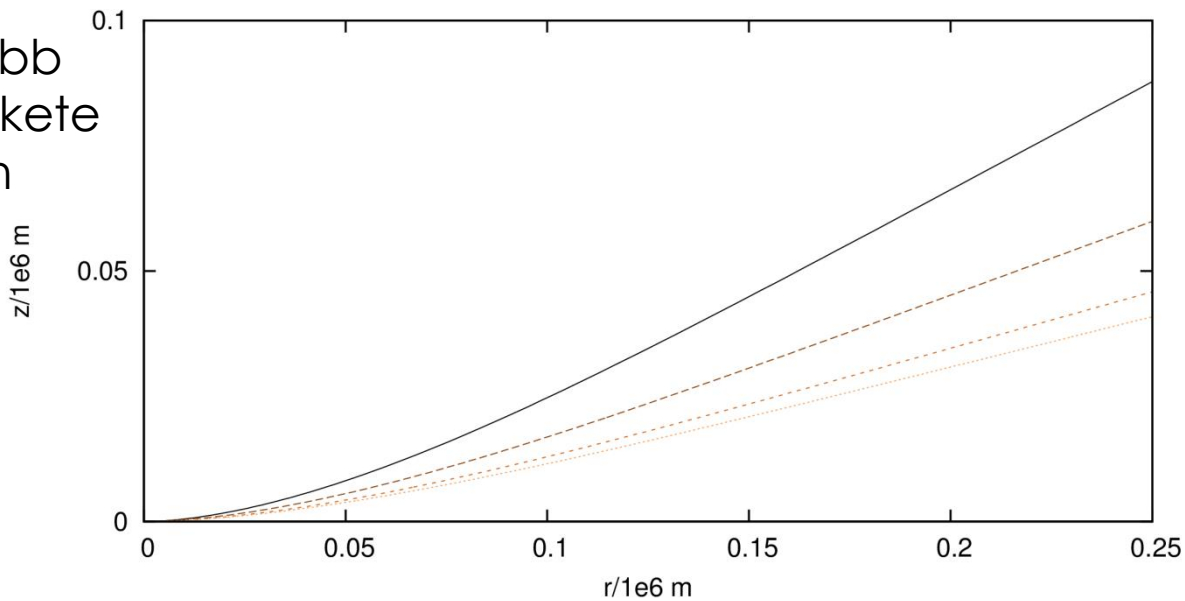
Távolabb a horizonttól a z irányú végsebesség kisebb

Hasonló  
karakterisztikus  
viselkedés  
mint a kisebb  
tömegű fekete  
lyuk esetén



$m_0=0.01$   
 $m_0=0.10$   
 $m_0=0.50$   
 $m_0=1.00$

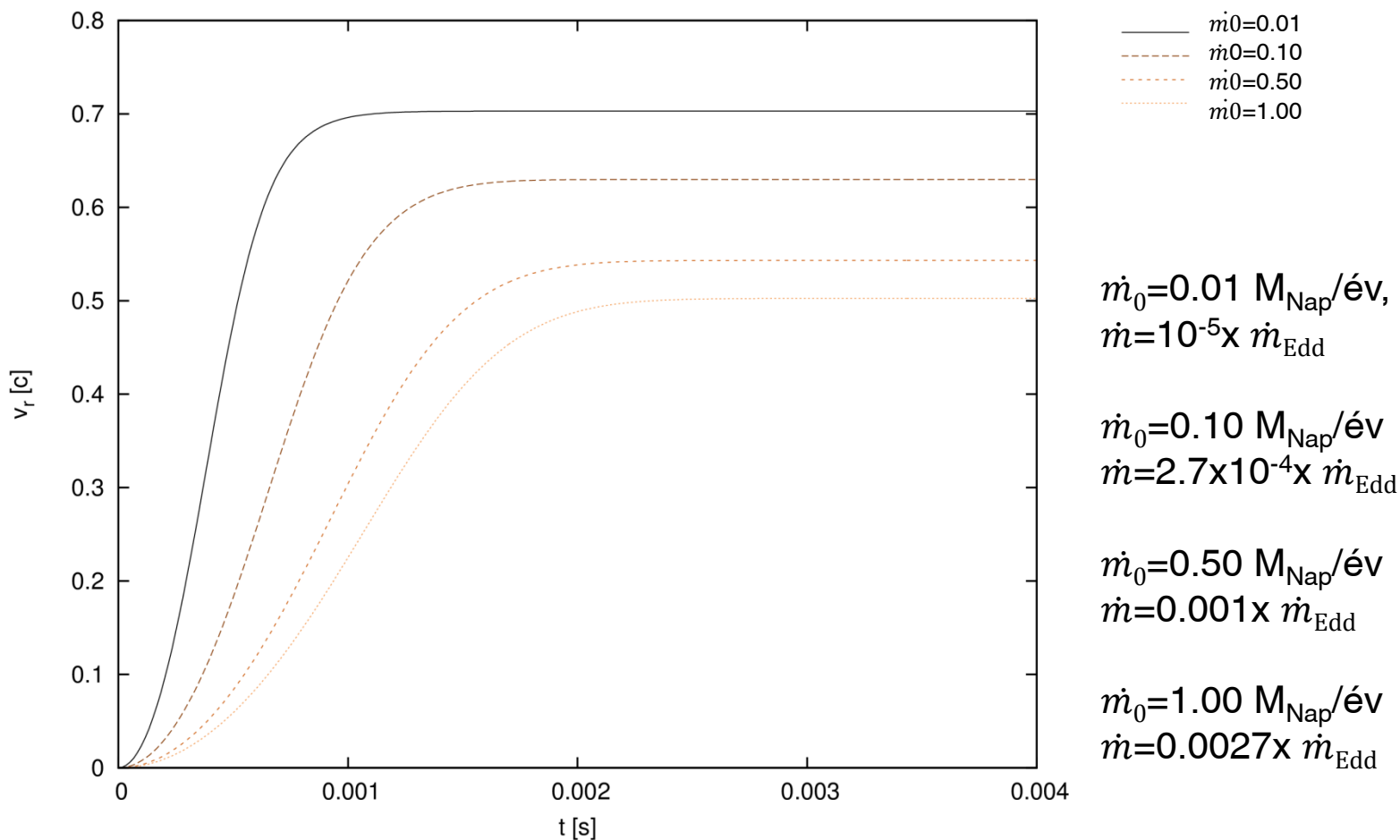
$m=10^8 M_{\text{Nap}}$   
 $D=10 R_s$



$m_0=0.01$   
 $m_0=0.10$   
 $m_0=0.50$   
 $m_0=1.00$

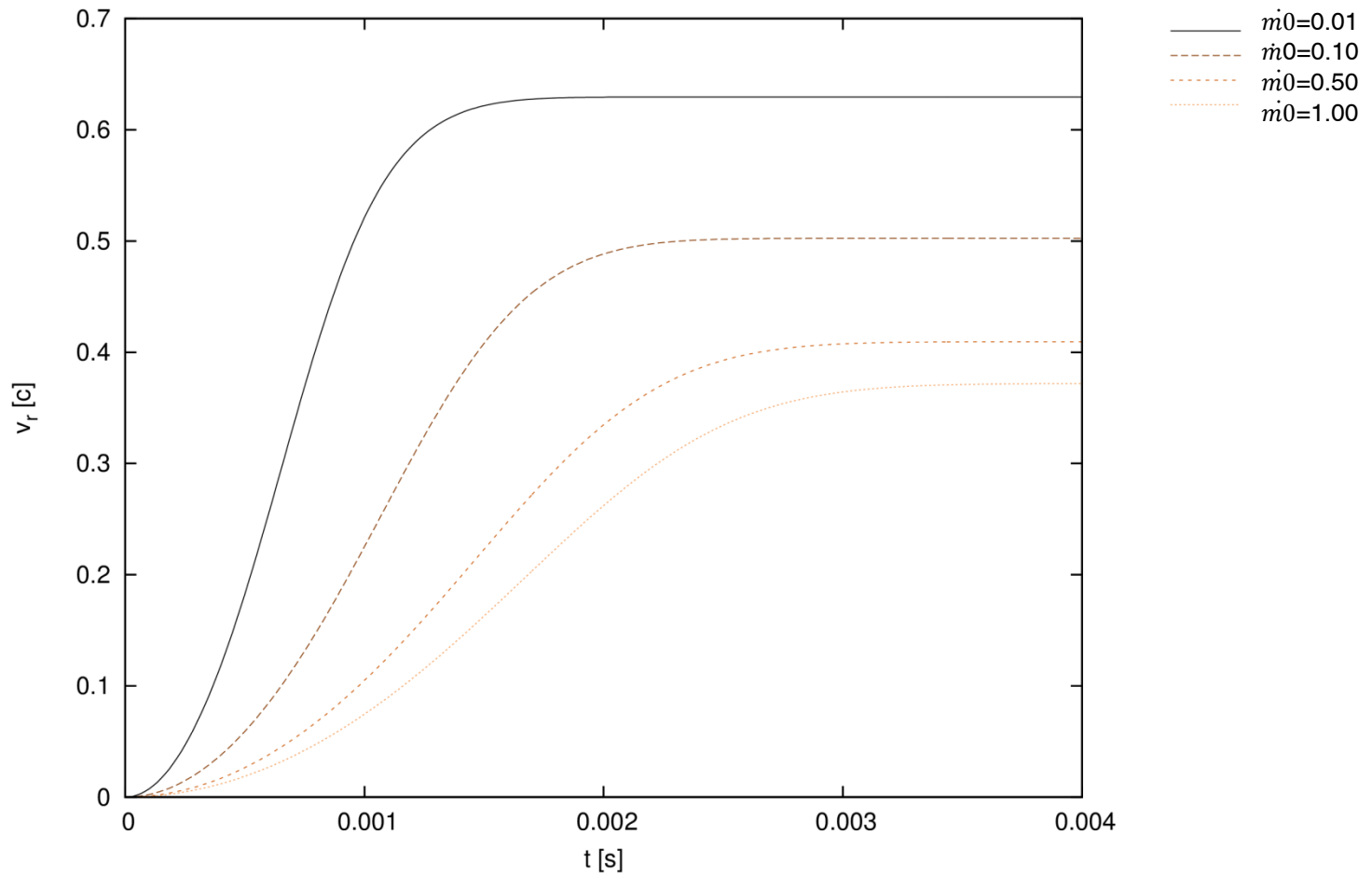
$m=10^8 M_{\text{Nap}}$   
 $D=100 R_s$

$$m=10^8 M_{\text{Nap}}, D=10 R_s$$

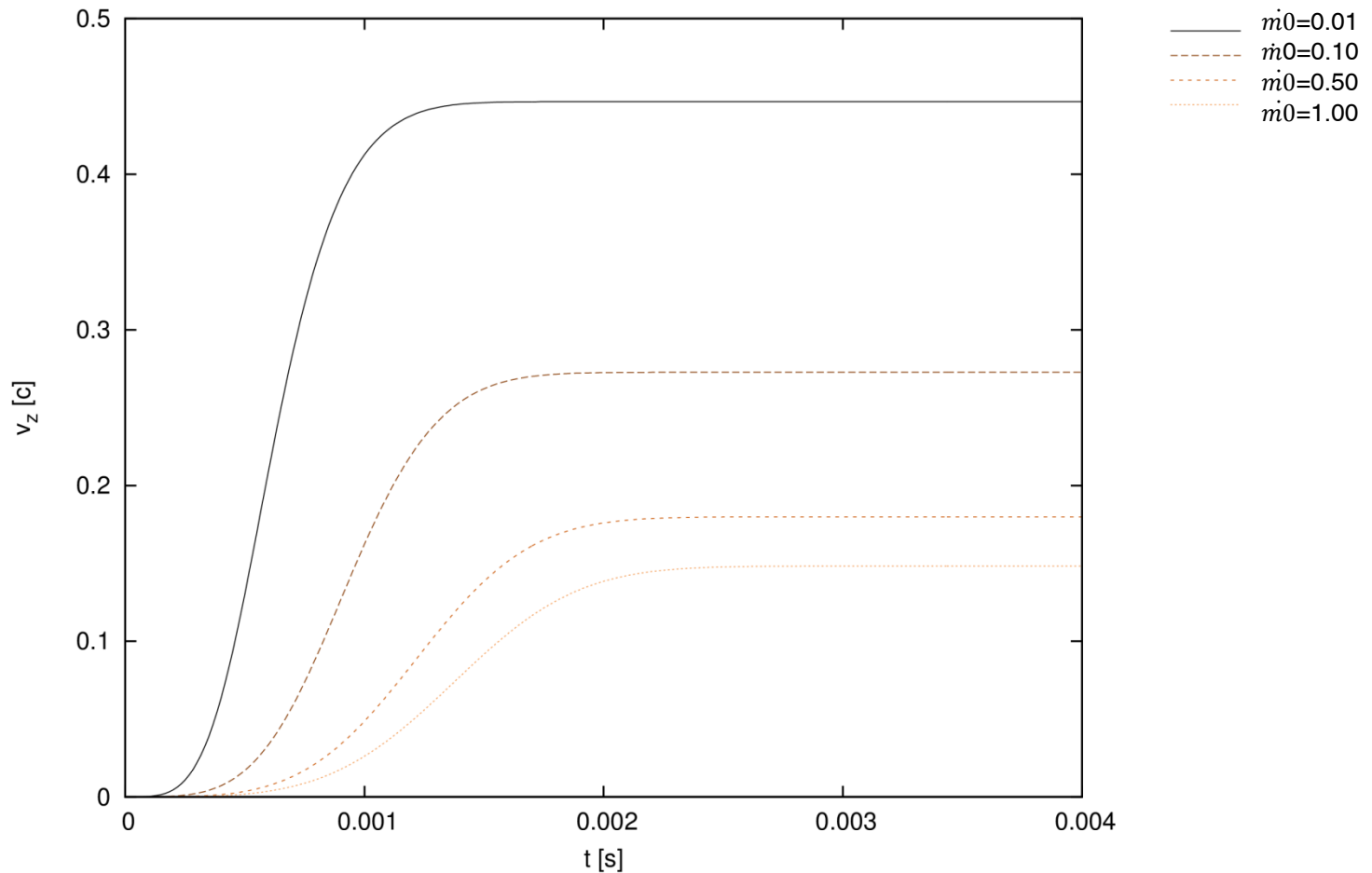


Nagyobb akkréciós ráta, kisebb radiális irányú végsebesség,  
a sebességderivált nem vált előjelet

$$m=10^8 M_{\text{Nap}}, D=100 R_s$$

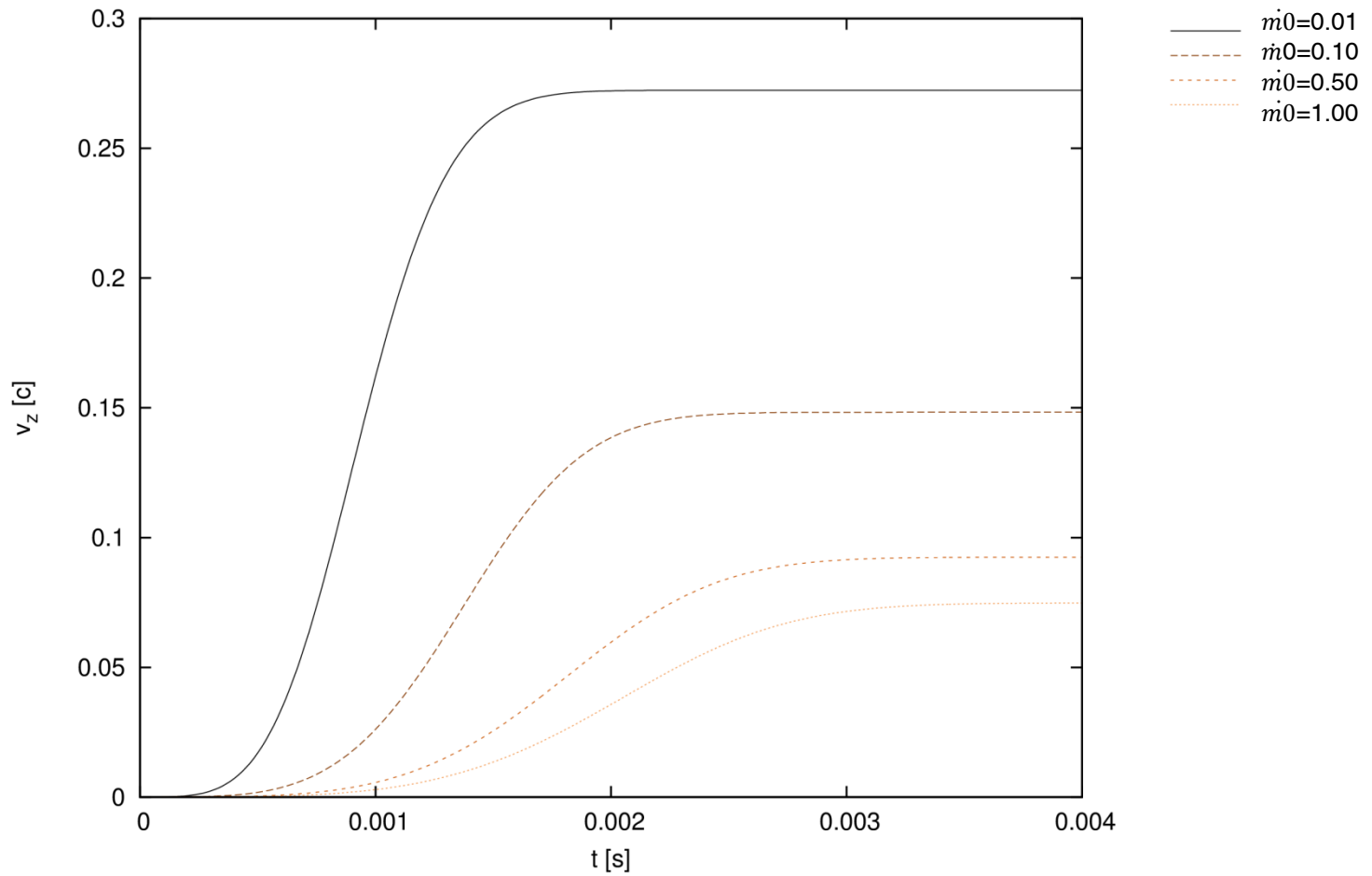


$$m=10^8 M_{\text{Nap}}, D=10 R_s$$



Nagyobb akkréciós ráta, kisebb axiális irányú végsebesség

$$m=10^8 M_{\text{Nap}}, D=100 R_s$$



# Az első tesztek megmutatták

---

- Schwarzschild sugártól való függés
- Horizonttól mért távolságtól való függés
- Akkréciós rátától való függés



TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0060 projekt



# Köszönöm a figyelmet!

## Referenciák

- Shakura, N. I.; Sunyaev, R. A. ,1973, A&A, 24, 337
- I.D. Novikov and K.S. Thorne, "Astrophysics of Black Holes", 1973, 343
- Minfeng Gu, Xinwu Ca, D. R. Jiang, 2009, MNRAS, 396, 984
- E. Esarey, C. B. Schroeder, and W. P. Leemans, 2009, PRD, 81, 1229
- Toshikazu Ebisuzaki &Toshiki Tajima, 2014, Astroparticle Physics, 56, 9