

# Szuperszimmetria és keresése

*CMS-megbeszélés, Budapest-Debrecen,  
2007.11.06.*

**Horváth Dezső**

MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest  
és ATOMKI, Debrecen



# Vázlat

- A Standard Modell problémái.
- A mértékcsatolások összetartása.
- Nagy egyesítés (GUT).
- A hierarchia-probléma.
- Szuperszimmetria (SUSY).
- A Minimális Szuperszimmetrikus Standard Modell.
- Az MSSM–részecskék és keresésük.

## Irodalom:

- S.P. Martin: *A supersymmetry primer*, [hep-ph/9709356](#), 2006
- Luc Pape és Daniel Treille:  
*Supersymmetry facing experiment: much ado (already) about nothing (yet)*,  
*Rep. Prog. Phys.* 69 (2006) 2843



# A Standard Modell problémái – 1

- 3 *független* összetevő:  $U(1)_Y \otimes SU(2)_L \otimes SU(3)_C$
- Gravitáció?  $S = 2$  graviton?
- Aszimmetriák: jobb  $\Leftrightarrow$  bal világ  $\Leftrightarrow$  antivilág
- Mesterséges tömegkeltés: Higgs-tér *kívülről*
- Rengeteg alapvető részecske:  
 $8 + 3 + 1 + 1 = 13$  bozon  
 $3 \times 2 \times (2 + 3 \times 2) = 48$  fermion
- Töltéskvantálás:  $Q_e = Q_p, Q_d = Q_e/3$
- Miért éppen 3 fermioncsalád?  
Eredetileg: Minek a müon??
- Nukleon spinje: hogyan áll össze 1/2-dé?

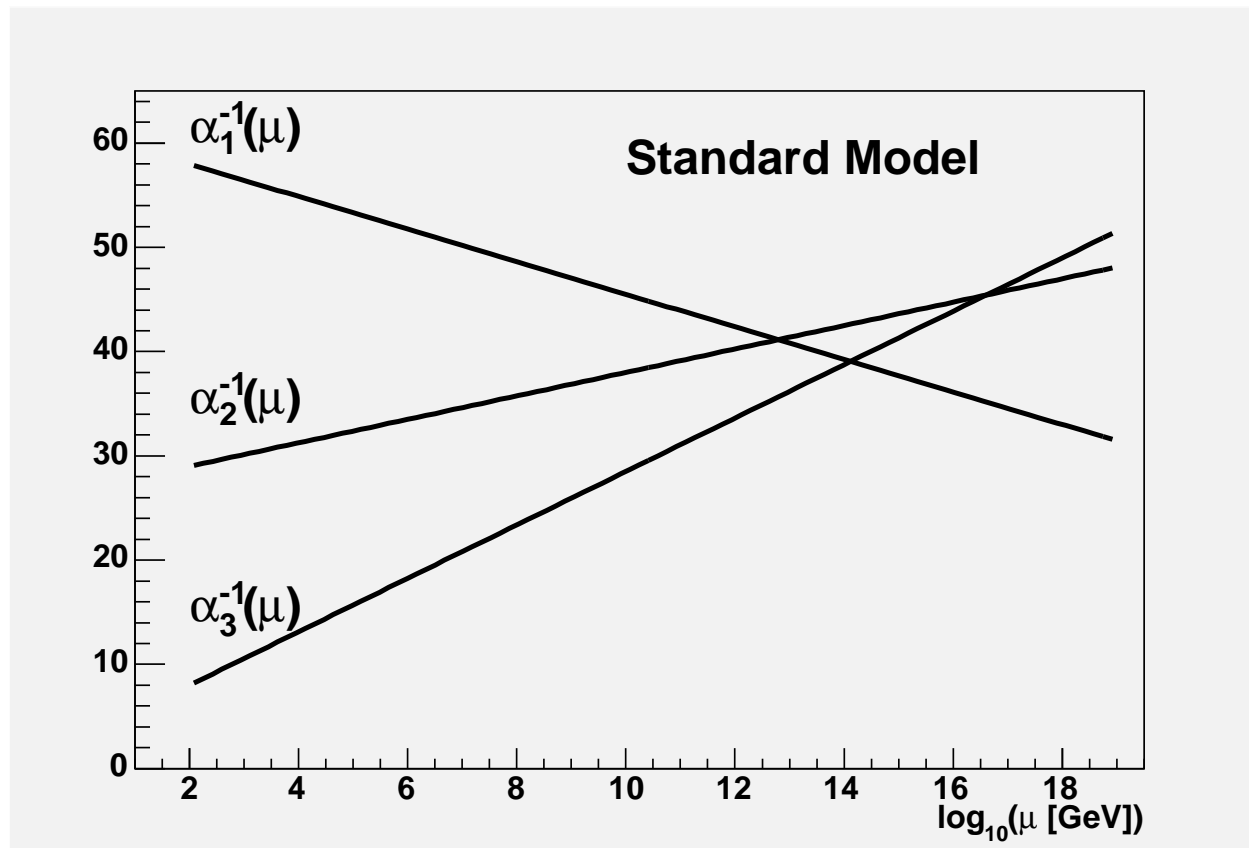


# A Standard Modell problémái – 2

- 19 szabad paraméter:
  - 3 csatolás:  $\alpha$ ,  $\Theta_W$ ,  $\Lambda_{\text{QCD}}$
  - 2 Higgs:  $M_H$ ,  $\lambda$
  - 9 fermion-tömeg:  $3 \times M_\ell$ ,  $6 \times M_q$
  - CKM-mátrix 4 paramétere:  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$ ,  $\Theta_3$ ,  $\delta$
  - QCD-vákuum:  $\Theta$
- $M_\nu > 0 \Rightarrow +7$  paraméter
- Sötét anyag és energia ??  
Univerzum tömegének
  - 4%-a közönséges anyag (csillag, gáz, por,  $\nu$ )
  - 23 %-a láthatatlan *sötét anyag*
  - 73 %-a rejtélyes *sötét energia*



# Csatolási állandók



$\alpha_i$ :  $SU(i)$  csat. állandója

Majdnem találkoznak  $\mu \sim 10^{13} - 10^{16}$  GeV-nél

Egyesíthetők a kölcsönhatások?



# Nagy Egyesítés

Grand Unification Theory (GUT): Átfogó szimmetria

$$G \ni SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y \quad G \geq SU(5)$$

Részecskék: 15 balos fermion/család:

$$\begin{pmatrix} \nu_i \\ \ell_i \end{pmatrix}_L, (\ell_i)_L^c, \begin{pmatrix} u_i \\ d_i \end{pmatrix}_L, (u_i)_L^c, (d_i)_L^c; \quad (i = 1, 2, 3)$$

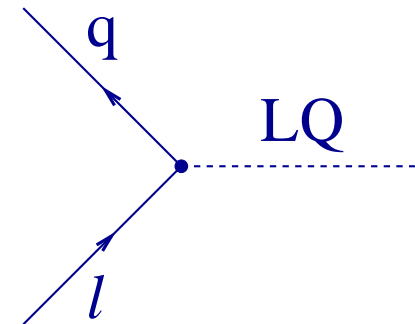
Királis szimmetria:  $(p_i)_L^c \equiv (p_i)_R$  ( $^c$ : konjugált)

Családon belül valamennyi átmenet lehetséges



24 mértékbozon: 8 g,  $W^\pm$ , Z,  $\gamma$ , 12 LQ

LQ leptoquark:  $q \leftrightarrow \ell$  átmenet  
4-féle párosítás  $\times$  3 szín



# GUT-tömeg és Planck-tömeg

Nagy egyesítés  $\Rightarrow$  protonbomlás Pl.  $p \rightarrow e^+ \pi^0$

$$\tau_p \sim \frac{1}{\alpha^2} \frac{\hbar}{c^2} \frac{M_X^4}{M_p^5}$$

Kísérlet:  $\tau_p > 10^{31}$  év  $\Rightarrow M_X > 10^{14}$  GeV

Gravitáció egyesítése Planck-tömegnél:

$E_{\text{nyug}} \sim E_{\text{grav}}$  (Compton hullámhossz)

$$M_{Pl} c^2 \sim E_{\text{grav}}(r = \frac{\hbar}{M_{Pl} c}) \Rightarrow M_{Pl} c^2 \sim 10^{19} \text{ GeV}$$

Töltéskvantálás OK:  $\sum_{i=1}^{15} Q_i = 0$

Kvarkok harmados töltése 3 szín miatt



# GUT: csatolási állandók

$$E > M_X \Rightarrow g_1 = g_2 = g_3; \quad \alpha_i = \frac{g_i^2}{4\pi} \text{ } SU(i)\text{-re}$$

Renormálás  $\mu$  referencia-impulzusnál:

$$\frac{1}{\alpha_{\text{GUT}}} = \frac{1}{\alpha_i(M_X^2)} = \frac{1}{\alpha_i(\mu^2)} + \frac{b_i}{4\pi} \ln \left( \frac{M_X^2}{\mu^2} \right)$$

$b_i$  = mértékbozon-hurkok  
 + fermion-hurkok  
 + Higgs-hurkok járuléka

$$\begin{aligned} b_3 &= 11 - \frac{4}{3}N_f \\ b_2 &= \frac{22}{3} - \frac{4}{3}N_f - \frac{1}{6}N_H \\ b_1 &= -\frac{4}{3}N_f - \frac{1}{10}N_H \end{aligned}$$

$N_f$  család,  $N_H$  Higgs-dublett

$$\alpha_s(M_Z^2) \equiv \alpha_3(M_Z^2) \approx 0,12$$

$$\alpha_{em}(M_Z^2) = \alpha_2(M_Z^2) \sin^2 \Theta_W = \frac{3}{5} \alpha_1(M_Z^2) \cos^2 \Theta_W \approx \frac{1}{128}$$



$$\sin^2 \Theta_W \approx 0,22; \quad M_X \approx 10^{14} \text{ GeV}; \quad \alpha_i(M_X^2) \approx \frac{1}{40}; \quad \text{OK!}$$





# GUT: fermion-tömegek

$$Q^2 > M_X^2: \quad m_d = m_e; \quad m_s = m_\mu; \quad m_b = m_\tau$$

$Q = 10 \text{ GeV}$  (GUT + min. Higgs-szektor):

$$m_b/m_\tau \sim 3 \quad \text{OK}$$

$$\text{De: } m_s(Q)/m_d(Q) = m_\mu/m_e = 20$$

$$\text{Kísérlet: } m_\mu/m_e = 200$$



# GUT $SU(5)$

Spontán szimmetriasértés:

$$SU(5) \longrightarrow SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1) \longrightarrow SU(3) \otimes U(1)$$

$\Downarrow$   $\Downarrow$

24 Higgs-tér:  $\langle \Phi \rangle \sim 10^{14}$  GeV sivatag 5 Higgs-dublett:  $\langle H \rangle \sim 100$  GeV

**Bajok:**  $\tau_p^{\text{GUT}} \ll \tau_p^{\text{exp}}$

rengeteg új paraméter

$\langle \Phi \rangle \gg \langle H \rangle$  nem stabil

Hierarchia-probléma:

( $\langle H \rangle$ -t sug. korrekciók növelik)



# A hierarchia-probléma

Higgs-potenciál:  $V = m_H^2 \Phi^2 + \lambda \Phi^4$

$$m_H^2 \sim -(100 \text{ GeV})^2$$

Korrekciók Higgs-tömeghez:

Fermion-hurok:

$$\Delta m_H^2 = \frac{|\lambda_f|^2}{8\pi^2} \left[ -\Lambda_{\text{UV}}^2 + 6m_f^2 \ln \frac{\Lambda_{\text{UV}}}{m_f} + \dots \right]$$

top-kvarkra  $\lambda_t \approx 1$

UV-levágás:  $\Lambda_{\text{UV}} > 10^{14} \text{ GeV!}$

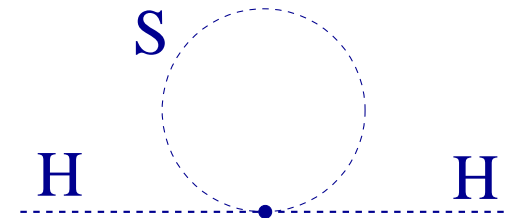
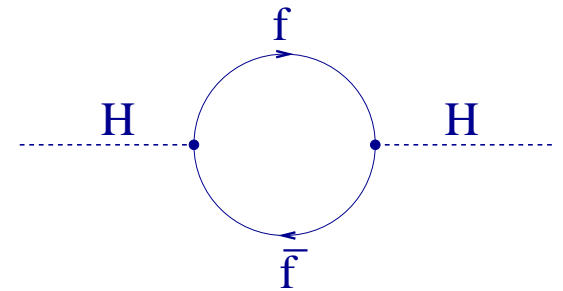
Higgs-paraméterek hangolása  $10^{-12}$  pontosságig!

Ha lenne nehéz skalár részecske:

$$\Delta m_H^2 = \frac{\lambda_S}{16\pi^2} \left[ +\Lambda_{\text{UV}}^2 - 2m_S^2 \ln \frac{\Lambda_{\text{UV}}}{m_S} + \dots \right]$$

$f \leftrightarrow S_1, S_2$ :  $\lambda_S = \lambda_f^2$ ;  $m_S = m_f$

$\Lambda^2$ -es korrekciók kiesnének



# Szuperszimmetria (SUSY)

Fermionok és bozonok párban:

$$Q|F\rangle = |B\rangle; \quad Q|B\rangle = |F\rangle \quad m_B = m_F$$

Azonos részecskék, csak spinjük különbözik

Kis energián sérül, partnereket nem látjuk: nagyobb tömeg?

## SUSY-menazséria

Királis multiplettek		mérték-multiplettek	
S=1/2	S=0	S=1	S=1/2
kvark: $q_L, q_R$	skvark: $\tilde{q}_1, \tilde{q}_2$	foton: $\gamma$	fotíno: $\tilde{\gamma}$
lepton: $\ell_L, \ell_R$	slepton: $\tilde{\ell}_1, \tilde{\ell}_2$	gyenge $W^\pm$ bozonok $Z$	wino: $\tilde{W}^\pm$ zino: $\tilde{Z}$
higgszínó: $\tilde{\Phi}, \tilde{\Phi}'$	Higgs: $\Phi, \Phi'$	gluon: $g$	gluínó: $\tilde{g}$

Skalár fermion: sfermion, bozon párja: bozínó



# SUSY, folyt.

2 Higgs-dublett ad tömeget felső és alsó fermionoknak

$$m_L = m_R, \text{ de } \tilde{m}_L \neq \tilde{m}_R$$

8 Higgs-tér  $\Rightarrow$  5 Higgs-bozon:  $h^0, H^0, A^0, H^\pm$

Higgs-paraméterek:  $\tan\beta = v_1/v_2$ , tömegek

SUSY kvantumszáma:  $R$ -paritás  $R = (-1)^{3B-L+2S}$

$R = +1$  részecske,  $R = -1$  srészecske

Paritás-jelleg:  $R^2 = +1$

Ha  $R$  megmarad, legkönnyebb srészecske (LSP) stabil

$R$ -paritás nagyon nem sérülhet: látnánk

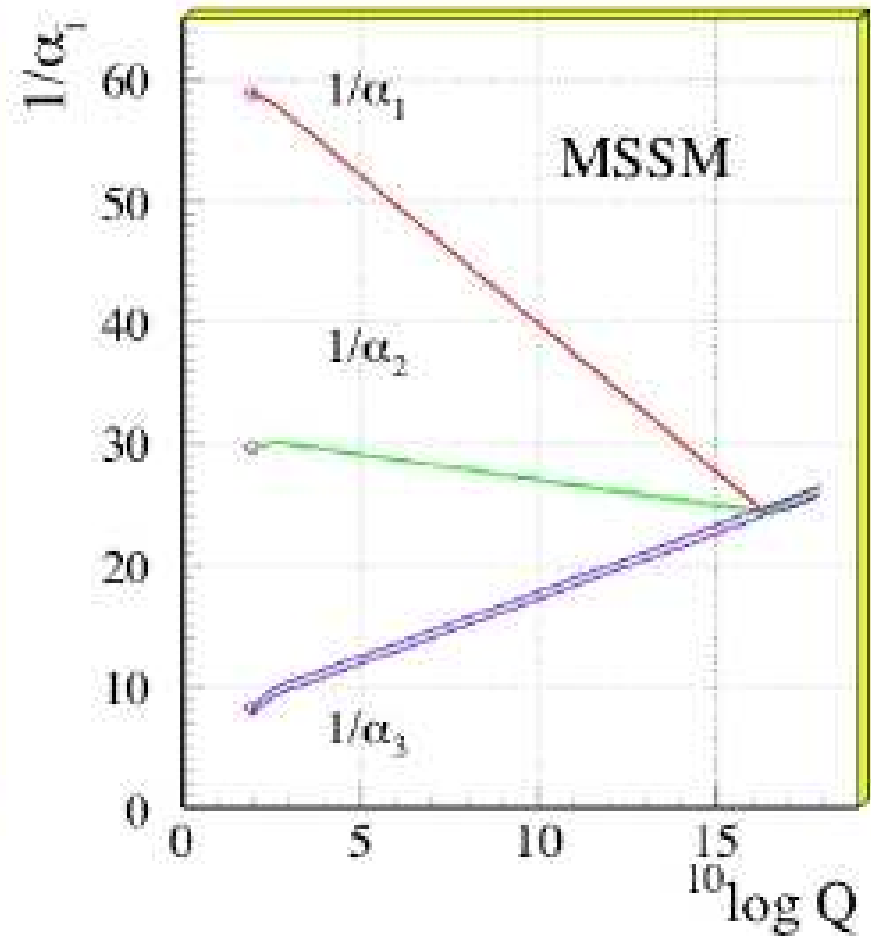
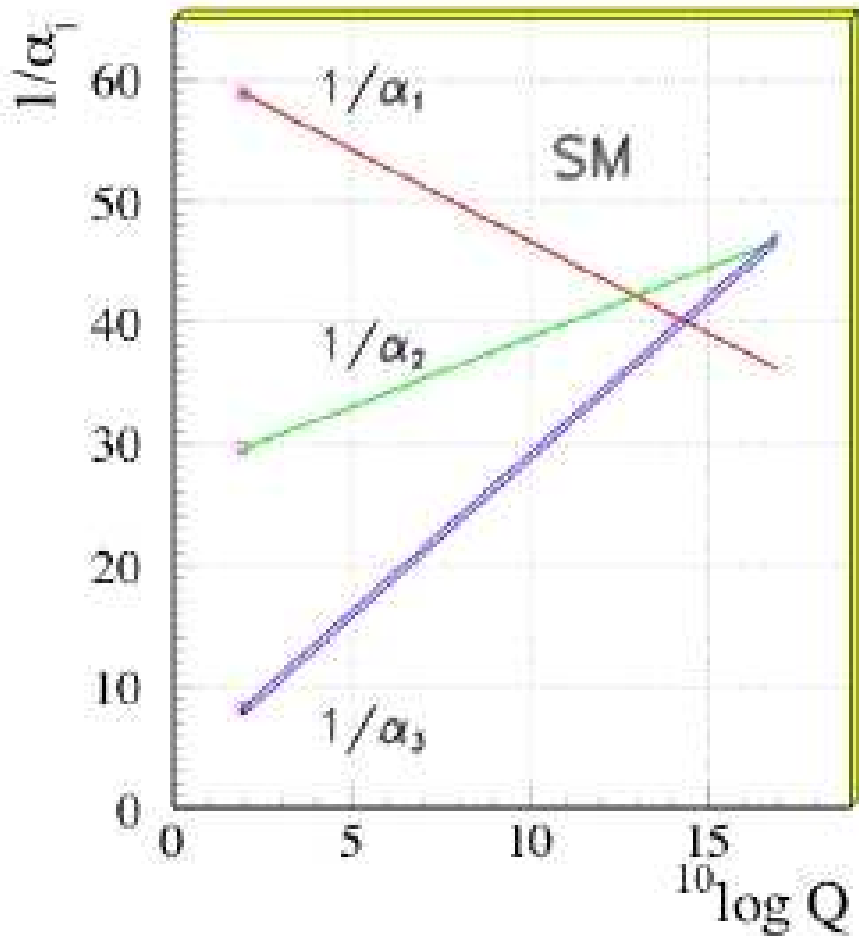
Ha LSP semleges: sötét anyag lehet ( $\rho \approx 0,1 \text{ GeV/cm}^3$ !!)

Spontán Higgs-mechanizmus:

nagy negatív top-korrekciók  $V(\Phi)$   $\mu^2$ -es tagjához



# SUSY: mértékcsatolási állandók



Egyesülnek!

Kunkor az elején: SUSY belépése



# MSSM

## Minimális Szuperszimmetrikus Standard Modell

SUSY-fermionok keverednek  $\Rightarrow$  tömeg-sajátállapotok

{Elektrogyenge gaugínók + higgszínók}  $\Rightarrow$   
{chargínók és neutralínók }

$\{\tilde{\gamma}, \tilde{W}^{\pm}, \tilde{Z}; \tilde{h}^0, \tilde{H}^0, \tilde{H}^{\pm}\} \Rightarrow \{\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_2^{\pm}; \tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0\}$

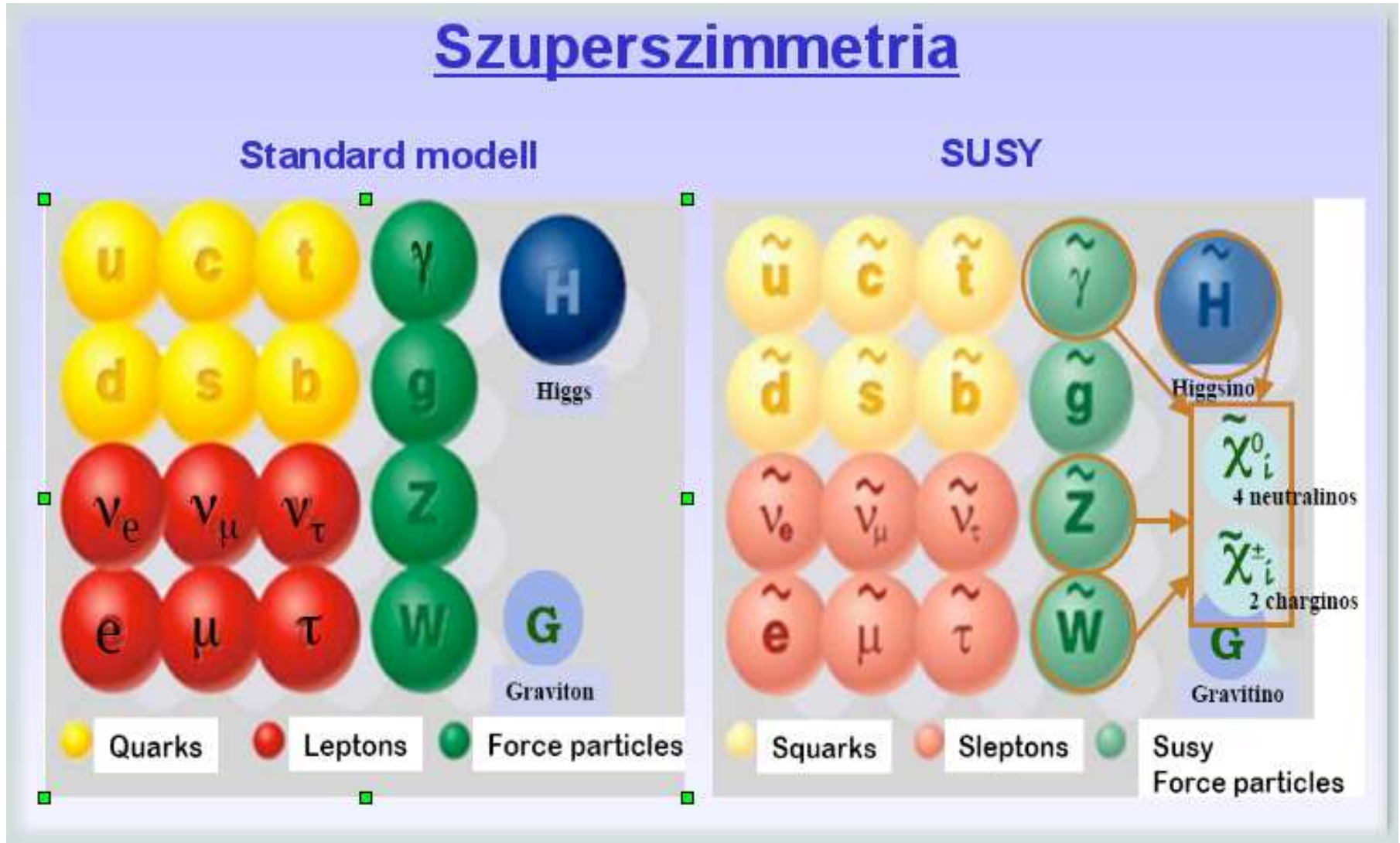
tömeg nő az index-szel

Legkönnyebb SUSY-részecske (LSP):  $\tilde{\chi}_1^0$  vagy gravitínó ( $\tilde{G}$ )

Rengetegféle modell, óriási paramétertér, különféle korlátozás.



# SM és MSSM: menázséria





# Szuperszimmetria?

Szuperszimmetria nyilvánvalóan sérül:  
nincsenek ilyen részecskék,  
legfeljebb sokkal nagyobb tömeggel

Mire jó egy sérülő szimmetria?

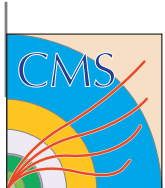
Higgs-mechanizmus:  
szimmetriasértő tér  $\Rightarrow$  tömegek, renormálhatóság

A Higgs-tér sért egy létező szimmetriát

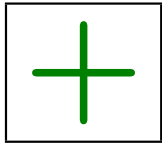


SUSY bevezet egy nem-létezőt

Mindez egy racionális, kiszámítható elméletért



# Szuperszimmetria: + és –



- elmélet természetessége
- világegyetem hideg sötét anyaga (23 %)
- kölcsönhatások egyesítése
- gravitáció beépítése

## DE:



- SUSY-sértés mechanizmusa??
- sokféle modelfelépítés
- rengeteg új paraméter
- $\tilde{m} \sim 100$  GeV alatt nem látjuk

Még jó, hogy a SUSY-t már 50%-ig felfedeztük!!  
(a SUSY-részecskék felét (1 híján :-)) látjuk...)

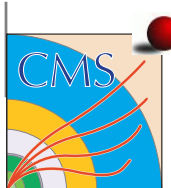


# CMSSM vagy MSUGRA

## Constrained MSSM vagy Minimális Szupergravitációs Modell

Sok egyszerűsítő megszorítás (**határfeltétel**),  
105  $\Rightarrow$  5 vagy 6 paraméter, pl.:

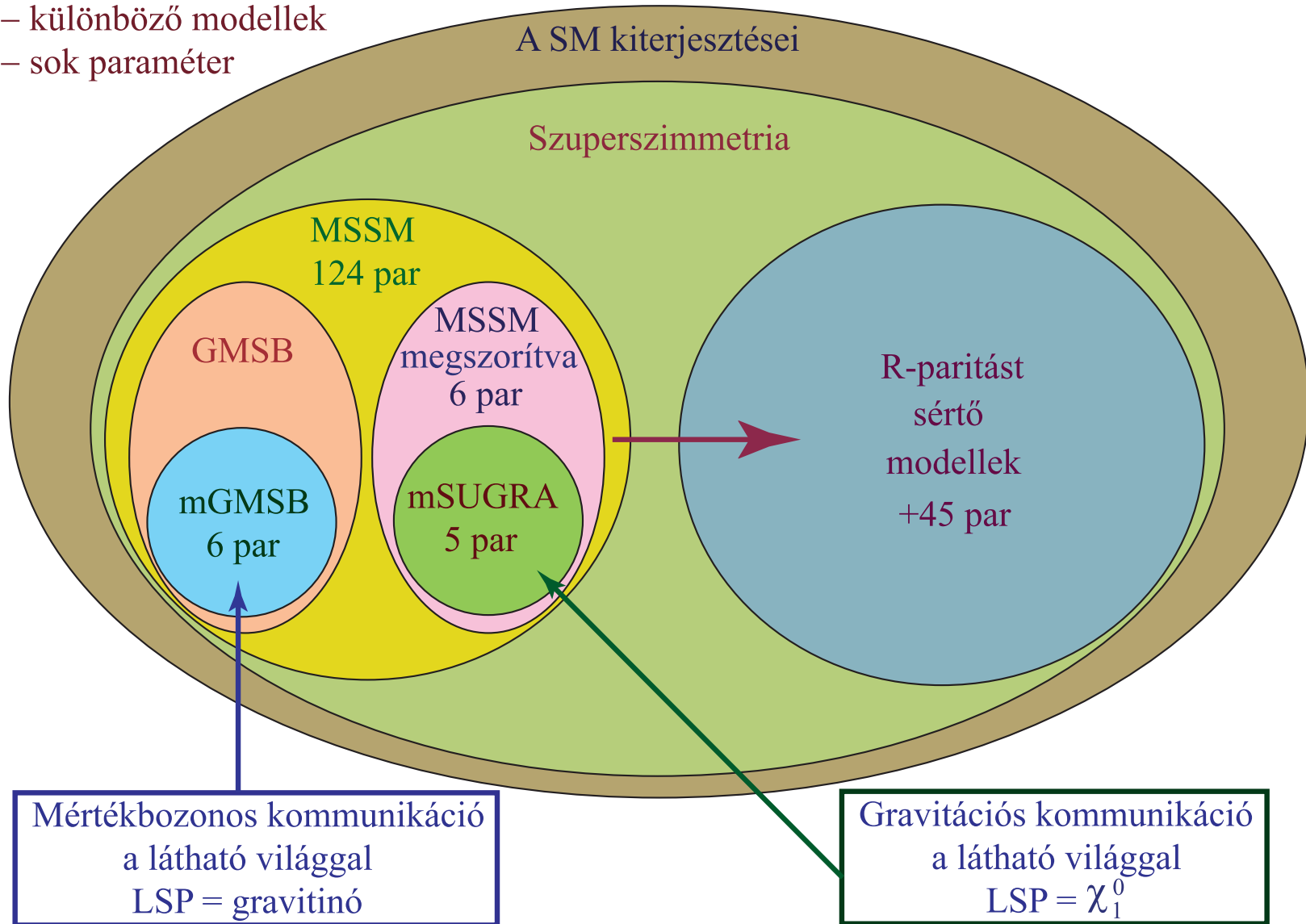
- $m_{1/2}$ : fermiontömegek a nagy egyesítés energiájánál  
(GUE  $\sim 10^{14} - 10^{15}$  GeV)
- $m_0$ : bozontömegek (GUE)
- $A_0$ : SUSY-sértő hármás (X–Y–Higgs) csatolási állandók  
(GUE)
- $\tan \beta = v_1/v_2$ : felső és alsó Higgs-tér vákuumbeli várható  
értékének hányadosa
- $m_A$ : az egyik Higgs-bozon tömege
- $\mu$ : Higgszinók keveredési paramétere **előjel**



# SUSY-modellek

A SUSY-sértés eredete ismeretlen:

- különböző modellek
- sok paraméter



# Még rengeteg modell van



# Kísérleti korlátozások, megszorítások

SUSY-jelenséget nem észleltünk, negatív mérések a paraméterteret korlátozzák

- **LEP-mérések: Higgs-szektor**
  - SM-Higgs tömege keresésből  
 $M_H > 114.4 \text{ GeV}; H \sim h^0$
  - Elektroyenge adatok illesztése
  - Semleges Higgs-bozonok (h és A) keresése
- $BR(b \rightarrow s\gamma)$  mérések B-gyáraknál
- A müon anomális mágneses momentuma (BNL)
- **WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe):** sötét anyag (DM) mennyisége, indirekt
- DM direkt (nem-)észlelése  $\nu$ -detektorokkal



# MSSM-tömegspektrum: előítéleteink

*Ha szkeptikusak maradunk is, nem árt tudnunk, mire esküszik a modellépítők többsége (S.P. Martin után, szabadon)*

- R-paritás nemigen sérül
- LSP:  $\tilde{\chi}_1^0$  vagy gravitínó
- Gluínó tömege  $M_3 \equiv m(\tilde{g}) \gg m(\tilde{\chi}_1^0), m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^\pm)$
- $m(\tilde{u}_i) \sim m(\tilde{d}_i) \sim m(\tilde{c}_i) \sim m(\tilde{s}_i) \gg m(\tilde{\ell}_i)$
- $m(\tilde{u}_i) \sim m(\tilde{d}_i) \sim m(\tilde{c}_i) \sim m(\tilde{s}_i) > (0, 6_{\text{MSUGRA}} \dots 0, 8_{\text{GMSB}})m(\tilde{g})$
- $m(\tilde{u}_L) \geq m(\tilde{u}_R) \dots m(\tilde{s}_L) \geq m(\tilde{s}_R)$  és  
 $m(\tilde{e}_L) \geq m(\tilde{e}_R), m(\tilde{\mu}_L) \geq m(\tilde{\mu}_R)$  mert  $M_L^2 \sim M_R^2 + 0,5m_{1/2}^2$ .
- $\tilde{t}_1, \tilde{b}_1$  a legkönnyebb skvarkok és  $\tilde{\tau}_1$  a legkönnyebb töltött slepton (keveredés, Higgs-csatolás)
- $m(h^0) \lesssim 150 \text{ GeV} \ll m(A), m(H^\pm), m(H^0)$



# SUSY-keresés

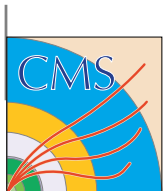
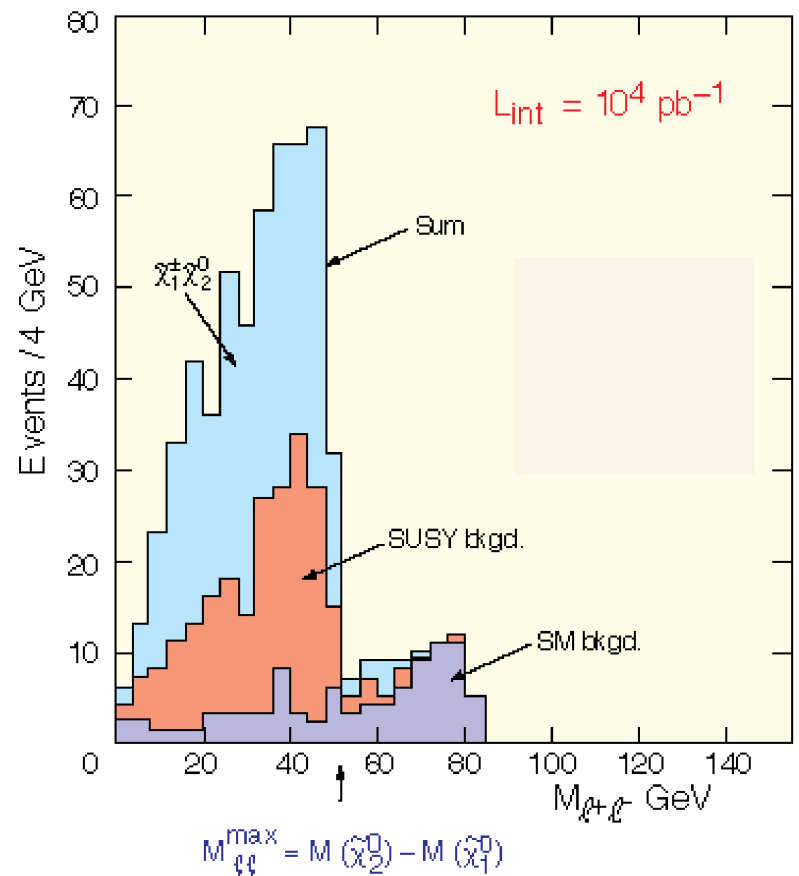
Párban keletkezhet, csak másik SUSY-ra bomolhat  
(ha R megmarad)

A legkönnyebb (LSP) stabil, semleges, észlelhetetlen

Tipikus SUSY-bomlások (LSP =  $\tilde{\gamma}$ ):

Jele: hiányzó energia

- skvark:  $\tilde{q} \rightarrow q + \tilde{g}; q + \tilde{\gamma}$
- slepton:  $\tilde{l} \rightarrow l + \tilde{\gamma}$
- gluínó:  $\tilde{g} \rightarrow q + \bar{q} + \tilde{\gamma}; g + \tilde{\gamma}$
- wínó:  $\tilde{W} \rightarrow e + \nu_e + \tilde{\gamma}$





# SUSY-keresés: PDG-2006

## Supersymmetric Particle Searches

Limits are based on the Minimal Supersymmetric Standard Model.

Assumptions include: 1)  $\tilde{\chi}_1^0$  (or  $\tilde{\gamma}$ ) is lightest supersymmetric particle;

2)  $R$ -parity is conserved; 3) With the exception of  $\tilde{t}$  and  $\tilde{b}$ , all scalar quarks are assumed to be degenerate in mass and  $m_{\tilde{q}_R} = m_{\tilde{q}_L}$ . 4) Limits for sleptons refer to the  $\tilde{\ell}_R$  states.

See the Particle Listings for a Note giving details of supersymmetry.

$\tilde{\chi}_i^0$  — neutralinos (mixtures of  $\tilde{\gamma}$ ,  $\tilde{Z}^0$ , and  $\tilde{H}_i^0$ )

Mass  $m_{\tilde{\chi}_1^0} > 46$  GeV, CL = 95% [all  $\tan\beta$ , all  $\Delta m_0$ , all  $m_0$ ]

Mass  $m_{\tilde{\chi}_2^0} > 62.4$  GeV, CL = 95%

[ $1 < \tan\beta < 40$ , all  $m_0$ , all  $m_{\tilde{\chi}_2^0} - m_{\tilde{\chi}_1^0}$ ]

Mass  $m_{\tilde{\chi}_3^0} > 99.9$  GeV, CL = 95%

[ $1 < \tan\beta < 40$ , all  $m_0$ , all  $m_{\tilde{\chi}_3^0} - m_{\tilde{\chi}_1^0}$ ]

$\tilde{\chi}_i^\pm$  — charginos (mixtures of  $\tilde{W}^\pm$  and  $\tilde{H}_i^\pm$ )

Mass  $m_{\tilde{\chi}_1^\pm} > 94$  GeV, CL = 95%

[ $\tan\beta < 40$ ,  $m_{\tilde{\chi}_1^\pm} - m_{\tilde{\chi}_1^0} > 3$  GeV, all  $m_0$ ]

$\tilde{e}$  — scalar electron (selectron)

Mass  $m > 73$  GeV, CL = 95% [all  $m_{\tilde{e}_R} - m_{\tilde{\chi}_1^0}$ ]

$\tilde{\mu}$  — scalar muon (smuon)

Mass  $m > 94$  GeV, CL = 95%

[ $1 \leq \tan\beta \leq 40$ ,  $m_{\tilde{\mu}_R} - m_{\tilde{\chi}_1^0} > 10$  GeV]

$\tilde{\tau}$  — scalar tau (stau)

Mass  $m > 81.9$  GeV, CL = 95%

[ $m_{\tilde{\tau}_R} - m_{\tilde{\chi}_1^0} > 15$  GeV, all  $\theta_\tau$ ]

$\tilde{q}$  — scalar quark (squark)

These limits include the effects of cascade decays, evaluated assuming a fixed value of the parameters  $\mu$  and  $\tan\beta$ . The limits are weakly sensitive to these parameters over much of parameter space. Limits assume GUT relations between gaugino masses and the gauge coupling.

Mass  $m > 250$  GeV, CL = 95% [tan $\beta$  = 2,  $\mu < 0$ ,  $A = 0$ ]

$\tilde{b}$  — scalar bottom (sbottom)

Mass  $m > 89$  GeV, CL = 95% [  $m_{\tilde{b}_1} - m_{\tilde{\chi}_1^0} > 8$  GeV, all  $\theta_b$  ]

$\tilde{t}$  — scalar top (stop)

Mass  $m > 95.7$  GeV, CL = 95%

[ $\tilde{t} \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$ , all  $\theta_t$ ,  $m_{\tilde{t}} - m_{\tilde{\chi}_1^0} > 10$  GeV]

$\tilde{g}$  — gluino

The limits summarised here refer to the high-mass region ( $m_{\tilde{g}} \gtrsim 5$  GeV) and include the effects of cascade decays, evaluated assuming a fixed value of the parameters  $\mu$  and  $\tan\beta$ . The limits are weakly sensitive to these parameters over much of parameter space. Limits assume GUT relations between gaugino masses and the gauge coupling,

Mass  $m > 195$  GeV, CL = 95% [any  $m_{\tilde{q}}$ ]

Mass  $m > 300$  GeV, CL = 95% [  $m_{\tilde{q}} = m_{\tilde{g}}$  ]



# SUSY-keresés az LHC-nál

- Keress SM-várakozás fölötti többletet sokjetes, nagy  $E_T^{\text{miss}}$  eseményekből.
- Ha van, járd körbe, *valódi*-e.
- Ha *valódi*, hajts végre rajta előre egyeztetett **SUSY-válogatást**.
- Keress sajátos jellemzőket (pl. hosszú-élettartamú szleptonokra).
- Keress b-jeteket, leptonpárokat,  $\tau$ -t.
- Határozd meg a SUSY-paramétereket **globális illesztéssel, levágások keresésével**.

