

Fizika űrmérnököknek

Dr. Szalóki Imre, Energiatudományi Kutatóintézet, Sugárbiztonsági Laboratórium

Világegyetem felépítése

A Világegyetem szerkezeti felépítése és kialakulásának mai elmélete: Ősrobbanás, táguló világegyetem, Hubble-törvény, vöröseltolódás, kozmikus háttérsugárzás, részecskefizikai korszakok, atomok kialakulása, kémiai elemek, EM sugárzás, Sötét anyag és sötét energia.

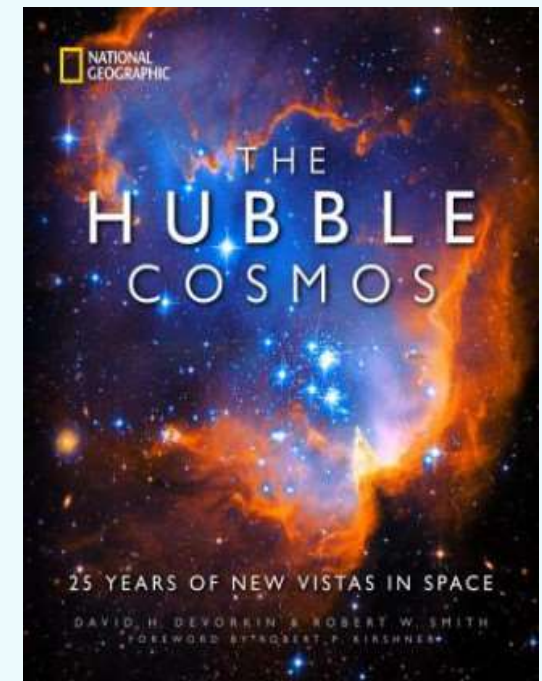
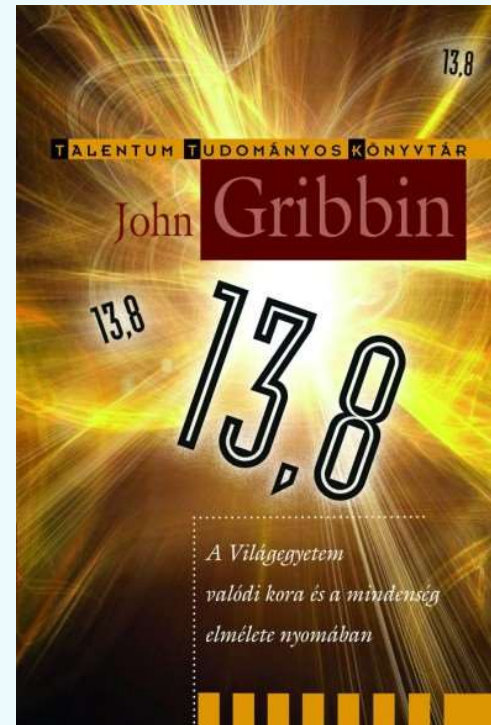
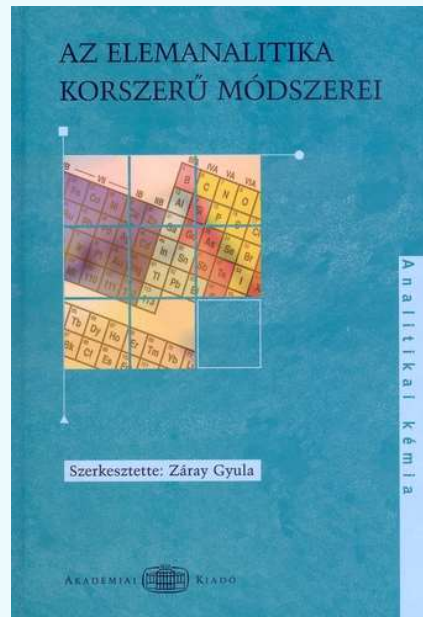
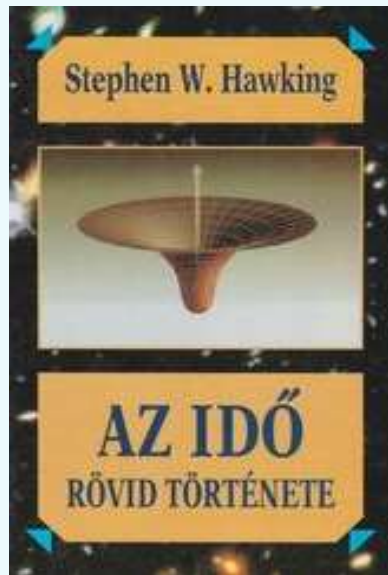
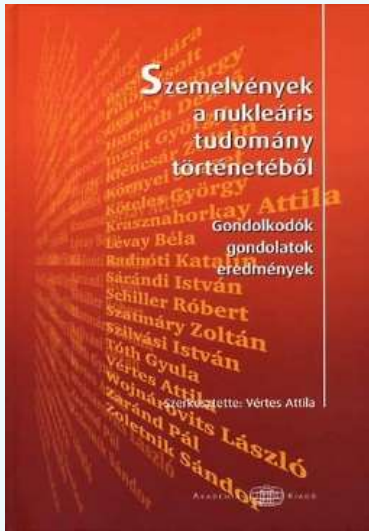
Világegyetem megismerésének eszközei és módszerei

Kémiai elemek keletkezése, csillagok és galaxisok létrejötte és fejlődése, bolygók, fekete lyukak, sugárzások és sugárforrások az űrben. A kozmosz kutatásának eszközei: távcsövek, rádió- és röntgencsillagászat, műholdas és űrszondás megfigyelések: Hubble, Chandra, Voyager, New Horizons, NuSTAR, Planck.

Naprendszer és a Föld

Földi megfigyelő eszközök és módszerek (Auger-, Cserenkov, IceCube, Solar neutrínó kísérletek). A kozmikus sugárzás földi észlelése. A Tejútrendszer és a Naprendszer felépítése, szerkezete, a Naprendszer bolygórendszerének kialakulása, a Föld csillagászati vonatkozású tulajdonságai. A Naprendszer vizsgálati lehetőségei, meteoritok, holdi és marsi kőzetek elemzése, eszközei.

Javasolt irodalom



Milyen kémiai elemek építik fel az Univerzumot?

- D. Mengyelejev és L. Meyer 1869
- Atomok periódusos rendszere
- Atomok kémiai tulajdonságai szerinti új rendezési elv
- “Lyukak” a periódusos rendszerben: Ge
- Modell: kvantummechanika
- Hogyan keletkeztek ?

Kémiai elemek periódusos rendszere																		
1	1 H																2 He	
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104	105	106	107	108	109									
Lantanidák			58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
Aktinidák			90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

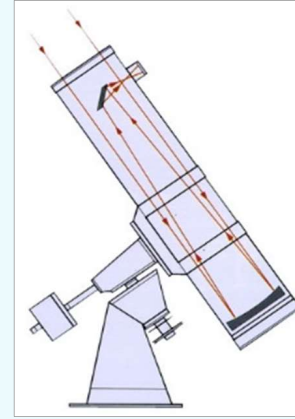
Fémek
Fél fémek

Nemfémek
Nemesgázok

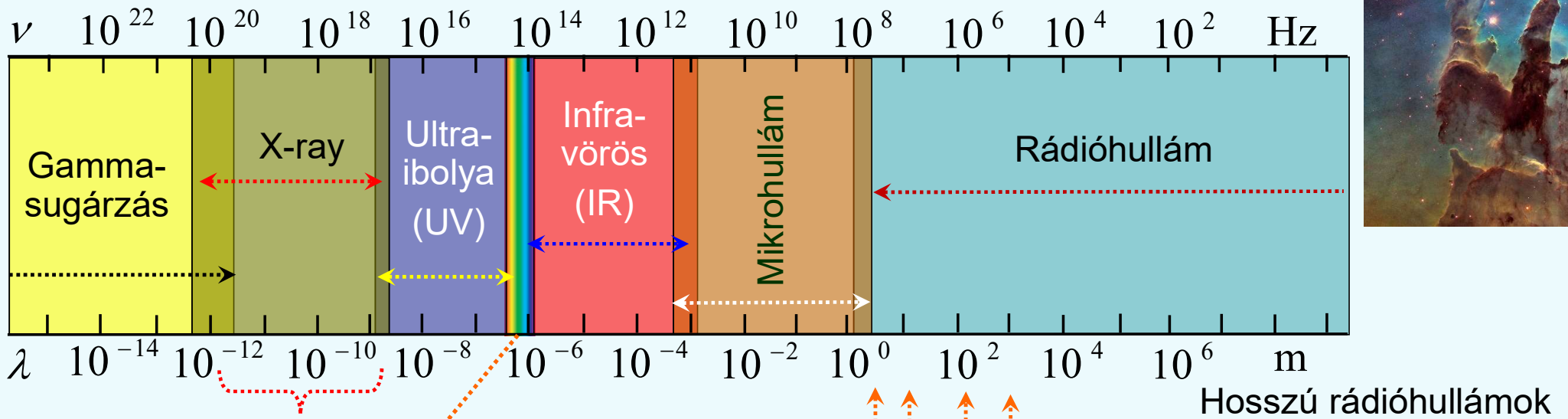
Átmeneti fémek
Ritkaföldfémek

Hogyan szerezhethetünk információt a Világegyetem felépítéséről?

1. Megfigyelés az optikai tartományban: az elektromágneses hullámtartomány egy szűk sávja
emberi látás, optikai távcsövek, Galillei-féle távcső, Newton-rendszerű tükrös távcső
2. Gamma-sugárzás
3. Röntgensugárzás
4. Infrásugárzás
5. Ultraibolya sugárzás
6. Rádióhullámok → rádiócsillagászat
7. Kozmikus sugárzás: elektron, proton, atomok, gammasugárzás
2. Gravitációs hullámok →
3. Kémiai elemek eloszlása az Univerzumban



Elektromágneses (EM) színek tartományai



$0,1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 1 \text{ \AA}$ $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

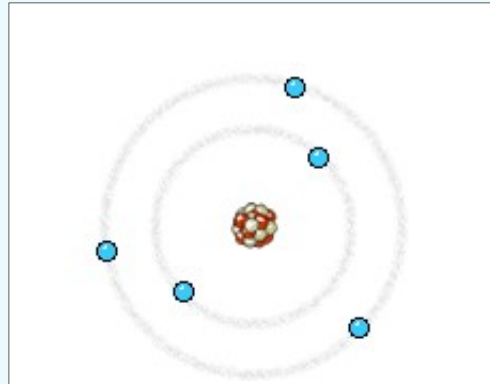
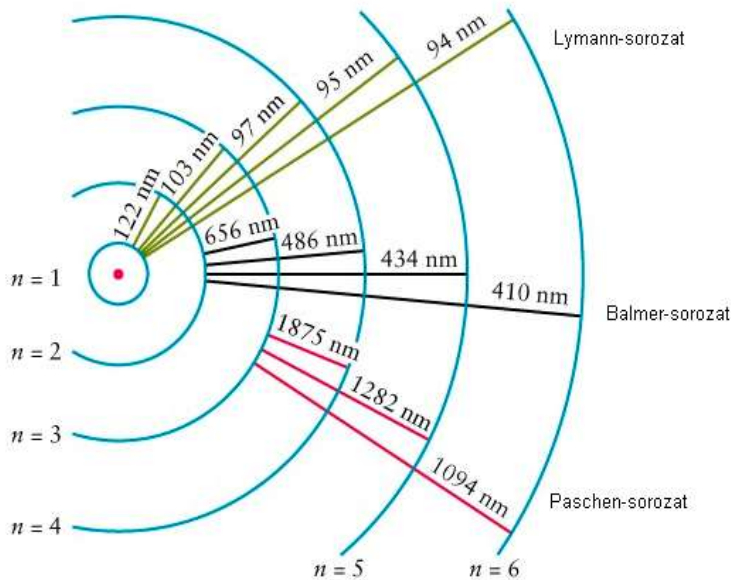
$\lambda = 1 - 0,01 \text{ nm}$ $E = h\nu = \frac{h}{T} = \frac{hc}{\lambda}$ $E(\text{keV}) = \frac{1,24}{\lambda(\text{nm})}$

Radar
 TV
 FM
 AM

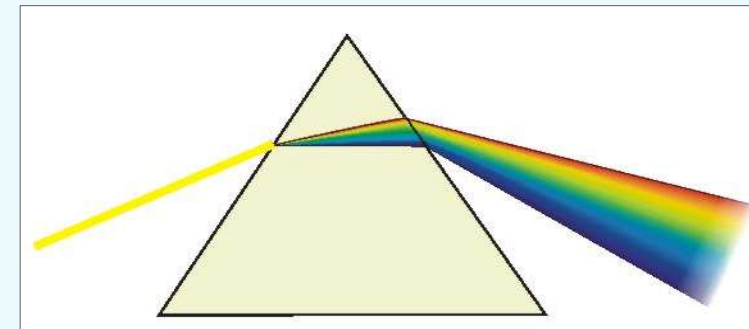
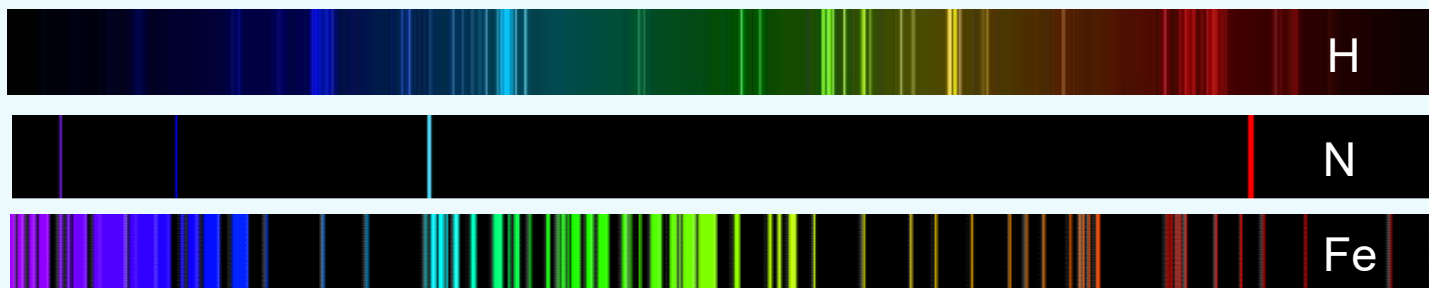


Optikai spektroszkópia

Hidrogénatom elektronszerkezete

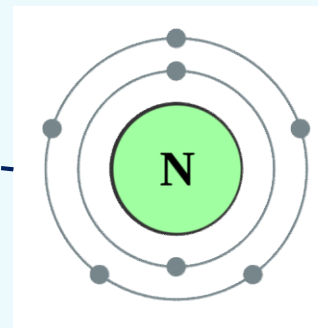


- Ionizáció az atomburokban
- Atom legerjesztődése \Rightarrow EM sugárzás emissziója az optikai és a röntgentartományban
- EM sugárzás abszorpciója
- Spektrális felbontás
- Optikai rács \Rightarrow színekre bontás
- Diszperzió \Rightarrow a törésmutató hullámhosszfüggése

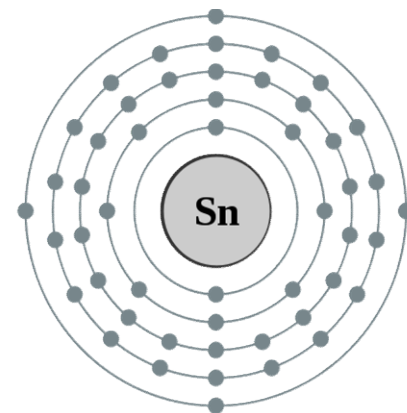


Kémiai elemek elektronszerkezete

- Optikai spektrumok és az atomok elektronszerkezetének kapcsolata
- Bohr-modell \Rightarrow atomi elektronburok kvantummechanikai modellje

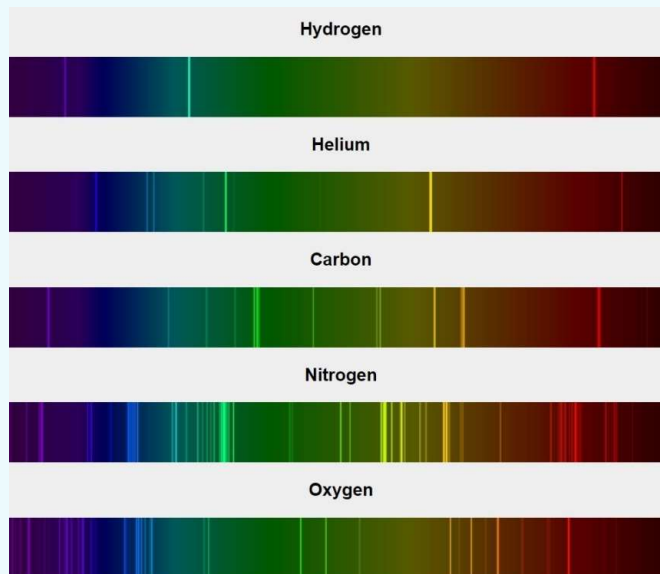


$$\text{Sn } 50 = 2 + 8 + 18 + 18 + 4$$

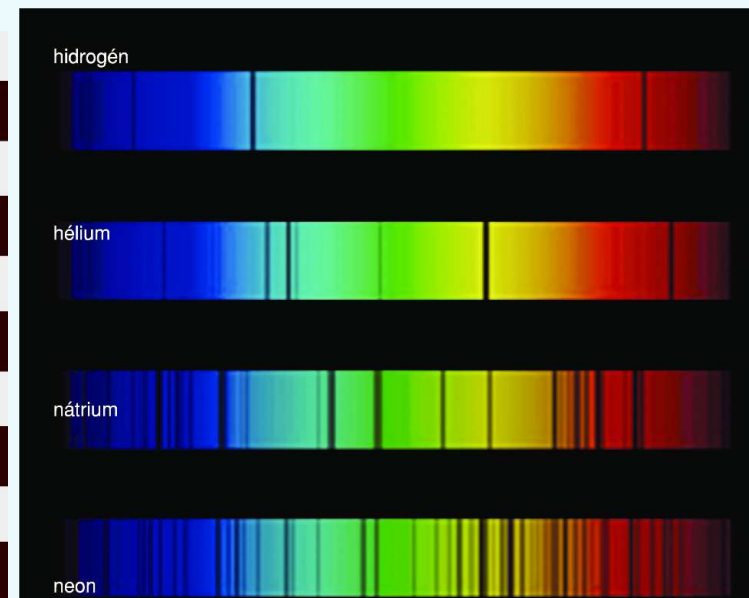


Elektronhéj	Fő kvantumszám	Mellék kvantumszám	Elektronok száma
K	1	0	2
L	2	0	2
		1	6
N	3	0	2
		1	6
		2	10
O	4	0	2
		1	6
		2	10
		3	14

Emissziós színekép

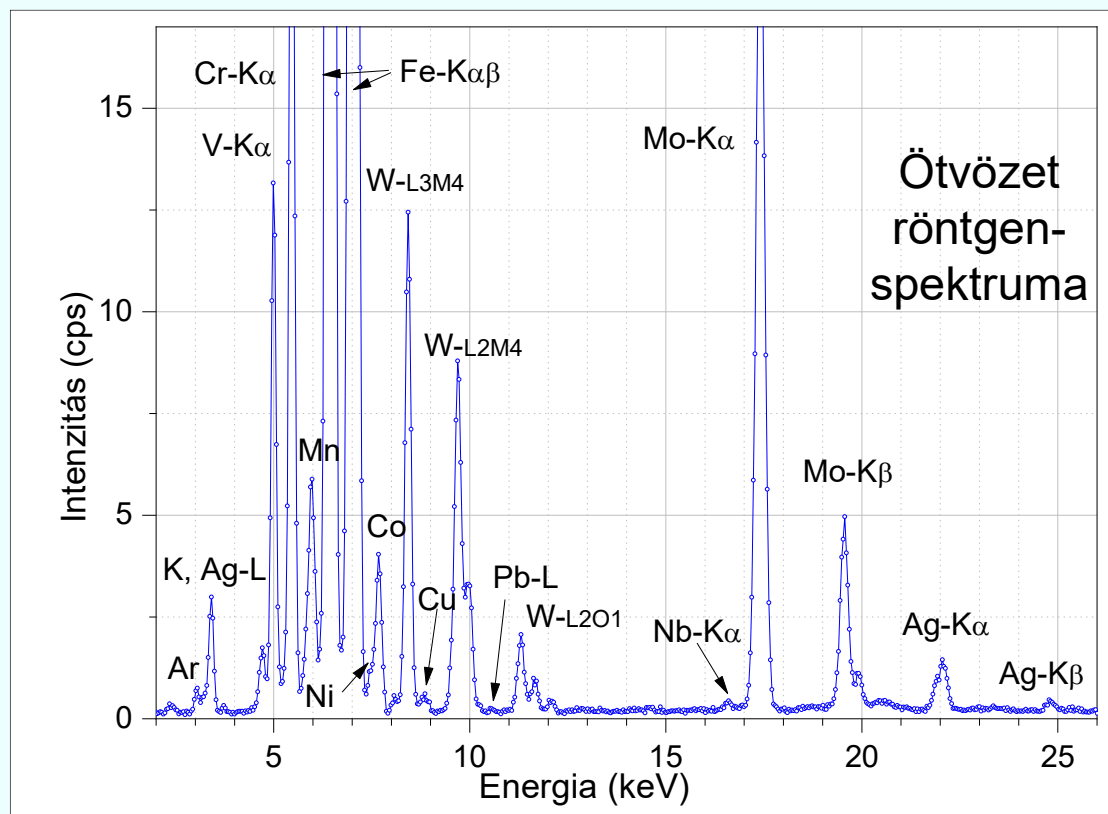


Abszorpciós színekép

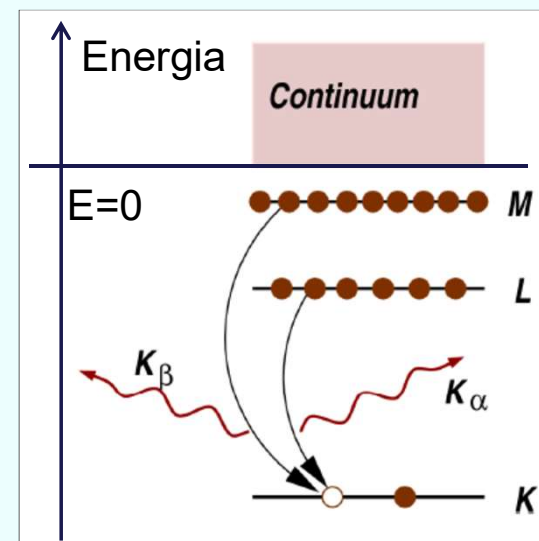


Röntgenspektroszkópia alapelemei

- Ionizáció az atomburokban \Rightarrow elektronhiányos állapot \Rightarrow vakancia betöltése
- Karakterisztikus röntgenfotonok emissziója \Rightarrow detektálás energia szerint
- Röntgensúcsok \Rightarrow újlenyomat az atomok rendszámáról



Atomi elektron-átmenetek és röntgenfotonok emissziója

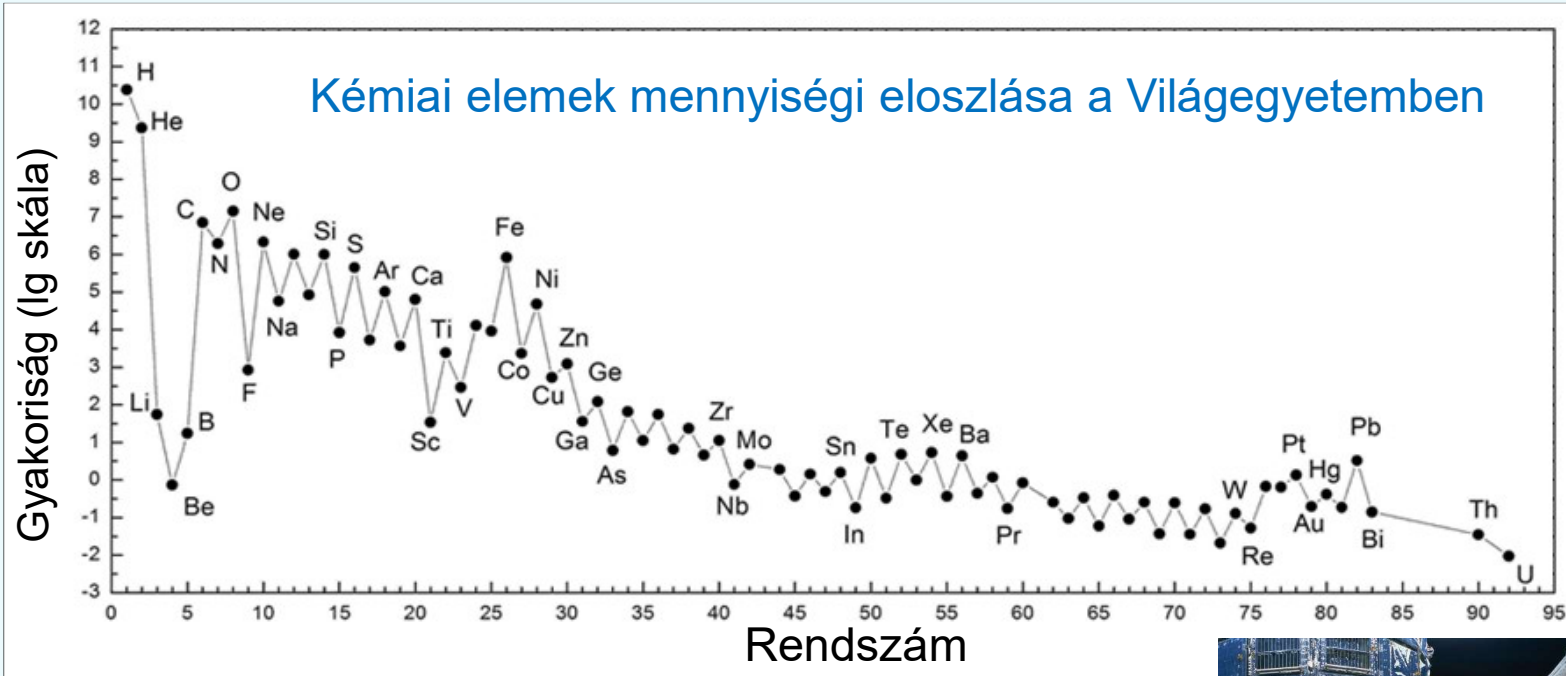


- Röntgenforrások a kozmoszban \Rightarrow
- Csillagok felszíne
- Csillagközi ködök...



Kémiai elemek a Világegyetemben

Kémiai elemek mennyiségi eloszlása a Világegyetemben



Tapasztalatok forrásai

- Nap EM spektruma
- Csillagok EM spektruma
- Optikai spektroszkópiák
- Távcsövek a Földön
- Távcsövek a világűrben
- Szondák a Naprendszerben

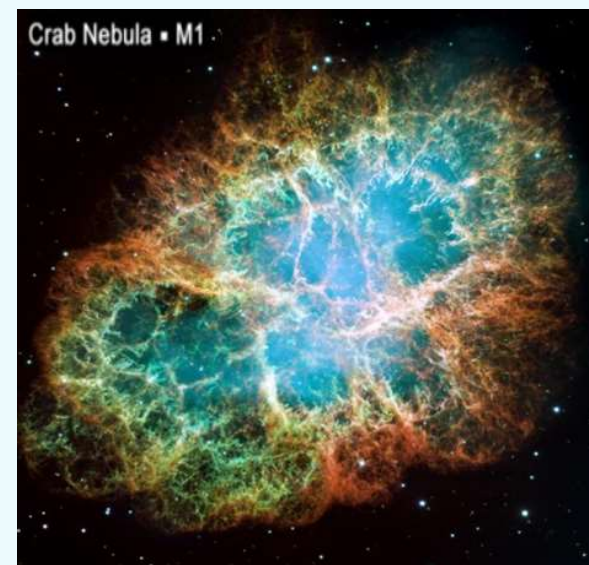


- Meteorok kémiai elemek szerinti összetétele
- Izotópok meteorokban
- Holdközet kémiai összetétele
- Anyagok elemzése a Marson



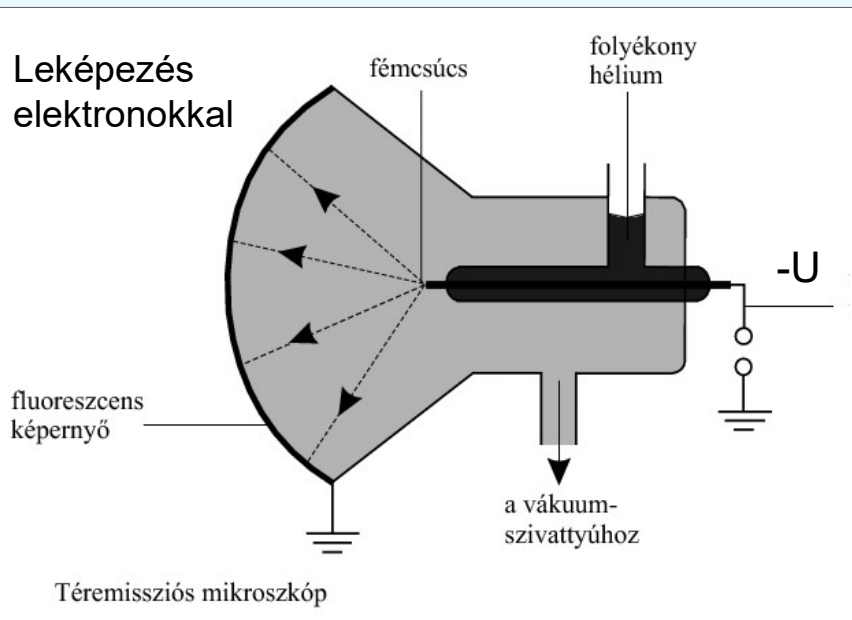
Csillagászati objektumok átlagos elemösszetétele

Kémiai elem			Óceánok (kg/dm ³)	Emberi test (s%)	Szárazföld (s%)	Légkör (s%)	Gallaxis (at/mol)
1	Hidrogén	H	10,8	10,2	0,14	---	
6	Szén	C	0,003	18,1	0,059	---	10,0
7	Nitrogén	N	$5 \cdot 10^{-5}$	---	0,02	78,1	3,1
8	Oxigén	O	85,8	65,0	46,1	20,9	24,0
11	Nátrium	Na	1,1	0,1	0,24	---	0,06
12	Magnézium	Mg	0,13	0,05	0,23	---	1,0
14	Szilícium	Si	---	---	---	---	1
16	Kén	S	0,09	0,2	0,035	---	0,45
17	Klór	Cl	1,9	0,2	0,015	---	0,009
18	Argon	Ar	$4,5 \cdot 10^{-5}$	---	0,0035	0,96	0,1
19	Kálium	K	0,04	0,2	0,21	---	0,0037
20	Kalcium	Ca	0,04	1,5	0,42	---	0,064



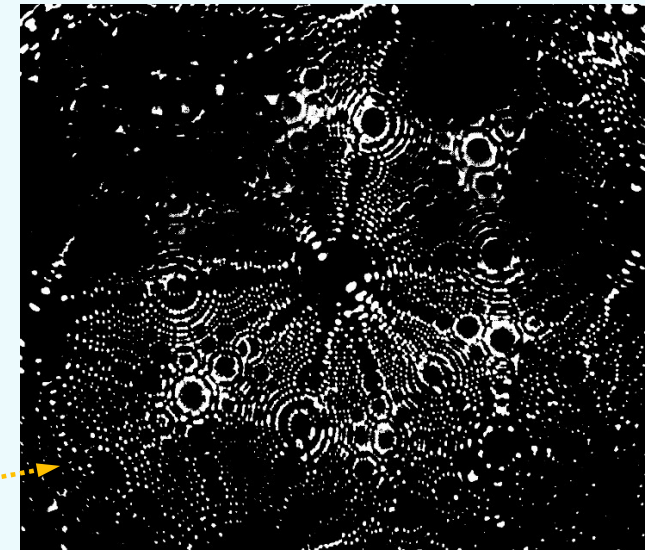
Láthatóak-e az atomok? Téremissziós mikroszkóp

W csúcs \Rightarrow elektromos csúcshatás \Rightarrow leképezés elektronokkal



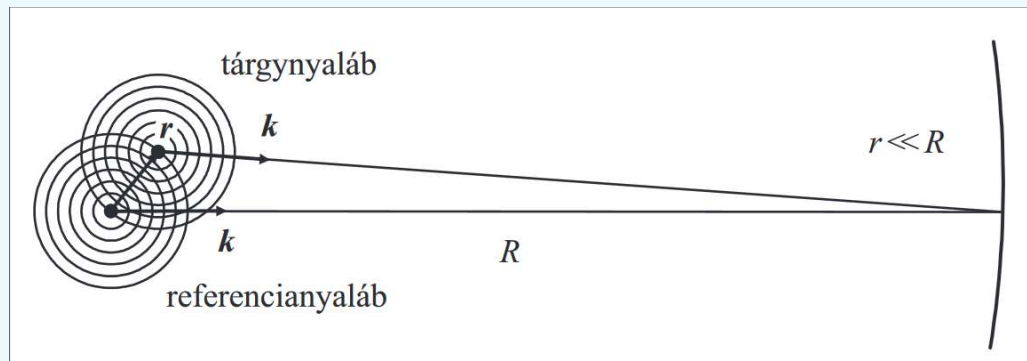
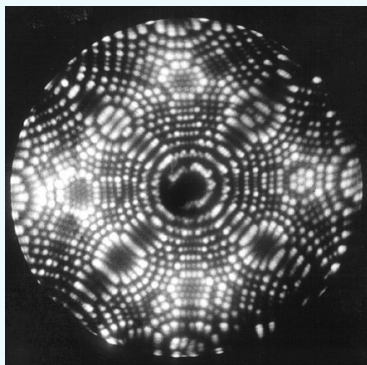
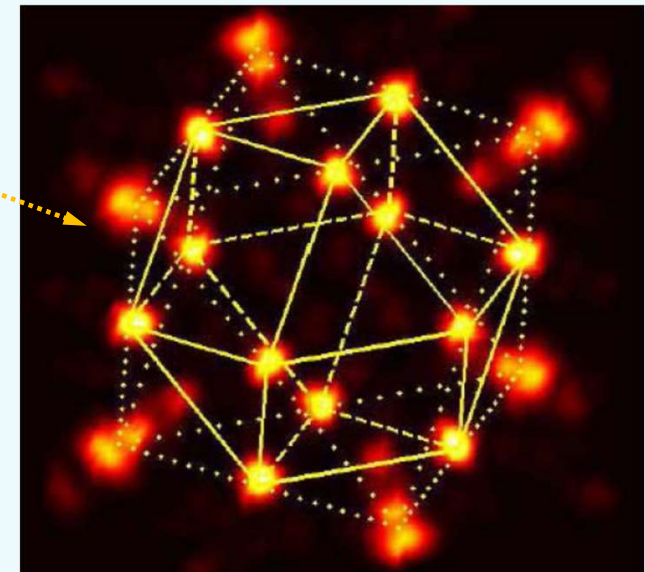
Térionizációs mikroszkóp

- G. W. Müller 1956
- Hélium gáz \Rightarrow ionizáció
- $T = 4,2 \text{ K}$ He ionok
- Leképezés



Röntgenholográfia

CoO kristály elemi cellája

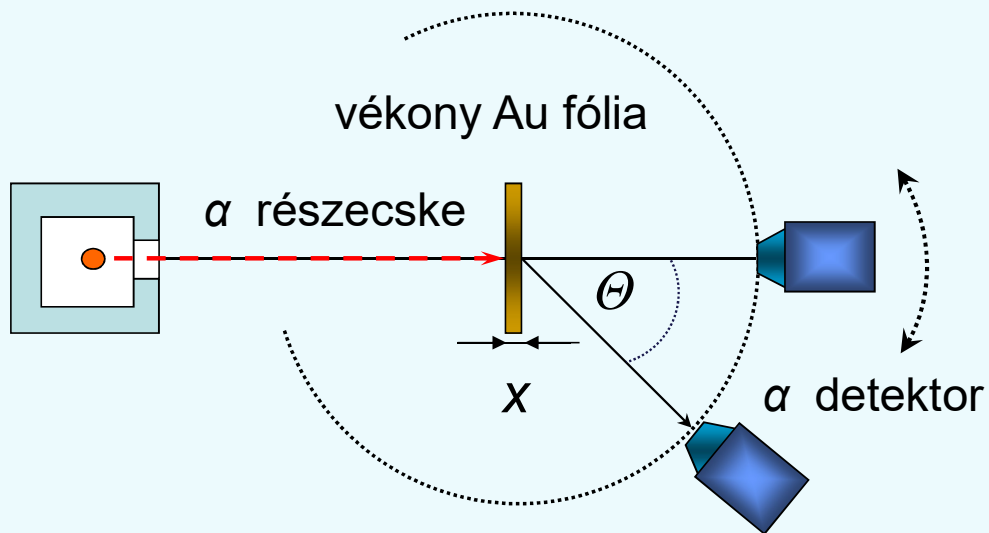




Van-e belső szerkezete az atomoknak?

- Van-e atommag?
- Ha igen, akkor milyen méretű az atommag?

Rutherford-féle kísérlet és atommodell

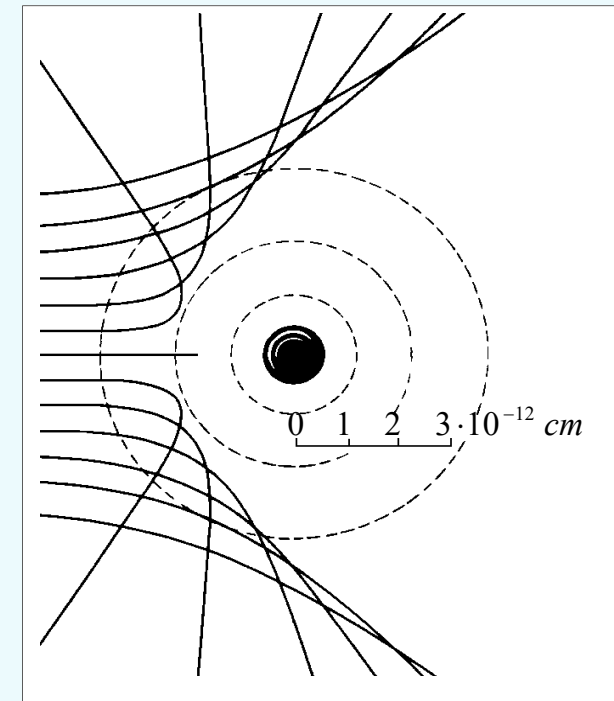


Alfarészecskék mozgása az atommag környezetében

- Tömegarányok
 - elektron
 - α részecske
 - arany atommag

$$\frac{m_{\alpha}}{m_e} \approx 7800$$

$$\frac{m_{\alpha}}{m_{Au}} \approx 0.02$$



Radioaktív bomlás, atommag

- A. Henri Becquerel, 1896, radioaktív bomlás, NP 1903
- M. S. Curie és P. Curie, 1898, rádium, NP 1903
- Radioaktív bomlás \Rightarrow atommag átalakulása $N(t) = N(t=0)e^{-\lambda t}$
- Atommagok száma az idő függvényében $N(t)$

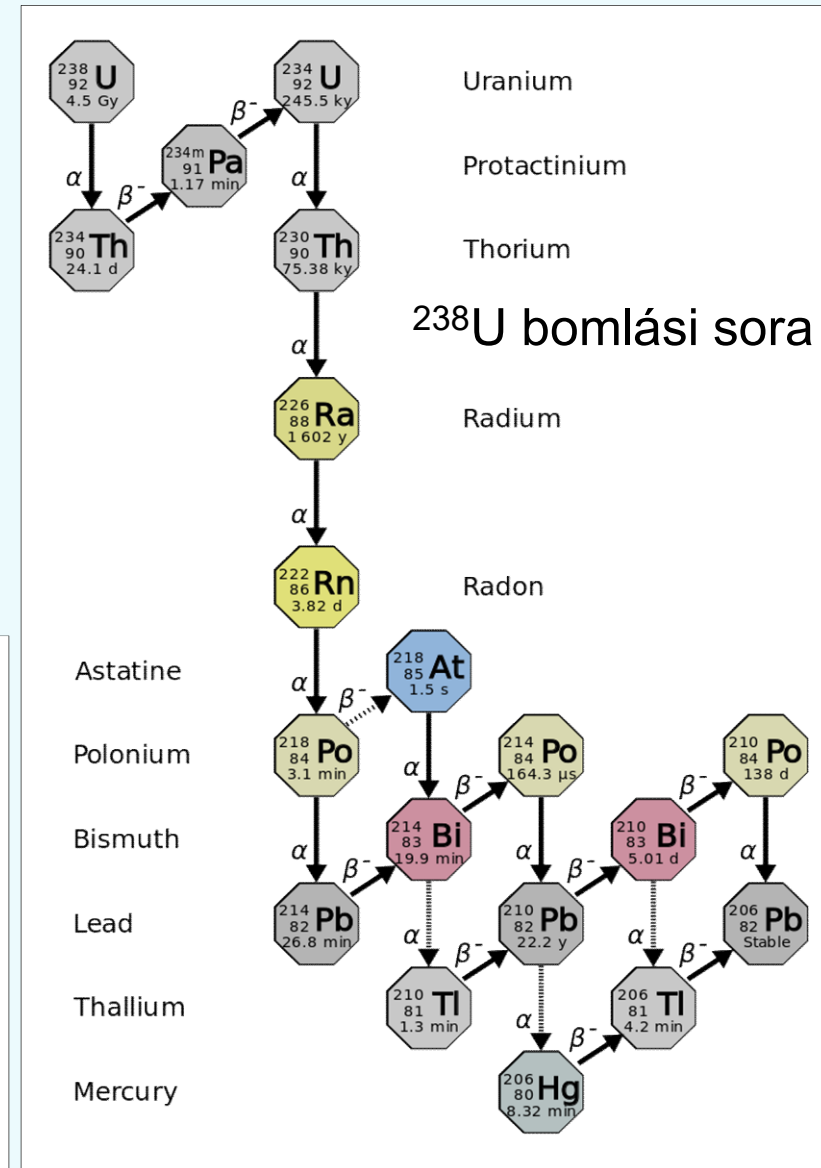
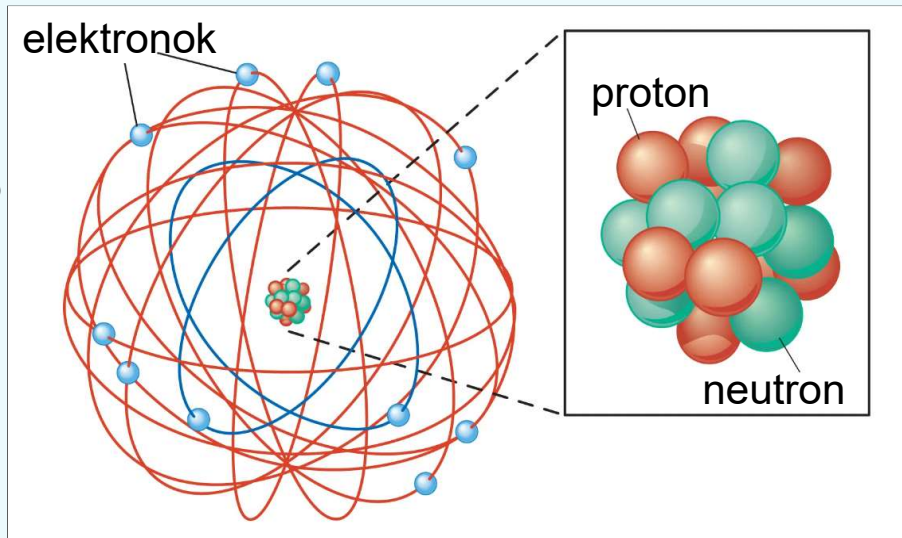
• Aktivitás $a = -\frac{dN}{dt}$ bomlási állandó λ

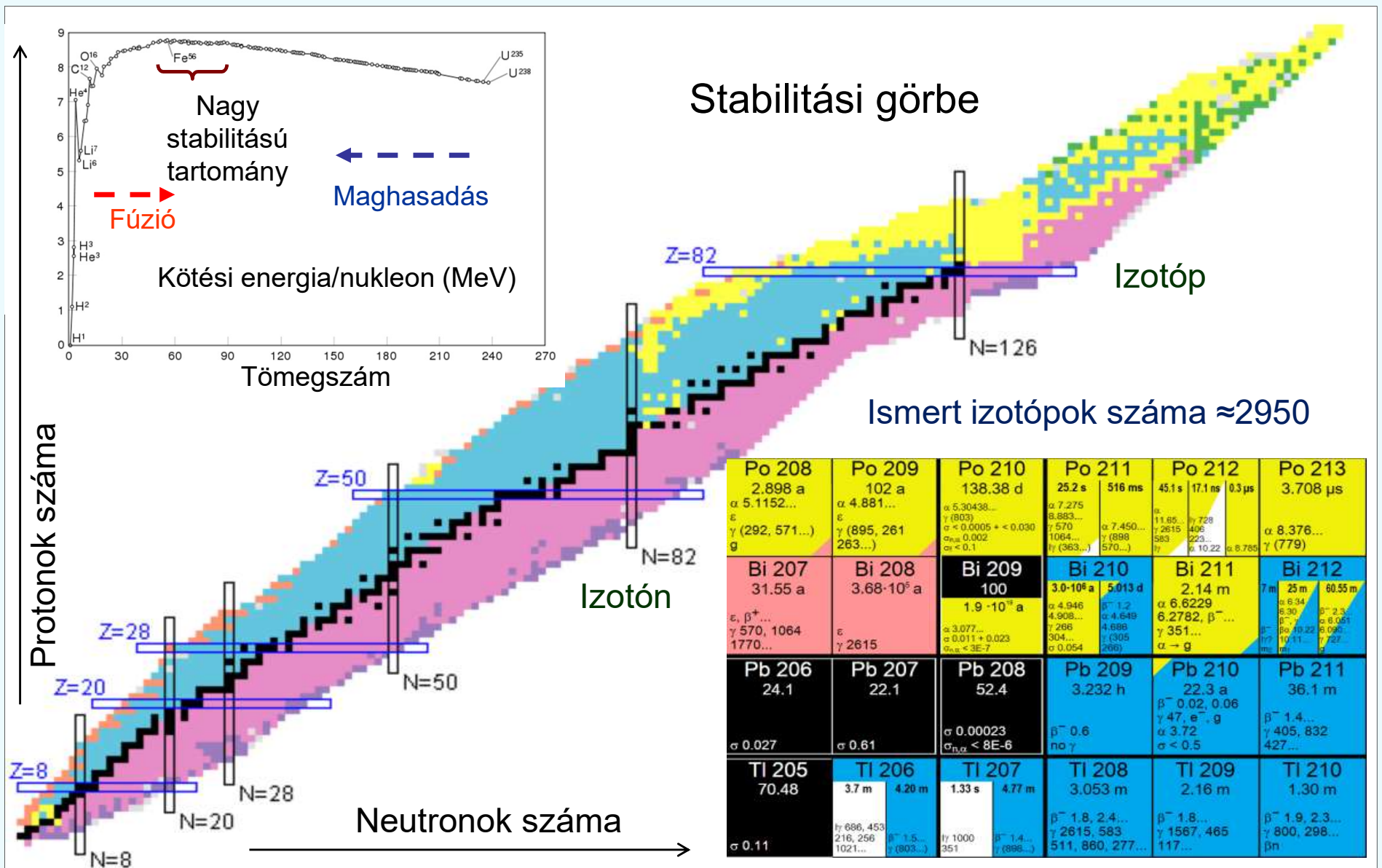
• Felezési idő

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \infty$$

• Nukleonok: proton, neutron

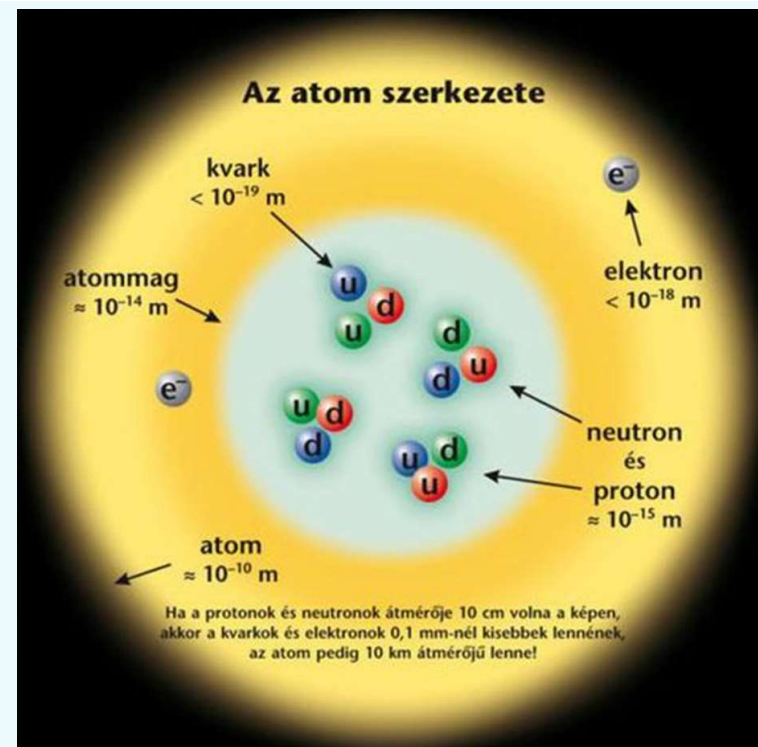
• Atommag



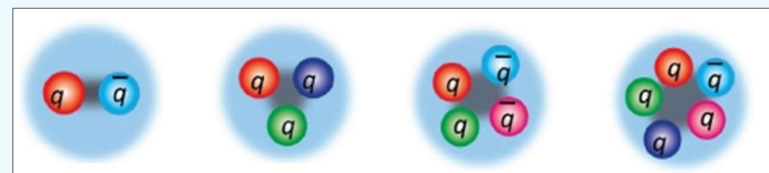


Alapvető kölcsönhatások

Kölcsönhatás	Közvetítő részecske	Töltés	Relatív erősség	Hatótáv	Leírási példa
Erős	Gluonok	Színtöltés	1	10^{-15} m	$n + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}_{36}\text{Kr} + {}_{56}\text{Ba} + 3n$
Elektromágneses	Foton	Elektromos töltés	10^{-2}	∞	$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$
Gyenge	Z^0 W^+ W^-	Gyenge töltés	10^{-12}	10^{-18} m	${}^{90}_{38}\text{Sr} \rightarrow {}^{90}_{39}\text{Y} + e^-$
Gravitáció	graviton (?)	Tömeg	10^{-36}	∞	$F_{12} = G \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2}$



- Hadronok (kvakok és gluonok kötött állapotai) bármelyik alapvető kölcsönhatásban részt tudnak venni



- Nukleonok vonzó kölcsönhatása: maradék kölcsönhatás (hasonló jelleg, mint a Van der Waals-kölcsönhatások)
- Elektromágneses kölcsönhatás = Gyenge és az Elektromágneses modellek egyesítése
- A gravitációs kölcsönhatásnak még nem ismert közvetítő részecskéje

AZ ELEMI RÉSZECSKÉK ÉS ALAPVETŐ KÖLCSÖNHATÁSOK Standard Modelje

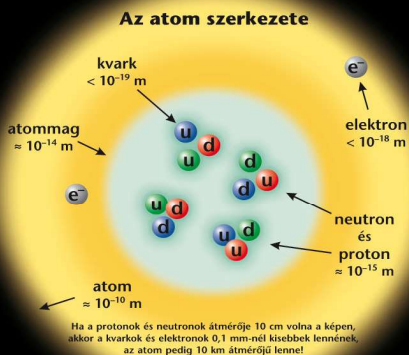
Az elemi részecskékre és alapvető kölcsönhatásokra vonatkozó jelenlegi legpontosabb ismereteinket összegzi a Standard modell, amely az erős és egyesített elektroyenge kölcsönhatások elmélete. A gravitáció, jóllehet alapvető kölcsönhatás, nem része a Standard modellnek.

Fermionok – az anyag építőköve, spinjük: 1/2, 3/2, 5/2 ...

kvarkok (spin = 1/2)			leptonok (spin = 1/2)		
jel/iz	tömeg GeV/c ²	elektr. töltés	jel/iz	tömeg GeV/c ²	elektr. töltés
u	0,003	2/3	ν _e	< 10 ⁻⁸	0
d	0,006	-1/3	e	0,000511	-1
c	1,3	2/3	ν _μ	< 0,0002	0
s	0,1	-1/3	μ	0,106	-1
t	175	2/3	ν _τ	< 0,02	0
b	4,3	-1/3	τ	1,7771	-1

Tömeg: a részecskefizikában az energiát elektronvoltban (eV), a tömeget GeV/c² egységekben ($E = mc^2$) mérik. 1 GeV = 10⁹ eV = 1,60 · 10⁻¹⁰ J. A proton tömege 0,938 GeV/c² = 1,67 · 10⁻²⁷ kg.

Töltés: az elektromos töltéseket a protontöltés egységében adjuk meg. A proton töltése 1,60 · 10⁻¹⁹ coulomb.



Bozonok – a kölcsönhatások közvetítői, spinjük: 0, 1, 2 ...

erős – szín (spin = 1)			elektroyenge (spin = 1)		
jel/név	tömeg GeV/c ²	elektr. töltés	jel/név	tömeg GeV/c ²	elektr. töltés
g	0	0	γ	0	0
W	80,39	-1	W	80,39	1
Z	91,187	0	Z	91,187	0

Szintöltés: a kvarkok és gluonok „szintöltést” hordoznak. A kvarkok három-, a gluonok nyolcféle „színűek” lehetnek. Kvarkok és gluonok szabadon nem létezhetnek. Őket a szintöltések között ható alapvető erős kölcsönhatás kétféleképpen kötheti össze színsemleges hadronokba: vagy három kvark alkothat egy bariont, vagy egy kvark-antikvark-pár alkothat egy mezont.

A visszamaradó erős kölcsönhatás a színsemleges nukleonok – vagyis az atommagot alkotó neutronok és protonok – között hat (ez felelős a „magerőkért”), jellegében a Van der Waals-kölcsönhatáshoz hasonlít.

A spin a részecske saját perdülete. A spint \hbar egységekben adjuk meg, ahol $\hbar = h/2\pi = 6,58 \cdot 10^{-25}$ GeVs = 1,05 · 10⁻³⁴ Js.

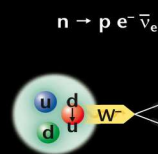
Fermionikus hadronok

barionok (qqq) és antibarionok (q̄q̄q̄) – több száz ismert barion van					
jel/név	kvark-össz.	tömeg GeV/c ²	elektr. töltés	spin	
p	uud	0,938	1	1/2	
p̄	ūūd	0,938	-1	1/2	
n	udd	0,940	0	1/2	
Λ	uds	1,116	0	1/2	
Ω	sss	1,672	-1	3/2	

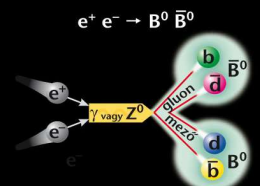
Antianyag: a részecskének általában van „antirészecskéje”, amely azonos tulajdonságú, de ellentétes töltésű, mint a részecske. Néhány elektromosan semleges részecske egyben saját antirészecskéje is. Ilyen a Z⁰-bozon, a γ-foton, vagy az η_c-mezon, de a K⁰-kaon, mely d kvark-antikvark-párból áll, már nem.

Az ábrák a jellemző fizikai folyamatokat csak szemléltetik, hozzájuk értelmes módon skálát rendelni nem lehet. A kékeszöld tartományok a gluonok felhőjét, illetve mezéjét, a piros vonalak a kvarkok pályáját mutatják.

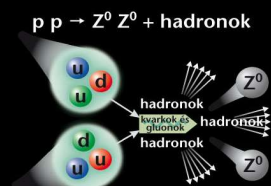
tulajdonság	kölcsönhatás	erős		gyenge		elektromágneses		gravitációs	
		alapvető	visszamaradó	íz	elektromos töltés	tömeg, energia, lendület	(nem az SM része)		
amire hat	szintöltés	szintöltés	lásd magyarázat	íz	elektromos töltés	tömeg, energia, lendület			
ezek a részecskéik érzik	kvarkok, gluonok	kvarkok, gluonok	hadronok	kvarkok, leptonok	elektr. töltötték	minden			
közvetítő részecske	gluonok	gluonok	mezonok	W ⁺ , W ⁻ , Z ⁰ -bozon	γ-foton	graviton			(még nem figyelték meg)
relatív erősség									
két up kvarkra	10 ⁻¹⁸ m	25	-	0,8	1	10 ⁻⁴¹			
két proton az atommagban	3 · 10 ⁻¹⁷ m	60	-	10 ⁻⁴	1	10 ⁻⁴¹			
		-	20	10 ⁻⁷	1	10 ⁻³⁶			



Egy neutron protonra, elektronra és antineutrínóra bomlik egy virtuális W-bozon (gyenge kölcsönhatás) közvetítésével. Ez a béta-bomlás.



Nagy energiájú elektron–pozitron-ütkezésben (elektroyenge kölcsönhatás) B⁰-anti-B⁰ keltése, γ-foton vagy Z⁰-bozon közvetítésével.



Nagy energiájú, erősen kölcsönható protonok ütközésekor keletkezhetnek hadronok és nehéz részecskék, például Z-bozonok.

Bozonikus hadronok

mezonok (q̄q) – több száz ismert mezon van					
jel/név	kvark-össz.	tömeg GeV/c ²	elektr. töltés	spin	
π	uđ	0,140	1	0	
K	sū	0,494	-1	0	
ρ	uđ	0,770	1	1	
B	dđ	5,279	0	0	
η	cĉ	2,980	0	0	

Az eredeti posztert a **Contemporary Physics Project** (<http://CPEPweb.org>) készítette. A magyar változat **Kármán Tamás** és **Somogyi Gábor** munkája.

Megjelent a **Fizikai Szemle** mellékletként, a **Paksi Atomerőmű Zrt.** támogatásával. Letölthető a <http://fizikaiszemle.hu> honlapról.

Kereskedelmi forgalomba nem hozható, oktatási célra szabadon felhasználható.



Speciális és általános relativitáselmélet, Albert Einstein 1905,1926

Speciális relativitáselmélet

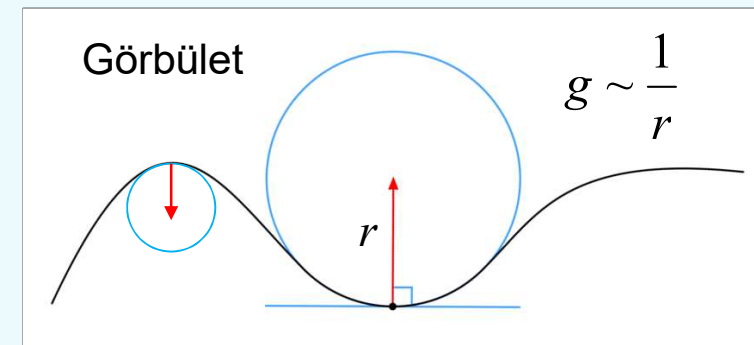
- Michelson-Morley kísérlet: a fénysebesség állandó minden inerciarendszerben (olyan vonatkoztatási rendszer, amiben érvényes Newton 1. törvénye, tehetetlenségi törvény)
- Minden fizikai törvény azonos módon (egyenletekkel) írható le az inerciarendszerekben.

- Lorentz-transzformáció vonatkoztatási rendszerek között

$$x^* = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad t^* = \frac{t - xv/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Általános relativitáselmélet

- Eötvös Lóránt gravitációs mérései: tehetetlen és súlyos tömeg arányossága
- Minden vonatkoztatási rendszerben ugyanolyan értékű a fénysebesség
- A tér görbületét az anyag eloszlása határozza meg
- Analógia: elektromos tér erőssége a töltött vezető felületének görbületével arányos
- Merkúr perihéliumának a mozgása
- Fény terjedése a Nap gravitációs környezetében

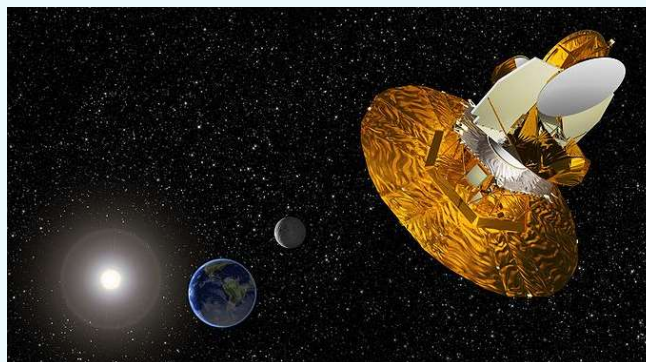


Ősrobbanás elmélete (Big Bang Theory)

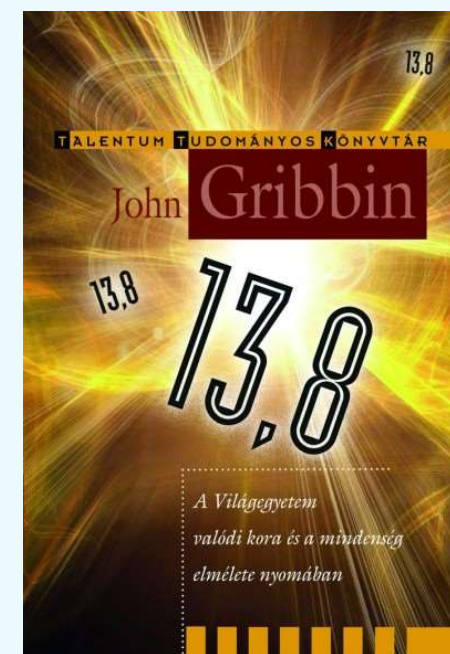
- G. Lemaître 1925-1927 ⇒ Einstein-féle általános relativitáselmélet ⇒ gravitációs egyenletek megoldásai ⇒ táguló Univerzum
- E. Hubbel ⇒ csillagászati mérések ⇒ Hubbel-törvény a tágulás sebességére
- G. G. Gamow 1948: robbanással jöhet létre ilyen anyageloszlás



- Ősrobbanás
- Standard gyertyák ⇒ meghatározott csillagtömeg *Ia*-típusú szupernóvák fényessége azonos
- Azonos fényteljesítmény ⇒ a távolságaik számíthatók
- Világegyetem kora $\approx 13,8$ (Mrd év)

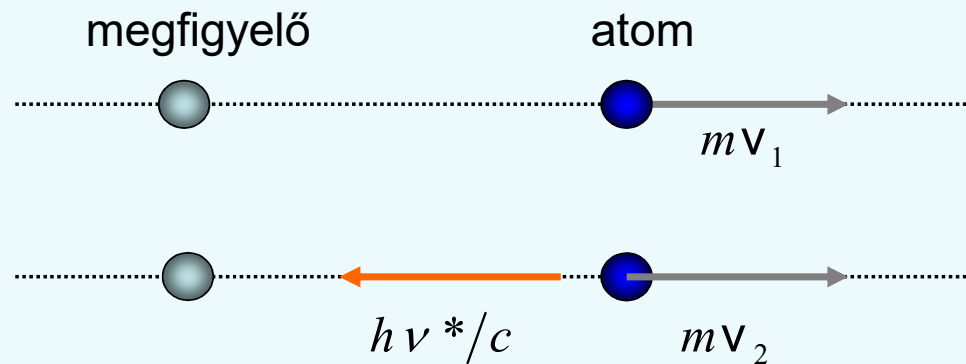
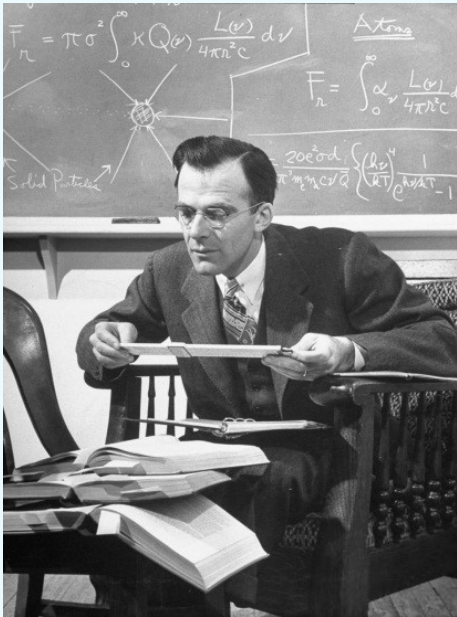
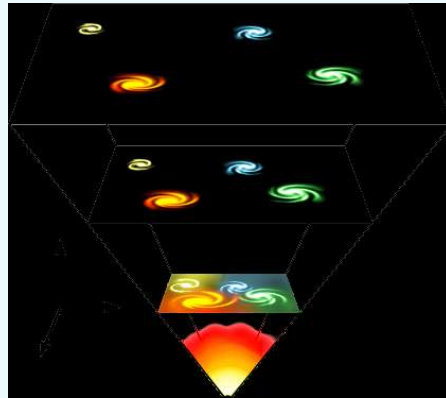
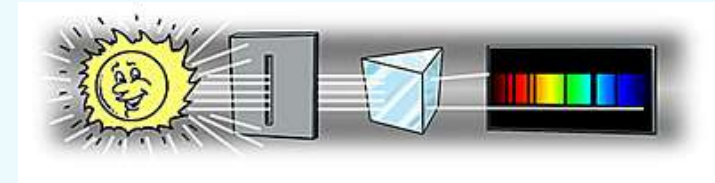


Hubbel űrtávcső



Táguló világegyetem

- 1926 Hubble: színeképek vörös-eltolódása
- 1965 Gamow: kozmikus háttérsugárzás
- Doppler eltolódás



Táguló világegyetem: kísérleti tapasztalatok

$$\frac{\lambda^*}{\lambda} = 1 + \frac{v}{c} \Rightarrow v = c \underbrace{(\lambda^* - \lambda)}_z / \lambda$$

$$\text{ha } z = 0.0033 \Rightarrow v \approx 1000 \text{ km/h}$$

- 1815 Fraunhofer: optikai spektrométer

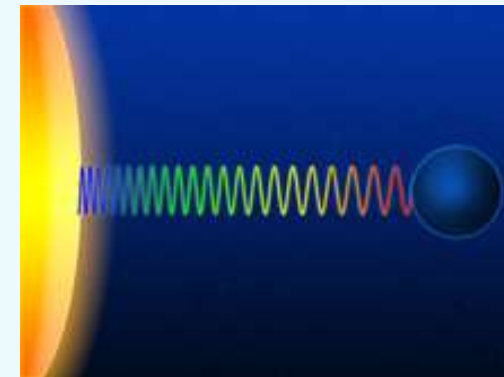
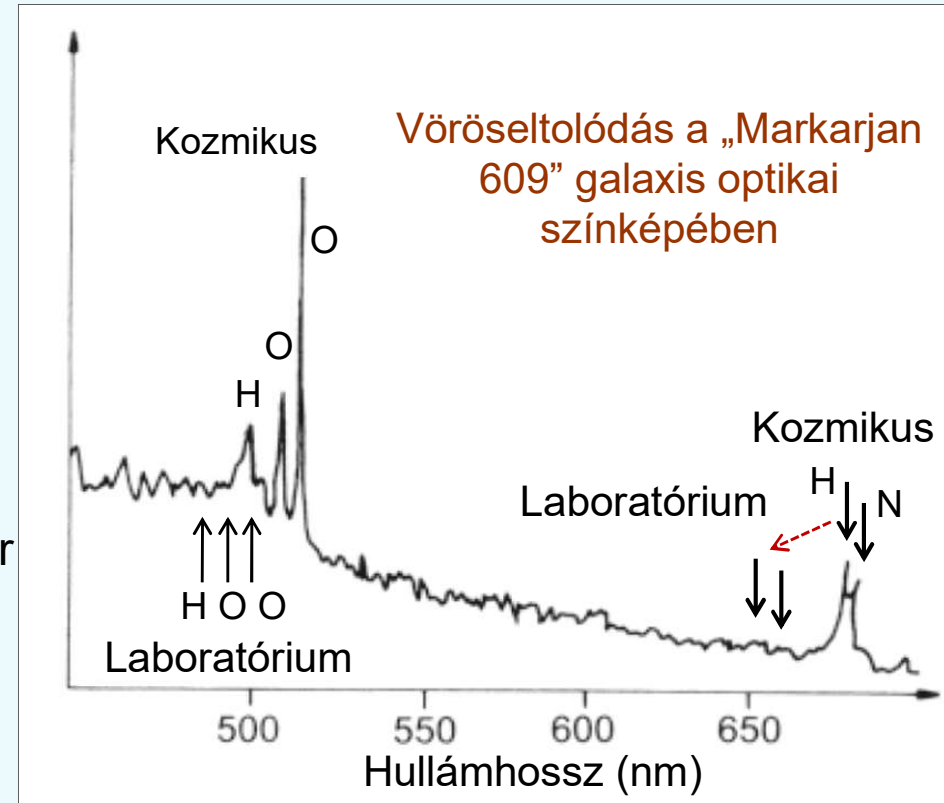
- Vöröseltolódás az abszorpciós és emissziós spektrumokban

- Vöröseltolódás lehetséges okai

1. Doppler-hatás, 1868 W. Huggins

2. Gravitációs hatás a tér szerkezetére \Rightarrow vöröseltolódás

3. Táguló világegyetem

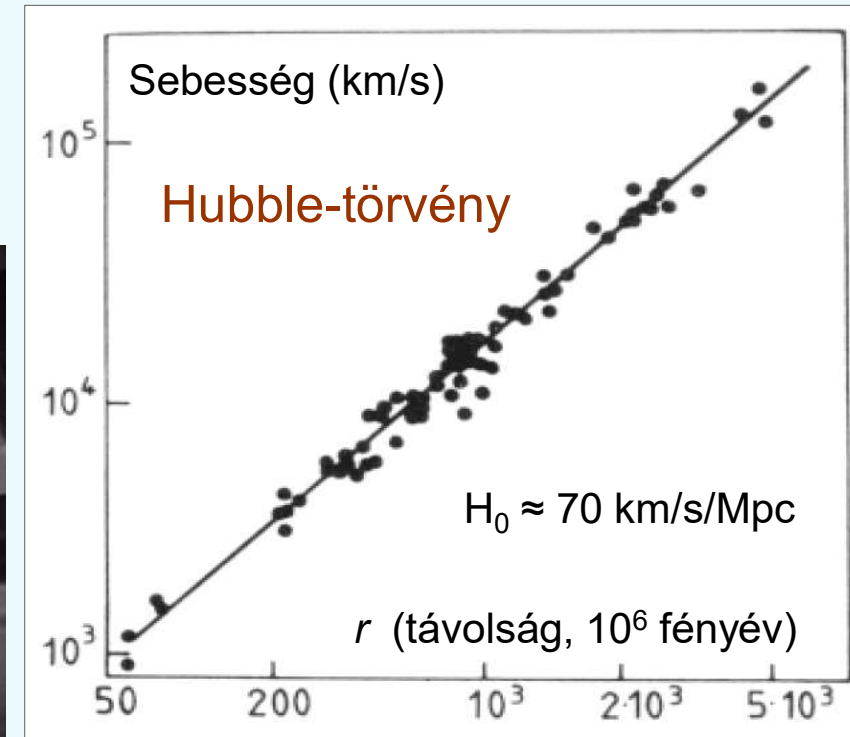


Táguló világegyetem



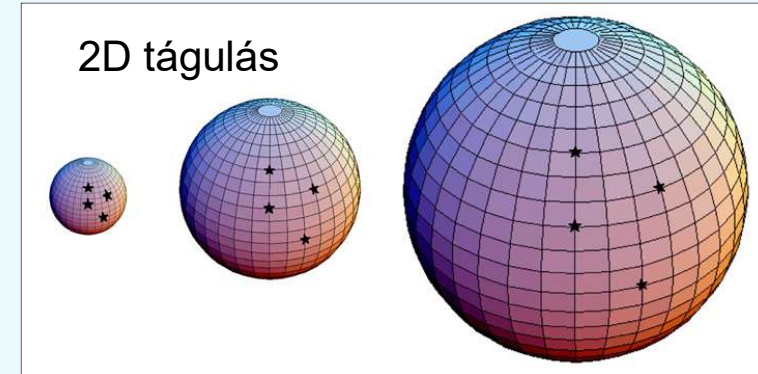
- Vöröseltolódás nagysága arányos a Tejútrendszerrel mért távolsággal
- A galaxisok egymástól mért távolsága és egymáshoz viszonyított sebessége között egyenes arányosság áll fenn
- 1929 Hubble: robbanásszerű tágulás
⇒ táguló homogén (?) és izotróp (?) tömegeloszlás a világegyetemben

- Robbanási analógia: gyorsabb részek messzebbre repültek adott idő alatt
- Hubble törvény $v = rH_0$
- Világegyetem átlagos sűrűsége: 5 H/m^3
- Világegyetem háttérsugárzása: $2,71 \text{ K}$




Táguló világegyetem

- Tágulás nem az anyagcsomók (galaxisok) tényleges, egymáshoz képesti távolodása, hanem a tér szerkezetének megváltozása.
- Az egyes objektumok viszont egymáshoz képest is mozoghatnak
- Az erős és a gyenge kölcsönhatás hatótávolsága rövid a tágulási a jelenséghez ⇒ nem okoz tágulást
- Az elektromágneses kölcsönhatás nagy méretben a kétféle töltés egymásra kifejtett vonzása miatt az eredő hatás semleges lesz ⇒ nem okoz tágulást



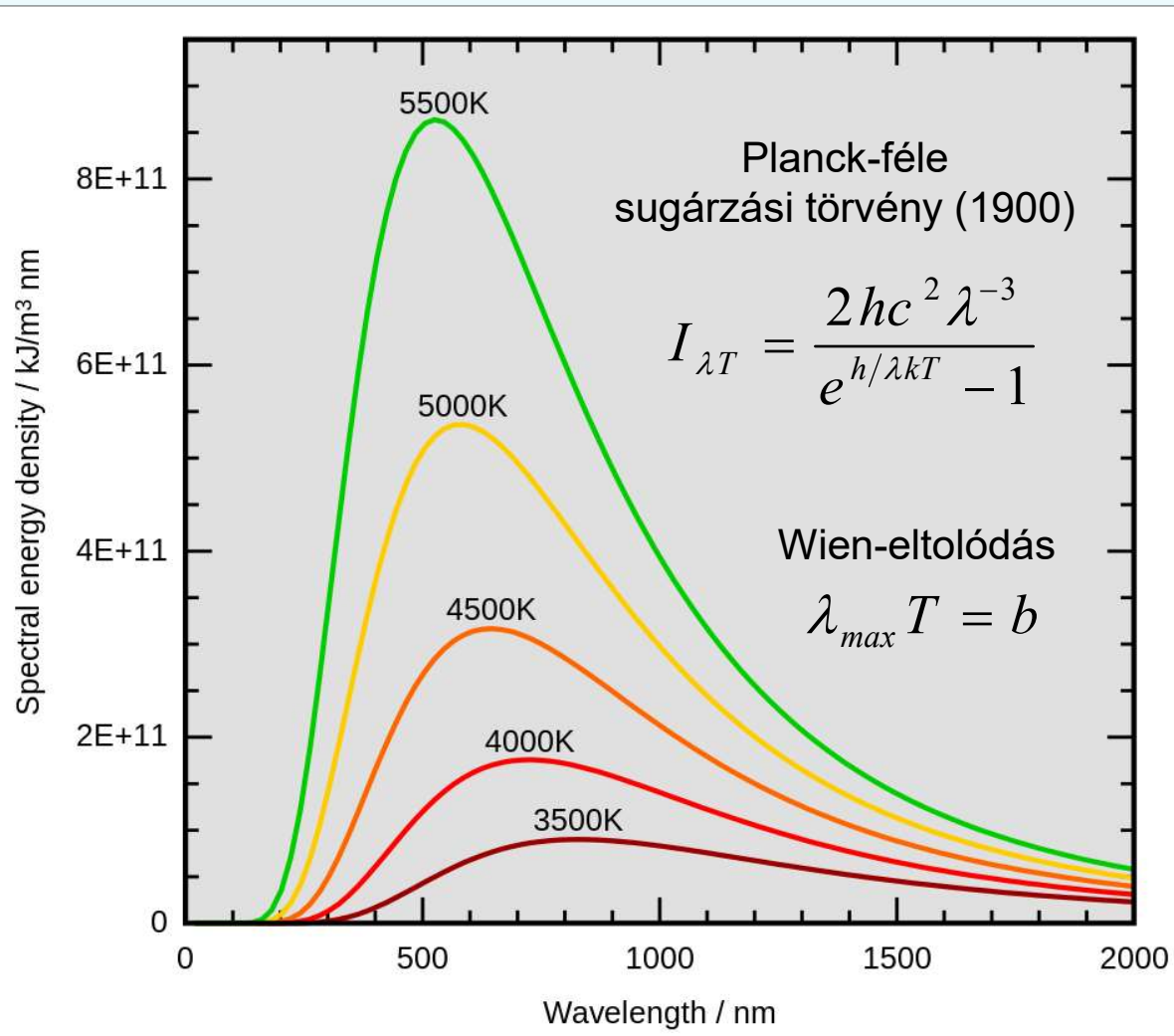
- Gravitáció leírása a téridő görbületével ⇒ forrása a térben lévő anyag: inhomogén eloszlás, különböző anyagfajták.
- Probléma: meg kell ismerni az egyes anyagfajták összes tulajdonságát és térbeli eloszlását ⇒ matematikailag leírható a Világegyetem dinamikai fejlődése.
- Természet Világa, 2019, 150. évf. 6. sz.

Világegyetem fontosabb asztrofizikai adatai

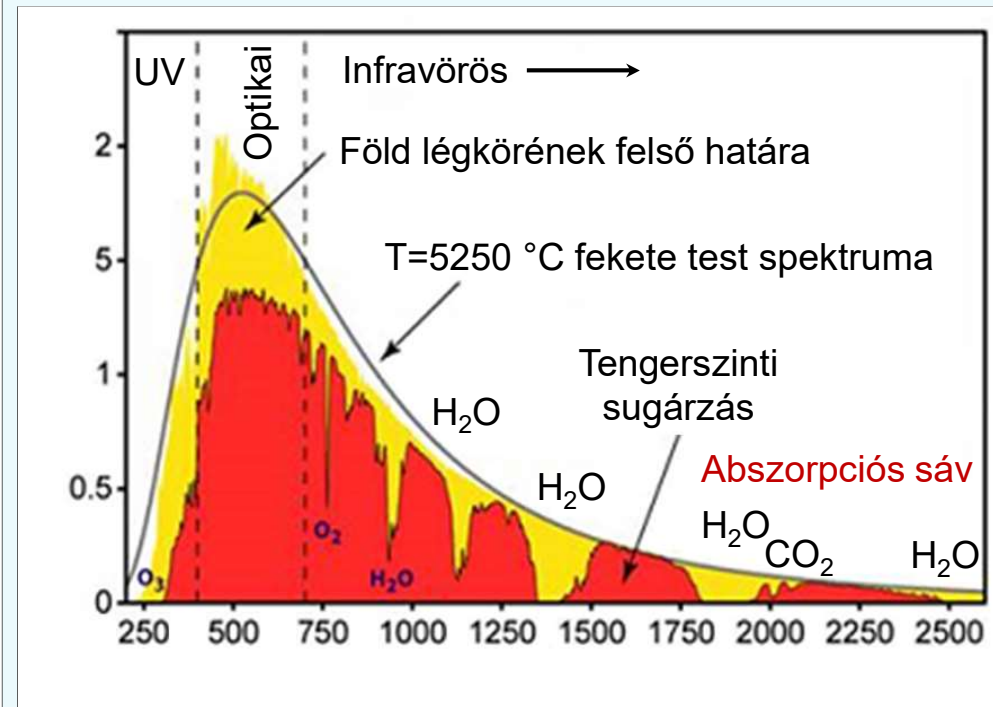
	Világegyetem	Tejútrendszer	Naprendszer	
			Nap	Föld
 Elemek	10^{10} csillagrendszer	10^{11} csillag	----	----
Kor	$1,5-2,0 \cdot 10^{10}$ év	$1,5 \cdot 10^{10}$ év	10^{10} év	$4,6 \cdot 10^9$ év
Méret	$3 \cdot 10^{25}$ m	$9,5 \cdot 10^{17}$	$1,4 \cdot 10^9$ m	$1,2 \cdot 10^7$ m
Sűrűség	$2 \cdot 10^{-29}$ g/cm ³	---	$2 \cdot 10^{-2}$ g/cm ³	5,5 g/cm ³
Hőmérséklet	$\approx 2,75$ K		Felszín: 6000 K Belül: $1,5 \cdot 10^7$ K	≈ 20 °C
Elemösszetétel	H 72% He 25%	H 72% He 25%	H 73% He 25% C, N, O	O, Si, Al, Fe, Na, K, Mg, Ca,...



Abszolút fekete test hőmérsékleti sugárzása



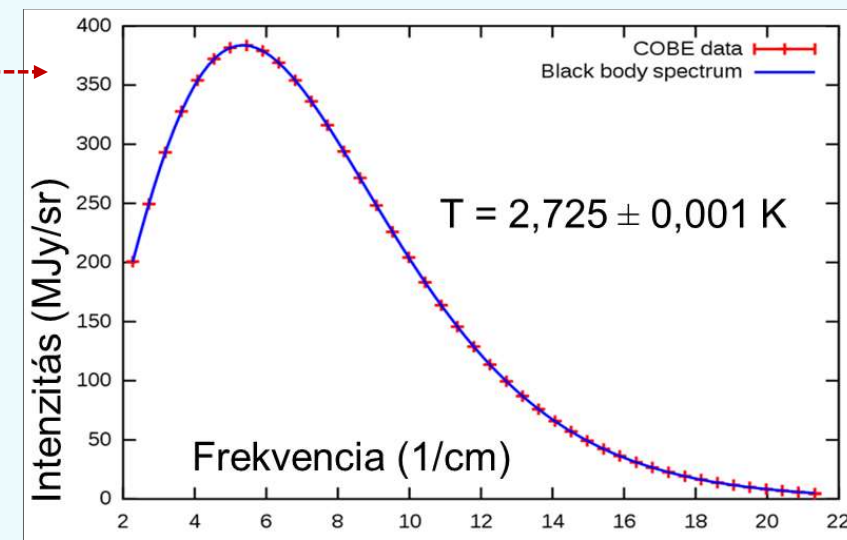
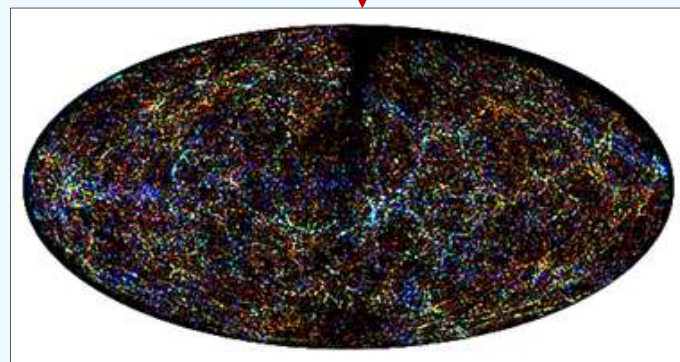
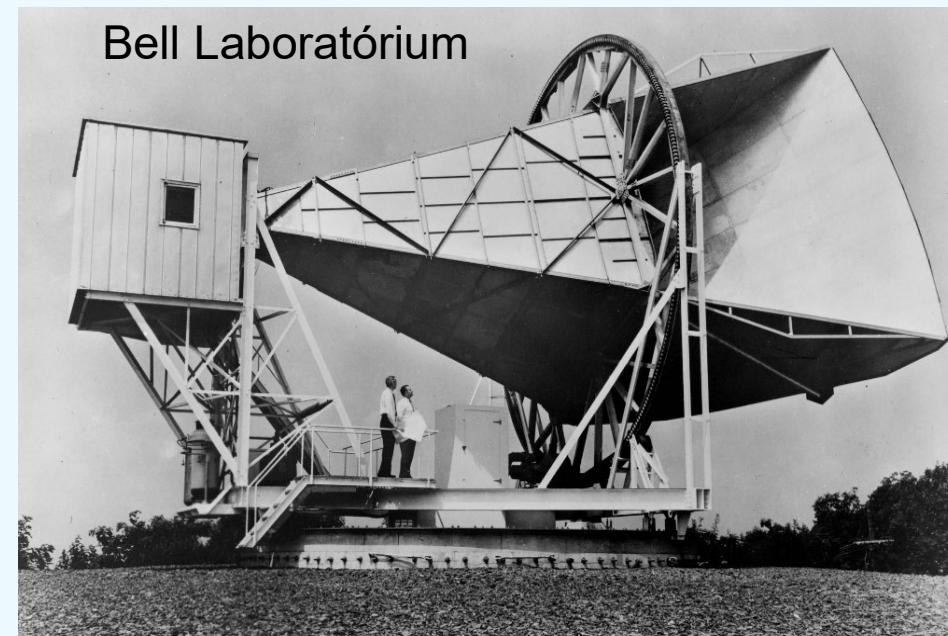
- Optikai megfigyelés eredményét torzítják a légkör optikai jellemzőinek ingadozása
- Observatóriumok magas hegyek csúcsain, világűrben (Hubbel-teleszkóp)
- Planck állandó $h=6,62607 \cdot 10^{-34}$ Js
- Fénysebesség $c=299796$ km/s
- Boltzman állandó $k=1,3807 \cdot 10^{-23}$ J/K



Mikrohullámú kozmikus háttérsugárzás (MKSH)

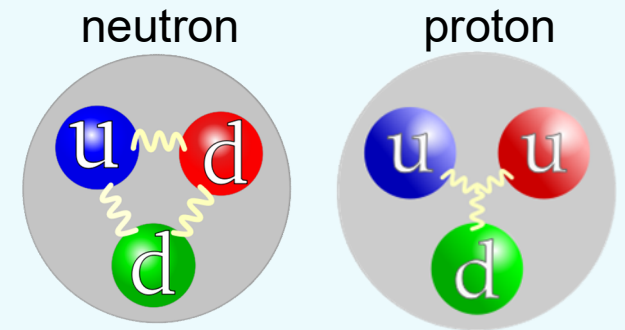
- A. Penzias és W. Wilson (1965), Nobel díj 1978
- COBE (COsmic Background Explorer) 1989
- WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) 2001
- MKSH abszolút feketetest-sugárzás
- Anizotrópia a mikrohullámú térképen $< 0,005\%$

<https://phet.colorado.edu/hu/simulations/blackbody-spectrum>

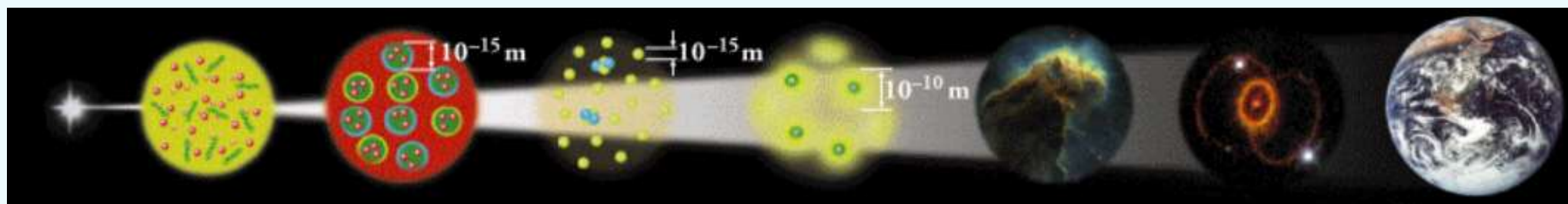


Az Ősrobbanás fizikai (elméleti) története

- Kvaranyag \Rightarrow hadronizáció: létrejön a kvarkok kötött állapota
- Nukleonok \Rightarrow nukleoszintézis: létrejön a nukleonok kötött állapota
- Atommagok, elektronok, fotonok \Rightarrow EM sugárzás, lecsatolódása az anyagról ($\approx 380 \cdot 10^3$ év)
- Könnyű atomok létrejötte után \Rightarrow gravitáció vezérli a világegyetemet
- **Mikrohullámú háttérsugárzás anizotrópiájának felismerése**
- Csillagok és galaxisok keletkezése: csillaközi gázok \Rightarrow nagyobb sűrűségű tartományok kialakulása
- Nagy hőmérséklet a csillagokban \Rightarrow magreakciók beindulása
- Neutron proton arány változása \Rightarrow könnyűelemek arányának kialakulása
- Deutérium Ősrobbanás eredetű \Rightarrow a csillagok működésével csak fogy a mennyisége



t = 0 s	T=10 ¹¹ K	EM sugárzás + anyag	$n + \nu_e \Leftrightarrow p + e^- \quad p + \bar{\nu}_e \Leftrightarrow e^+ + n$
t = 0 - 0,1 s	T=10 ¹⁰ K	EM sugárzás + anyag	proton, neutron tartósabb megjelenése
t = 0,1 - 1,1 s	T=10 ¹⁰ K	Magfizikai folyamatok	$p + n \Rightarrow d \quad d + p \Rightarrow {}^3\text{He} \quad {}^3\text{He} + n \Rightarrow {}^4\text{He}$
t = 1, 1 - 2 s	T=3·10 ⁹ K		$p + n \Rightarrow d \quad d + p \Rightarrow t \quad t + p \Rightarrow {}^4\text{He}$
T = 2 - 3 s	T=10 ⁹ K	$m_{{}^4\text{He}}/m_p = 26/74$	Ez az arány ma is hasonló értékű
t = 35 perc	T=10 ⁸ K	Világegyetem 300-szoros méret	Atommagfolyamatok leállnak



Big Bang	Quark-gluon plazma	Proton neutron	Könnyű elemek	Atomok keletkezése	Csillagok keletkezése	Nehéz elemek	Mai állapot
	>10 ²⁷ K	10 ¹³ K	10 ⁹ K	4·10 ³ K,	4·10 ³ K,	3-50 K,	3 K,
	10 ⁻³² s	10 ⁻⁶ s	3 perc	4·10 ⁵ év	4·10 ⁵ év	3·10 ⁸ év	14·10 ⁹ év

Az Ősrobbanás és a Világegyetem fejlődésének története a mai standard kozmológiai modell alapján

- A modell a ma ismert négy alapvető kölcsönhatás teljes figyelembevételén alapszik

