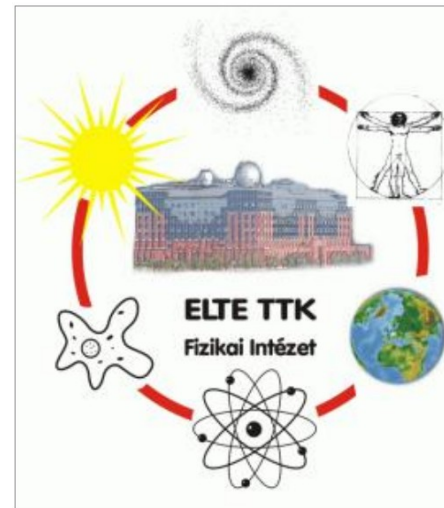


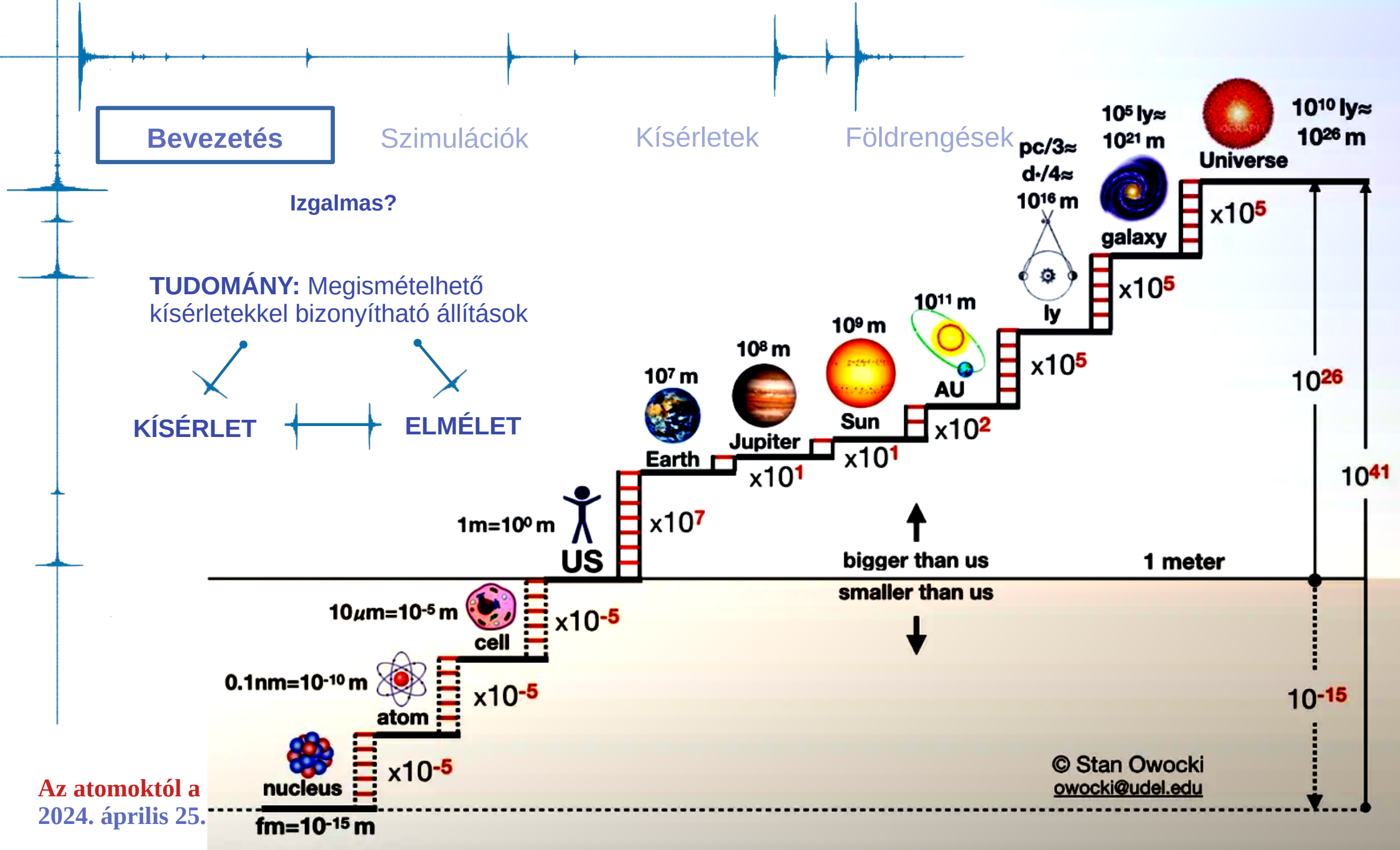
# Ugi Dávid

*Hogyan deformálódnak a szilárd anyagok, azaz miért érdemes a szemmel láthatatlan mértékű deformációt vizsgálni?*

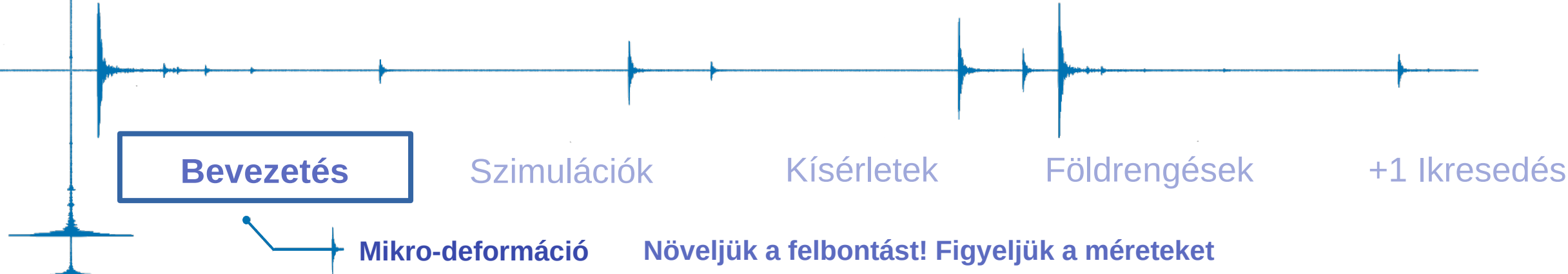


ELTE  
EÖTVÖS LORÁND  
UNIVERSITY





Az atomoktól a  
2024. április 25.



**Rugalmas deformáció:**  
 a test az erőhatás megszűnése után teljesen visszanyeri eredeti alakját

**Maradandó deformáció:**  
 az erőhatáskor létrejött alakváltozás (deformáció) az erőhatás megszűnése után sem múlik el

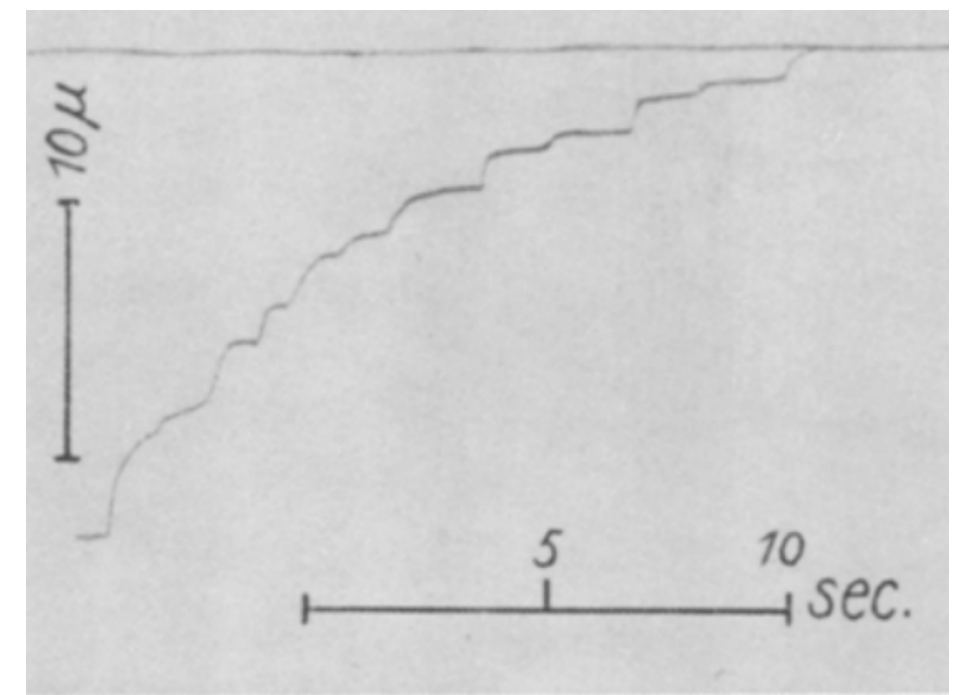
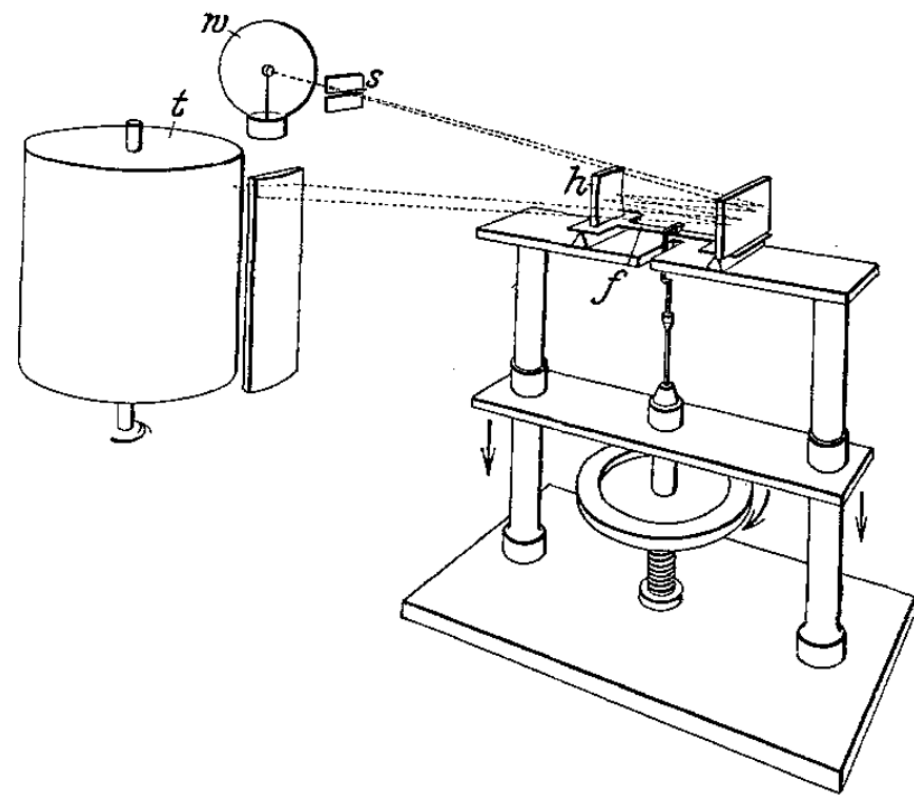
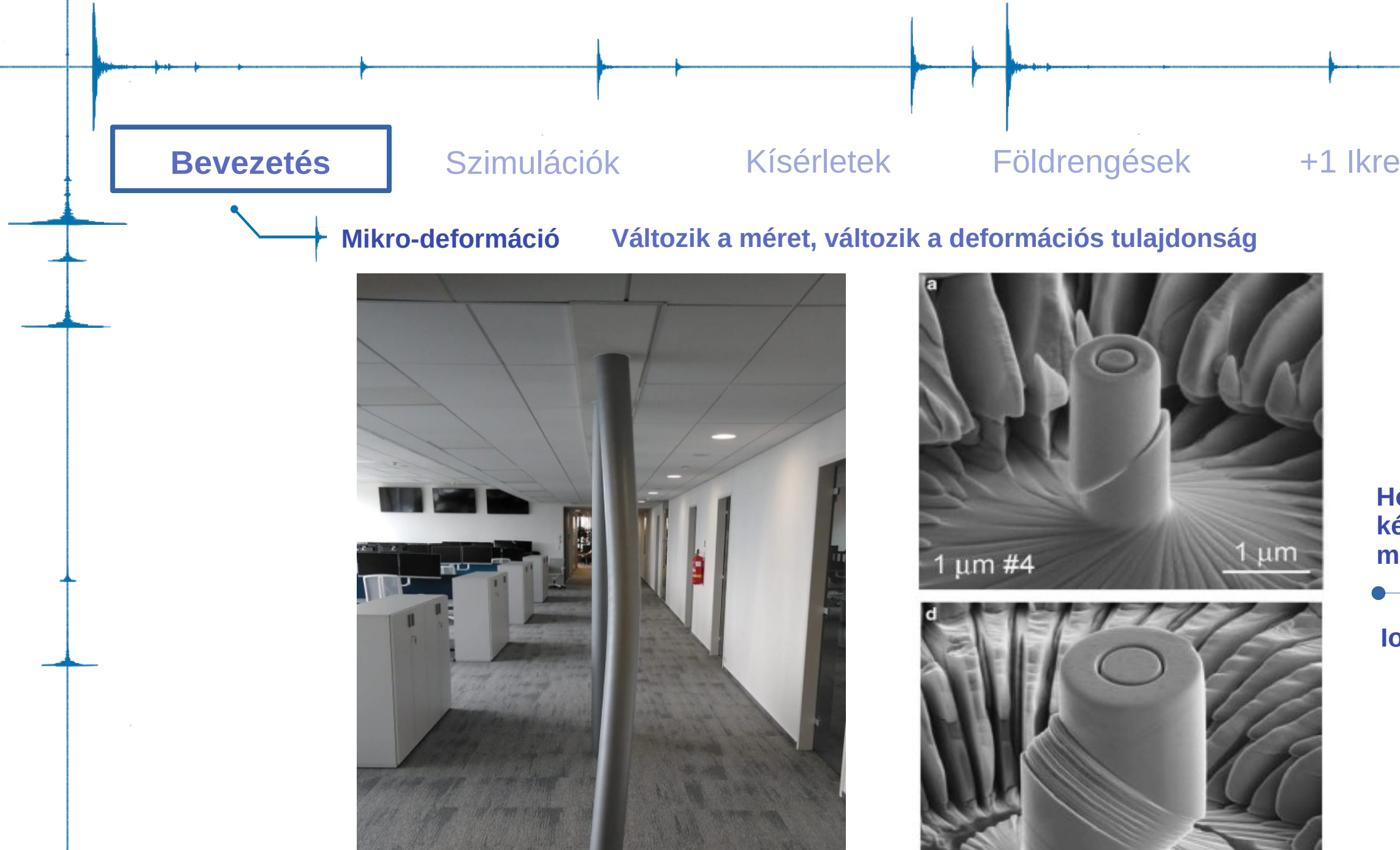


Fig. 1. Die Versuchsanordnung.



**Bevezetés**

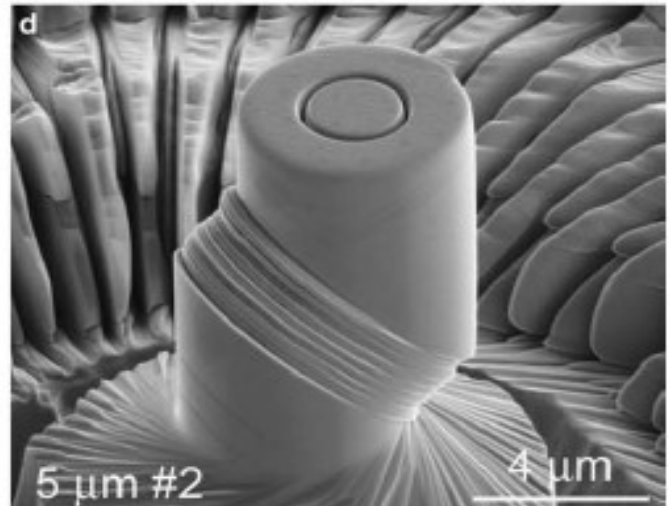
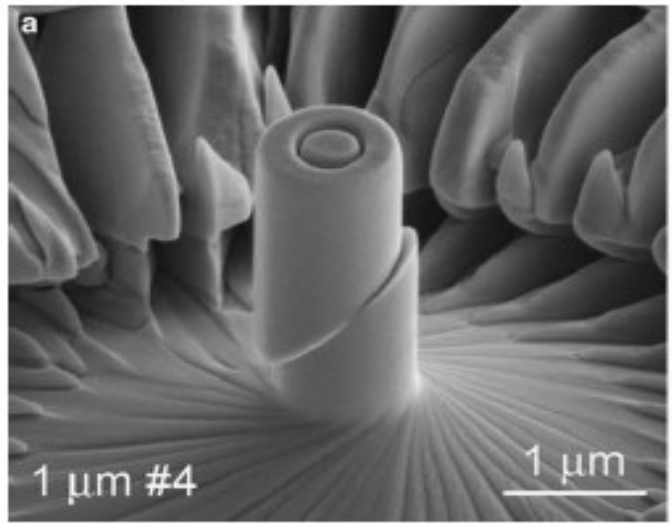
Szimulációk

Kísérletek

Földrengések

+1 Ikresedés

Mikro-deformáció Változik a méret, változik a deformációs tulajdonság



Hogyan készíthetünk mikrooszlopot?



Ionágyúval!



**Bevezetés**

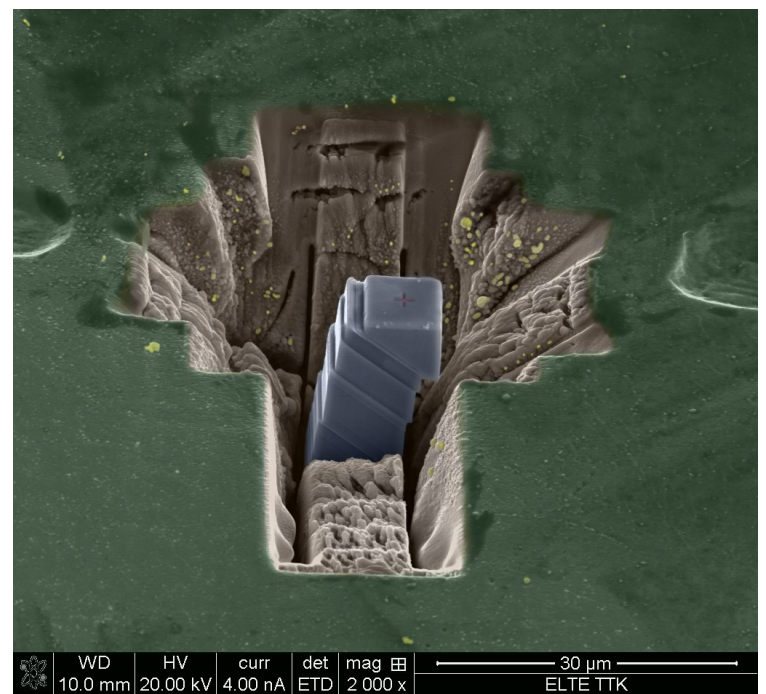
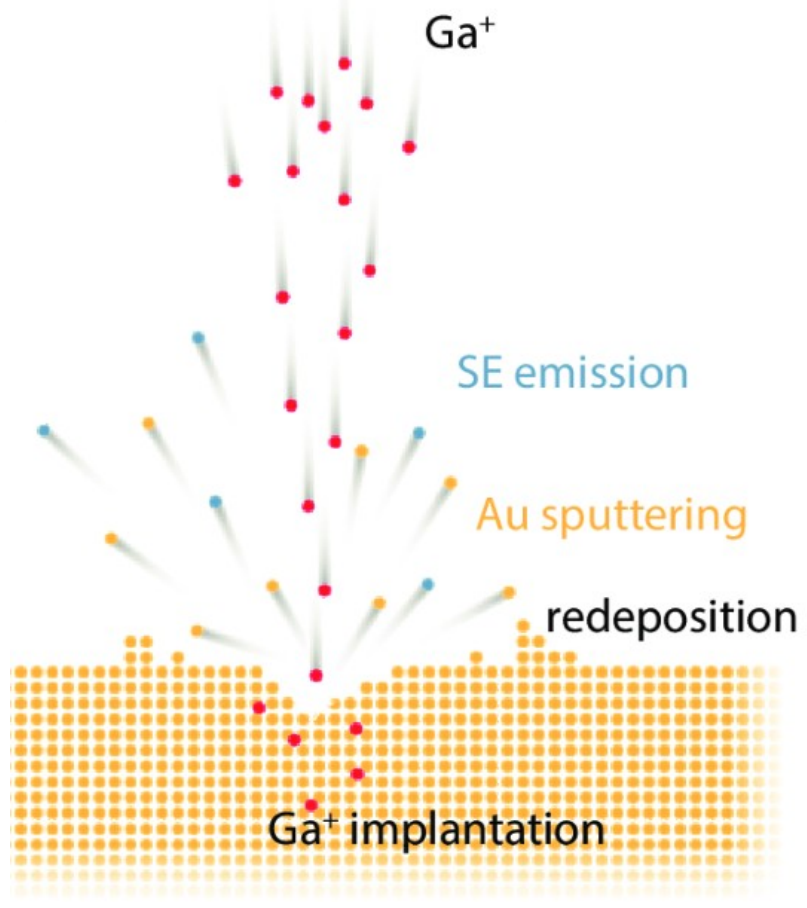
Szimulációk

Kísérletek

Földreng

Fókuszált ionsugár

Ionágyúk:



**Az atomoktól a csillagokig**  
2024. április 25.

**Bevezetés**

Szimulációk

Kísérletek

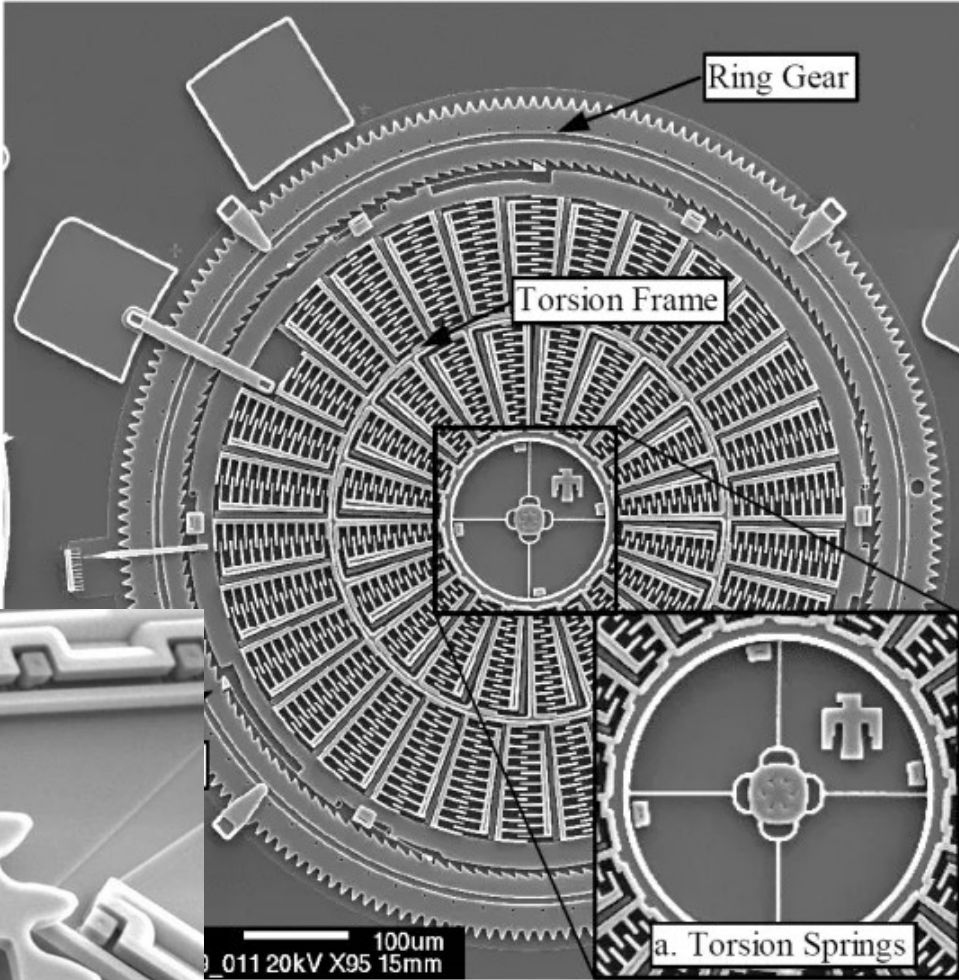
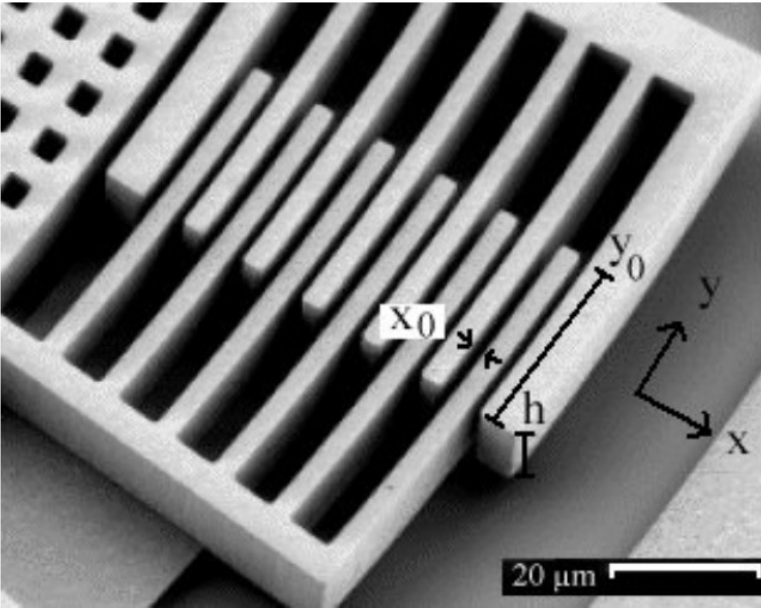
Földrengések

+1 Ikresedés

Fókuszált ionsugár

Mikro-elektromechanikai rendszerek

Gyorsulás, nyomás -érzékelők, giroszkópok





**Bevezetés**

Szimulációk

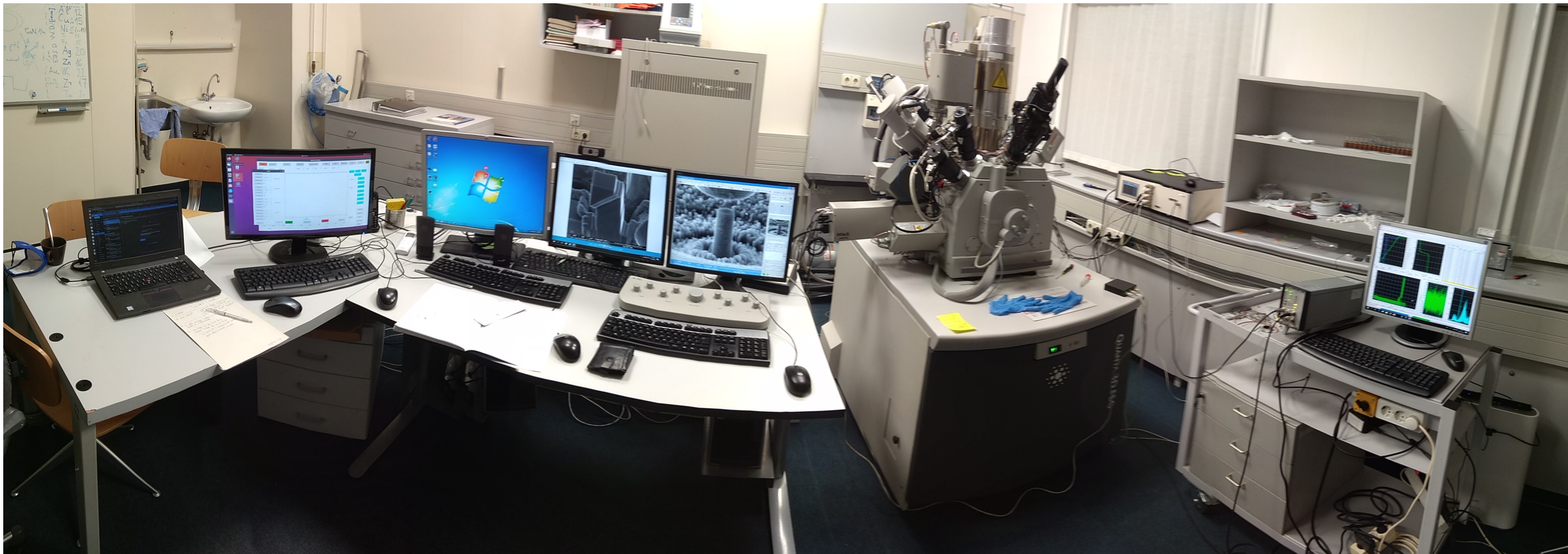
Kísérletek

Földrengések

+1 Ikresedés

Mikro-deformáció

Laboratóriumunk:





**Bevezetés**

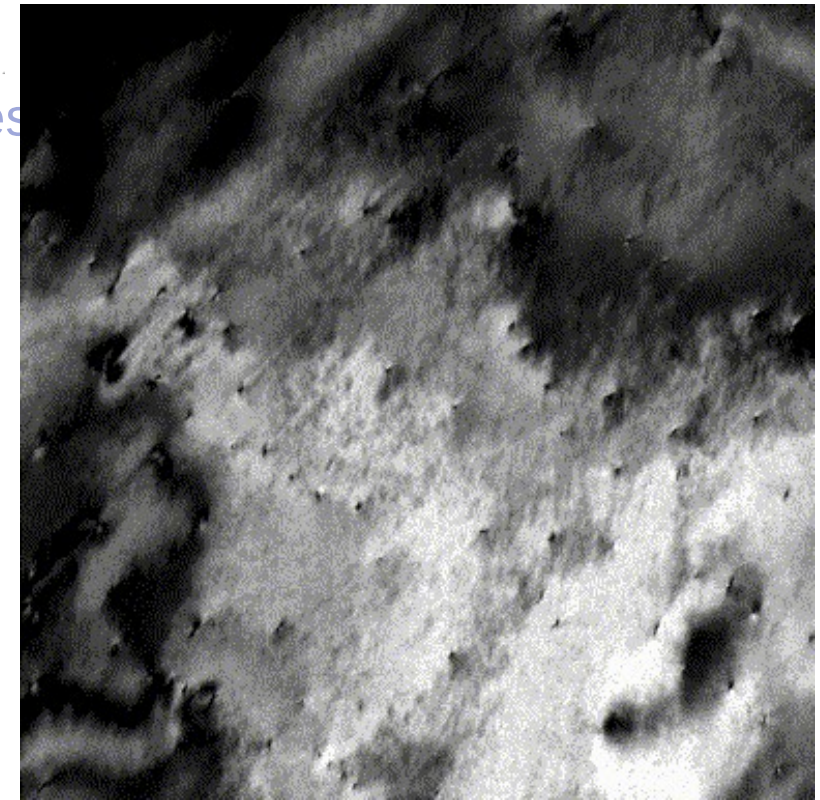
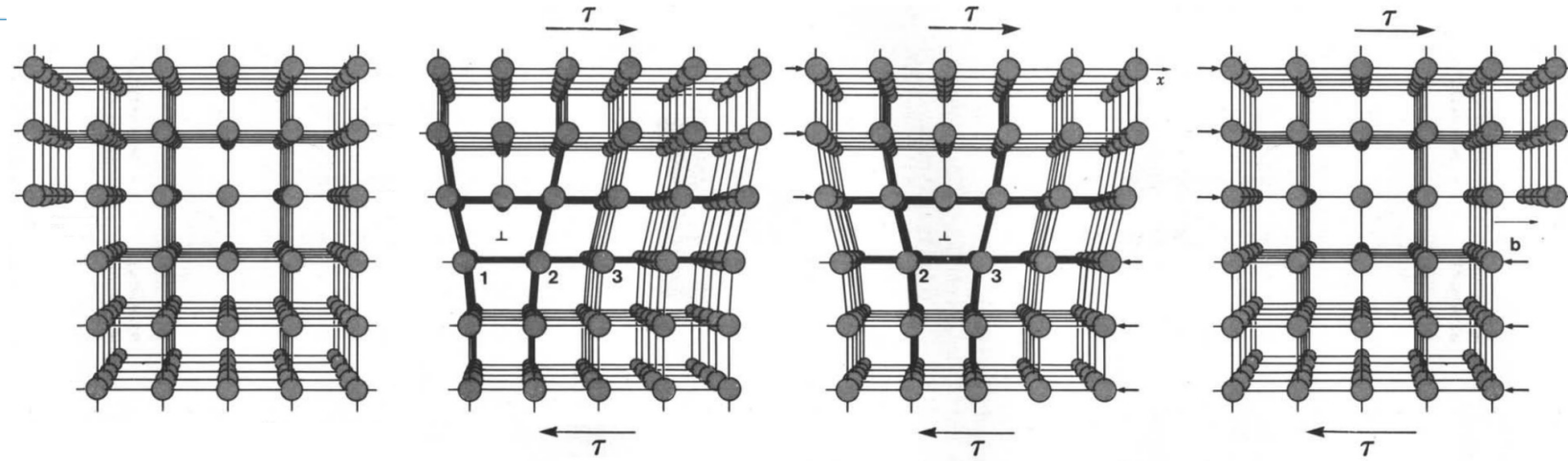
Szimulációk

Kísérletek

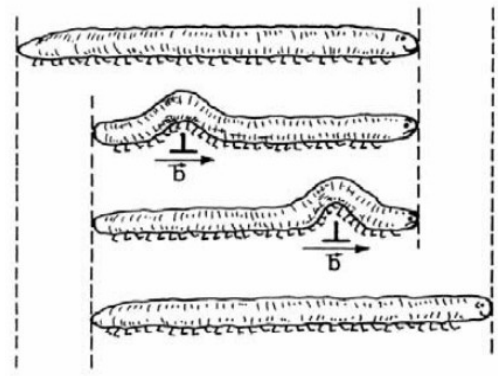
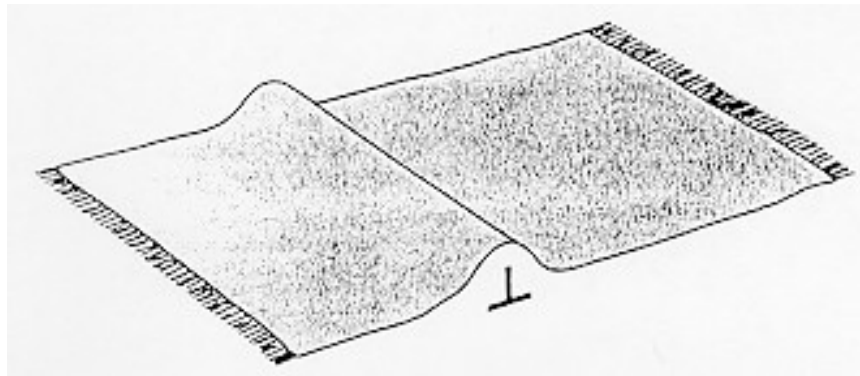
Földrengés

Diszlokációk

Hogyan deformálódnak a fémek?  
Kis zavar a periodicitásban



Valódi elektronmikroszkópi felvétel a diszlokációról mozgás közben





**Bevezetés**

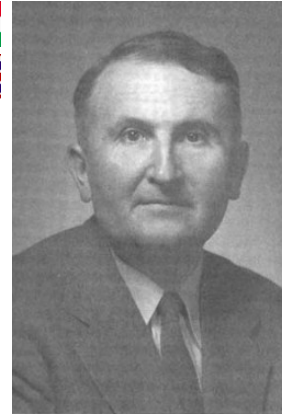
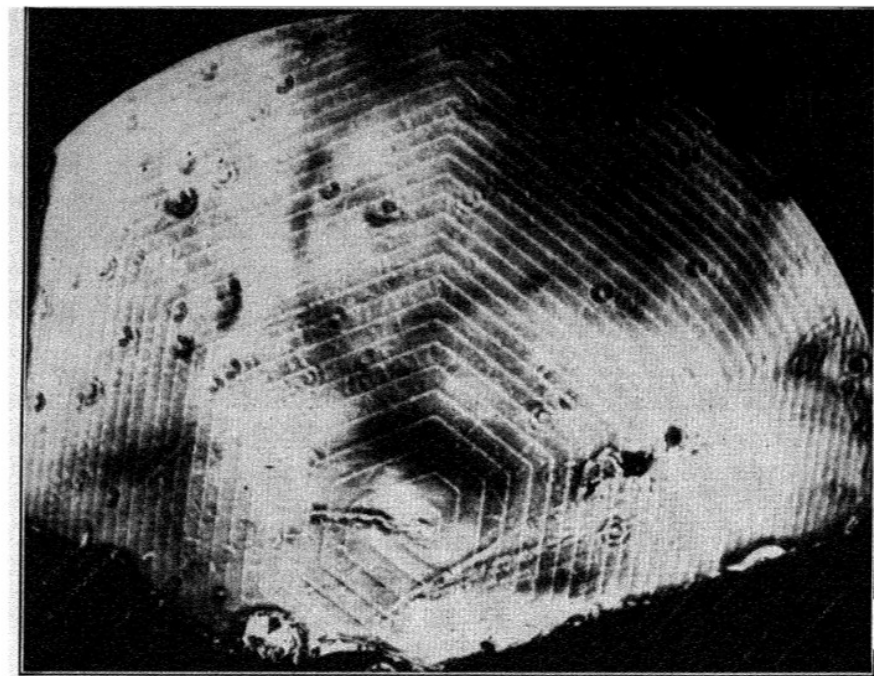
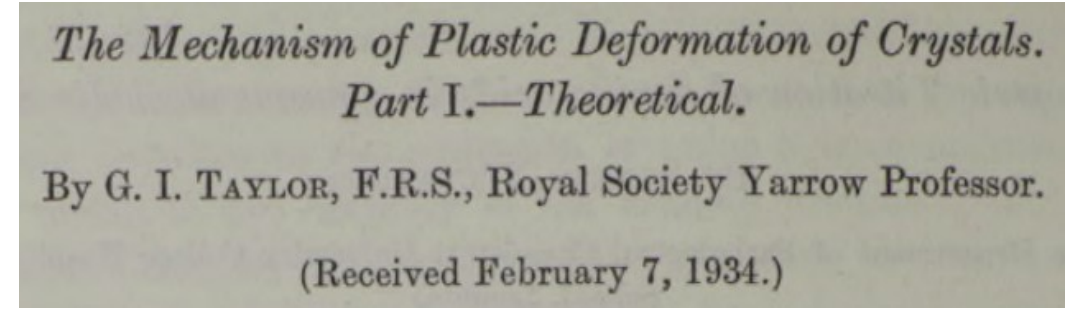
Szimulációk

Kísérletek

Földrengések

+1 Ikresedés

- Diszlokációk
- Elméletük 1934
- Megfigyelésük 1951  
Fáziskontraszt mikroszkópia



**Zur Kristallplastizität. III.**  
**Über den Mechanismus des Gleitvorganges.**  
 Von **E. Orowan** in Budapest.  
 Mit 9 Abbildungen. (Eingegangen am 5. April 1934.)



**Über eine Art Gitterstörung, die einen Kristall plastisch machen könnte<sup>1</sup>).**  
 Von **M. Polanyi** in Manchester, England.  
 Mit 1 Abbildung. (Eingegangen am 2. Mai 1934.)

FIG. 10.10 One of Verma's (1951) phase-contrast micrographs showing two interlocking growth spirals of hexagonal symmetry on carborundum. The step height is 15 Å, or one cell constant.



Bevezetés

**Szimulációk**

Kísérletek

Földrengések

+1 Ikresedés

Atomok nyomonkövetése

Molekuladinamikai **MD** szimuláció: Az atomok *egyenkénti* nyomon követése, a rájuk ható erők alapján → *energiaminimum*  
"Végtelen" számítási kapacitás igény

To obtain the force acting on each particle we consider an interaction potential energy,  $\Phi$ , for  $N$  particles in the following form.

$$\Phi = \sum_i^N \Phi(r_i) + \sum_i^N \sum_{j>i}^N \Phi(r_{ij}) + \sum_i^N \sum_{j>i}^N \sum_{k>j>i}^N \Phi(r_{ijk}) \quad (2)$$

in which  $r_{ij}$  is the distance between particles  $i$  and  $j$ , and  $r_{ijk}$  is the between between particles  $i$ ,  $j$ , and  $k$ . The first

$$\Phi(r_{ij}) = \alpha(r_{ij} + \beta)^3 + \gamma r_{ij} + \varepsilon$$

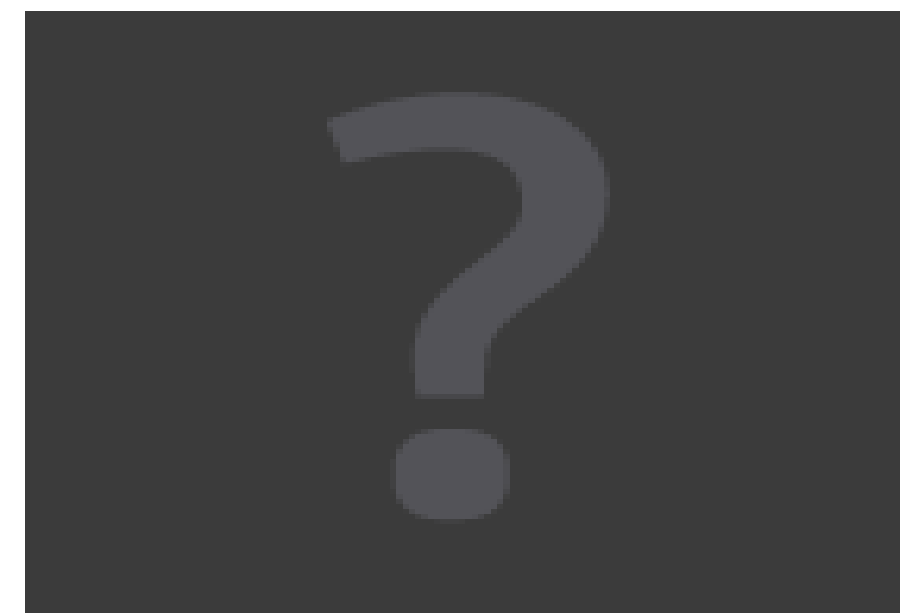
$$\mathbf{F}_i = - \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{d\Phi}{dr} \Big|_{r=r_{ij}} \left( \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}} \right)$$

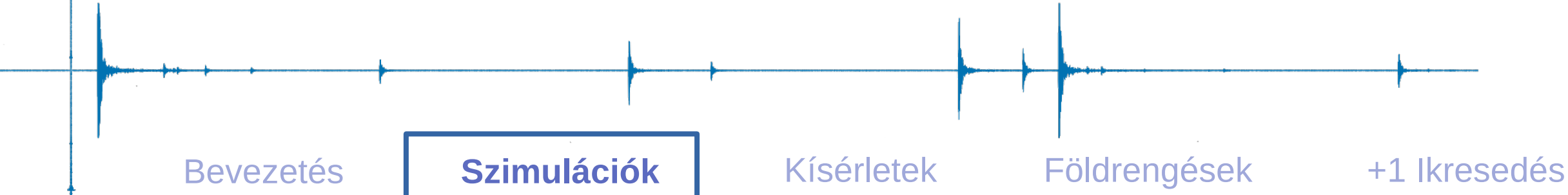




Molekuladinamikai **MD** szimuláció: Az atomok *egyenkénti* nyomon követése, a rájuk ható erők alapján → *energiaminimum*  
*"Végtelen"* számítási kapacitás igény

- Atomok nyomkövetése  
2 Dimenzió
- Diszlokációk UO<sub>2</sub>  
kristályban





Atomok nyomkövetése

Molekuladinamikai **MD** szimuláció: Az atomok *egyenkénti* nyomon követése, a rájuk ható erők alapján → *energiaminimum*  
*"Végtelen"* számítási kapacitás igény

- Atomok nyomkövetése  
3 Dimenzió
- Fe nanooszlop (6x16 nm)  
szimulált összenyomása

A szimulált mérettartomány  
immáron megegyezik a  
kísérletek mérettartományával!







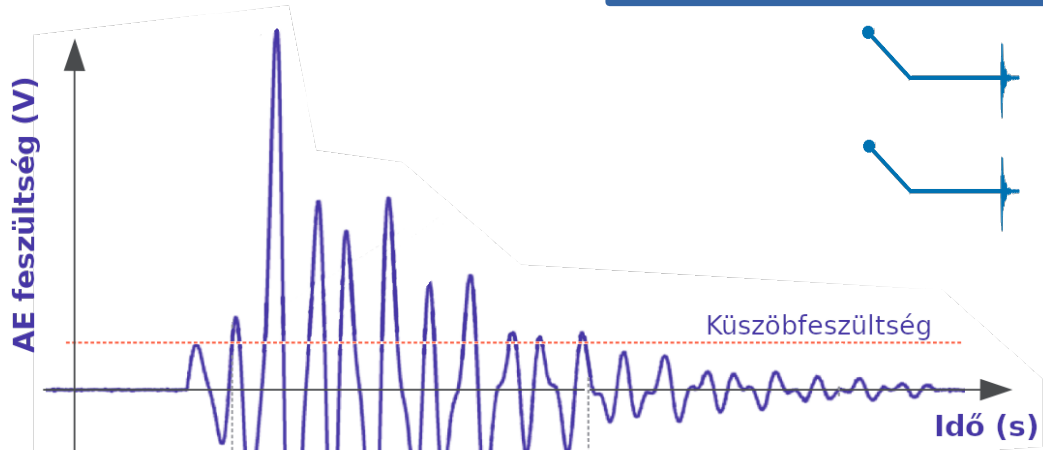
Bevezetés

Szimulációk

**Kísérletek**

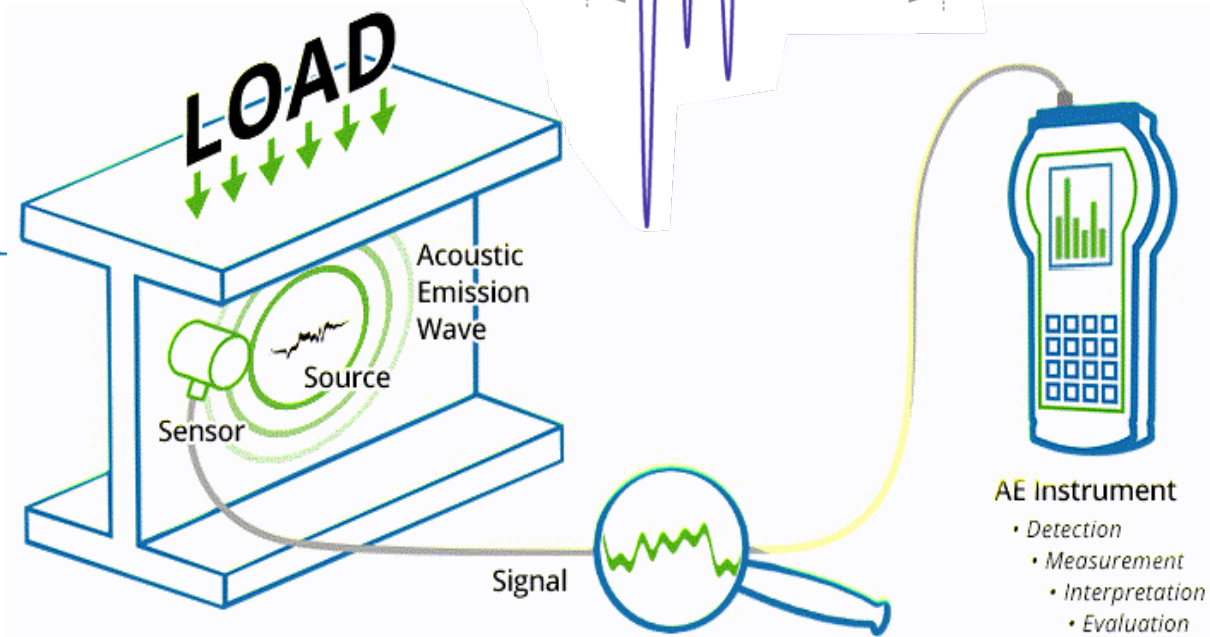
Földrengések

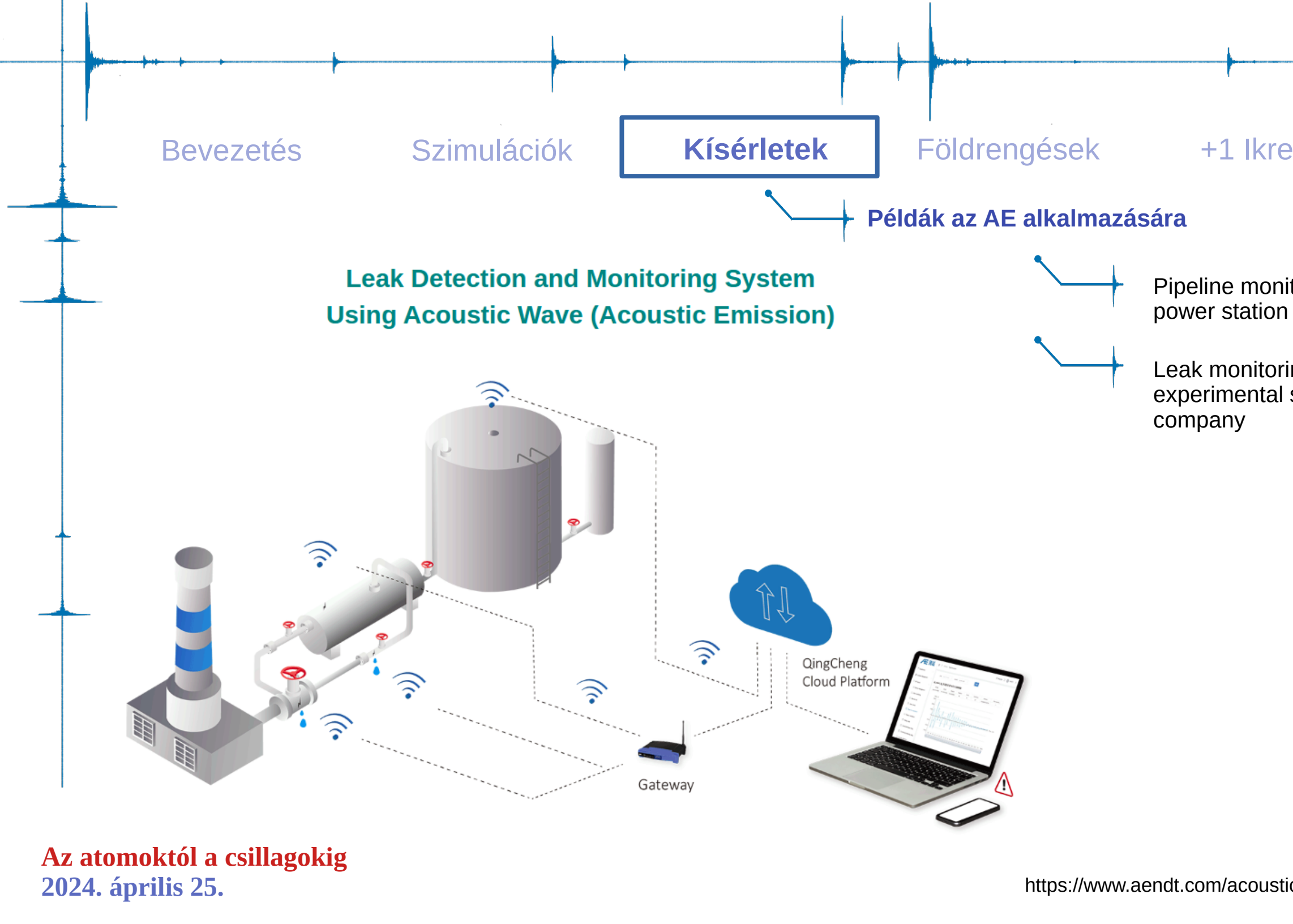
+1 Ikresedés



**Akusztikus Emisszió (AE)**

Az anyagban terjedő rugalmas energiahullám piezoelektromos detektorral a minta felületén detektálható





Bevezetés

Szimulációk

**Kísérletek**

Földrengések

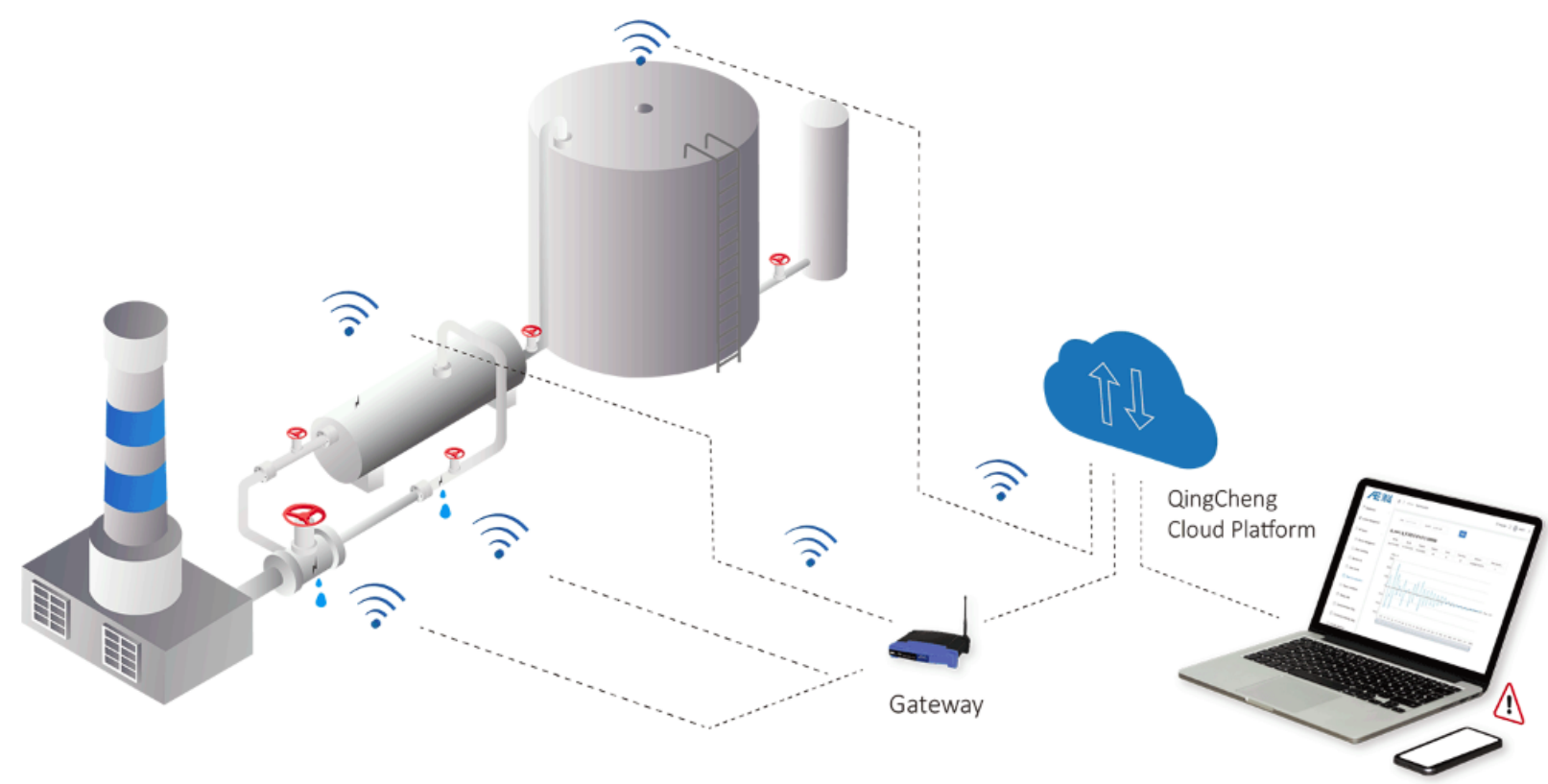
+1 Ikresedés

Példák az AE alkalmazására

**Leak Detection and Monitoring System Using Acoustic Wave (Acoustic Emission)**

Pipeline monitoring of CETIM power station in France

Leak monitoring of pipeline experimental station in APC company





Bevezetés

Szimulációk

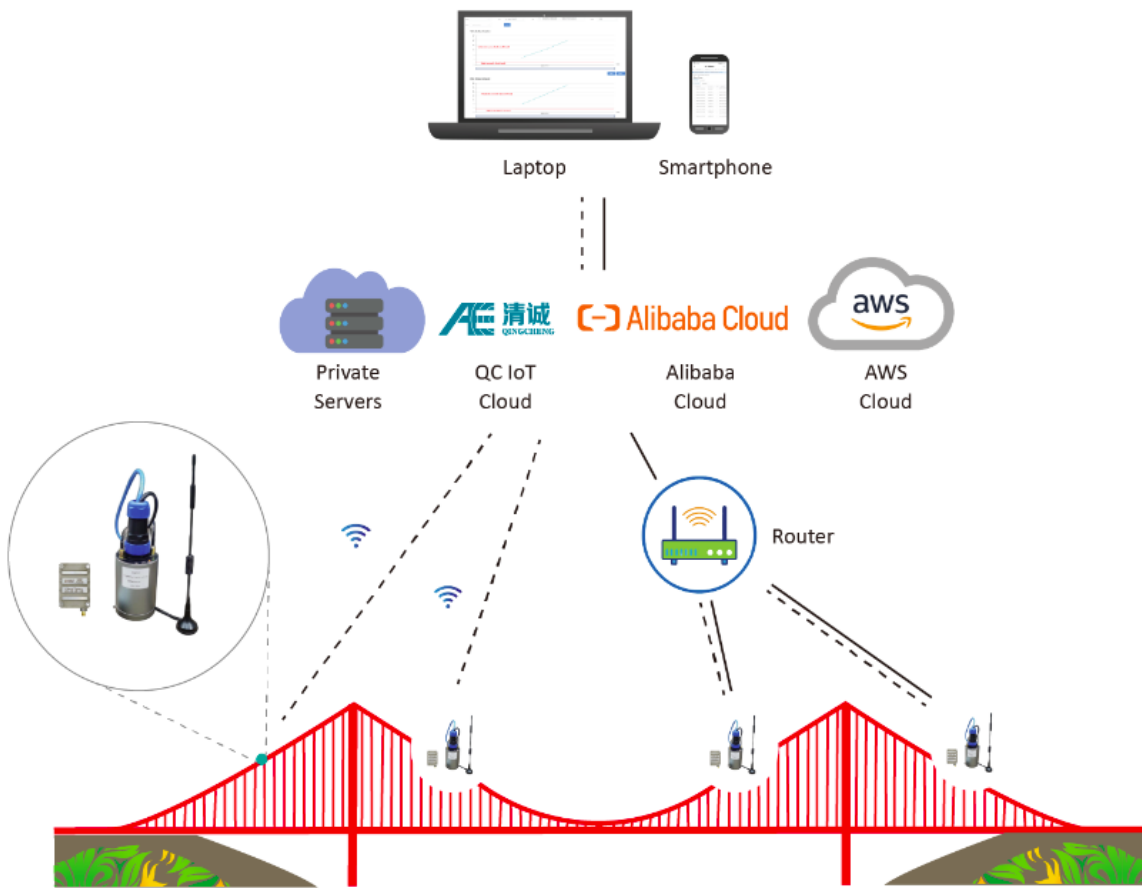
**Kísérletek**

Földrengések

+1 Ikresedés

Példák az AE alkalmazására

**Acoustic Wave (Acoustic Emission)  
BRIDGE CABLE WIRE BREAKS MONITORING SYSTEM**



Taiping Lake Bridge



Maanshan Bridge



Ningjing Si Bridge



Bevezetés

Szimulációk

**Kísérletek**

Földrengések

+1 Ikresedés

Kutatócsoportunk eredménye



ARTICLE

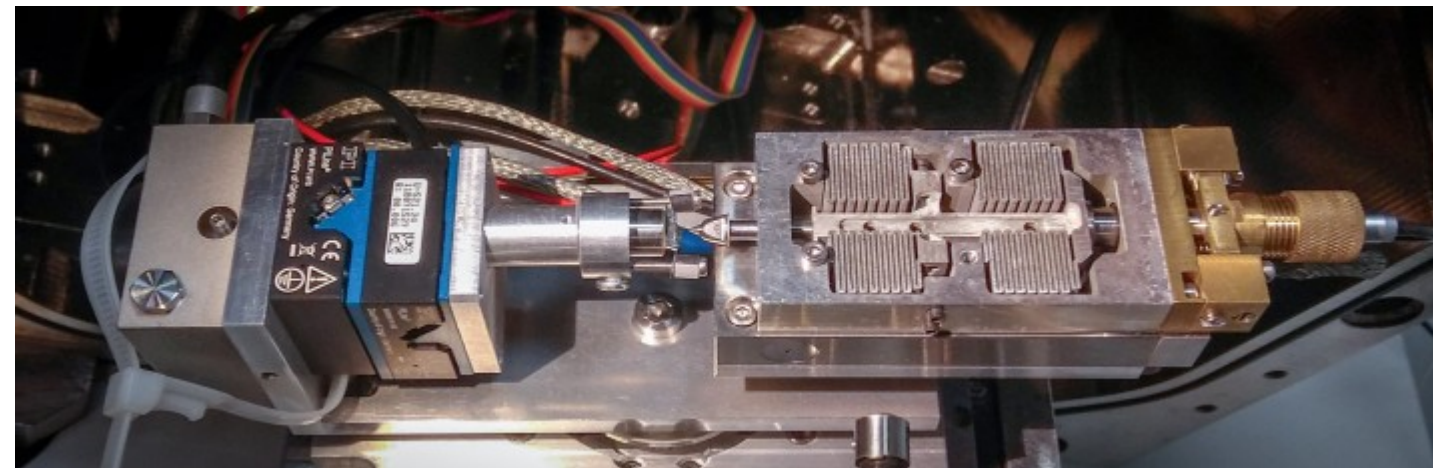
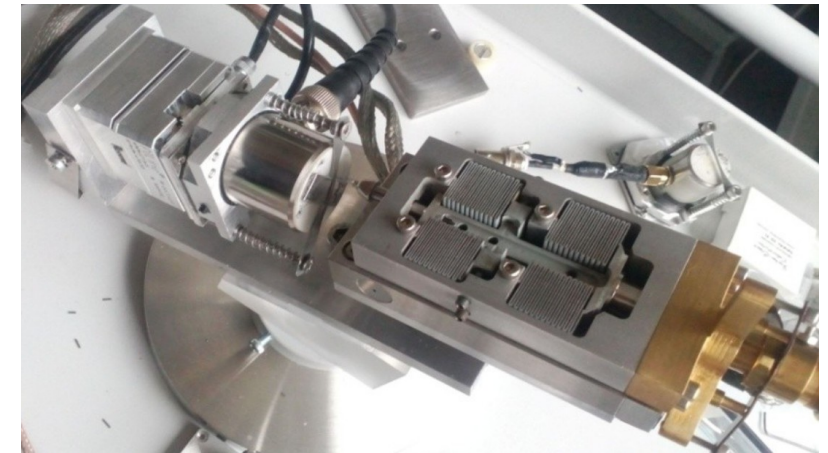


<https://doi.org/10.1038/s41467-022-29044-7>

OPEN

## Dislocation avalanches are like earthquakes on the micron scale

Péter Dusán Ispánovity<sup>1</sup>, Dávid Ugi<sup>1</sup>, Gábor Péterffy<sup>1</sup>, Michal Knapek<sup>2</sup>, Szilvia Kalácska<sup>1,3</sup>,  
Dániel Tüzes<sup>1</sup>, Zoltán Dankházi<sup>1</sup>, Kristián Máthis<sup>2</sup>, František Chmelík<sup>2</sup> & István Groma<sup>1</sup>





Bevezetés

**Szimulációk**

Kísérletek

Földrengések

+1 Ikresedés

Diszlokációk nyomon követése (DDD)

MD

→ **Sűrűbben** elhelyezkedő atomok, **rövidtávú** kölcsönhatások

DDD

→ **Ritkábban** elhelyezkedő diszlokációk, **hosszútávú** kölcsönhatások

A diszlokációk közti kölcsönhatás számolható → Jó a számolás? → Mit mond a szimuláció? → Egyezik a kísérlettel?

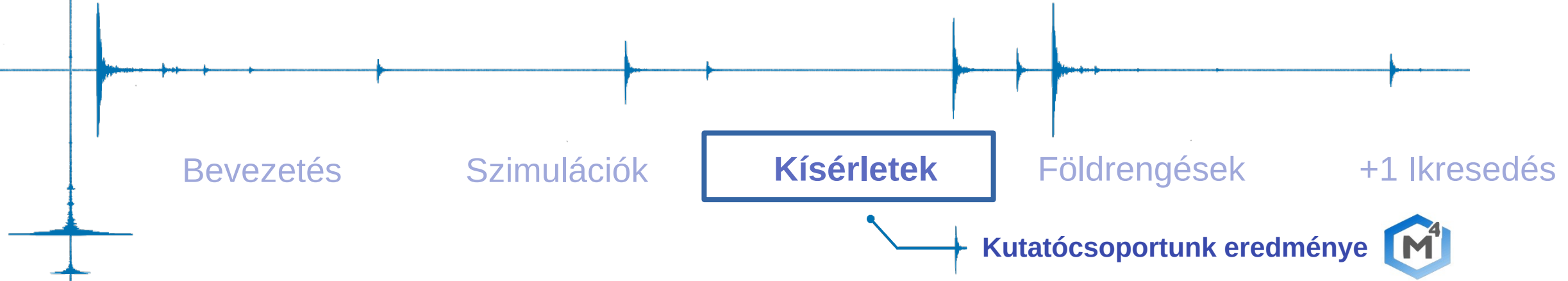
$$\sigma_{xy}(\vec{r}) = \frac{\mu b}{2\pi(1-\nu)} \frac{x(x^2 - y^2)}{r^4} = \frac{\mu b}{2\pi(1-\nu)} \frac{\cos \varphi \cos(2\varphi)}{r}$$

Ne kövessük egyenként az atomokat!  
Kövessük egyenként a diszlokációkat!



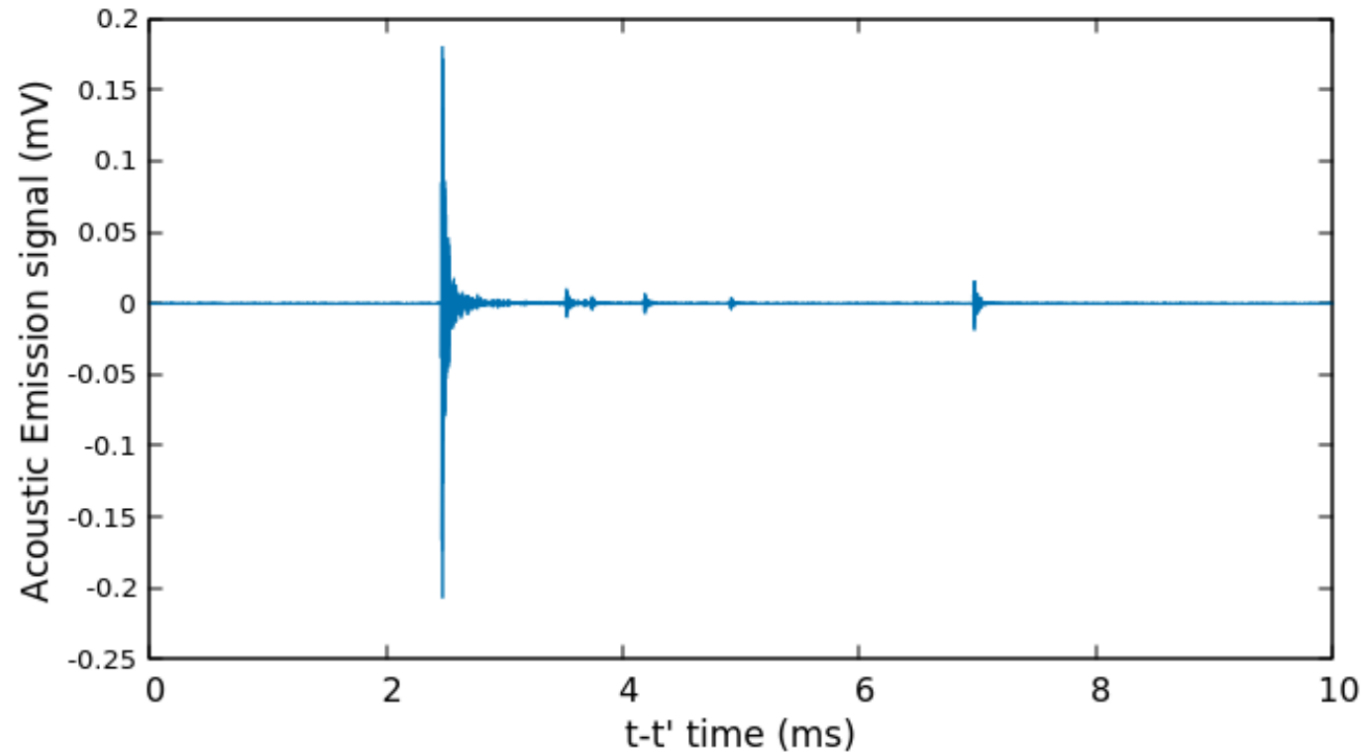




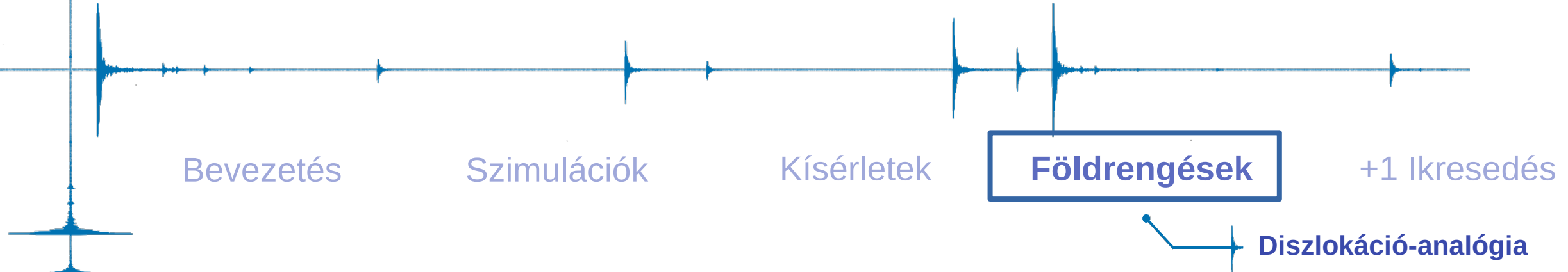


Deformációs „egység” felismerése → hirtelen **feszültségesés** → **200 Hz** mintavételezés → 5 ms / adat  
 Deformációs „egység” felismerése → **AE** → **10 MHz** mintavételezés → 0,1  $\mu$ s / adat

*Az AE mérésével tovább  
 finomítható a deformáció  
 időbeli részletessége*



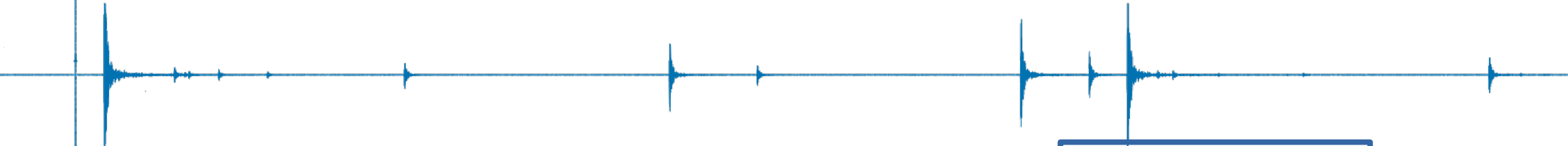




Hogyan alakulnak ki a földrengések?

Tektonikus lemezek morgásuk során egymással(-son) „súrlódnak”. A tárolt mechanikai rugalmas feszültség felszabadulása → FÖLSRENGÉS





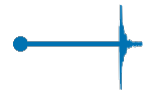
Bevezetés

Szimulációk

Kísérletek

**Földrengések**

+1 Ikresedés



Számos fizikai törvényszerűség egyezik meg a földrengésekkel és a diszlokációkkal kapcsolatban!



Diszlokáció-analógia



A diszlokációkat és a földrengéseket jellemző méretskálák extrém mértékben különbözben!

**Omori törvény:**

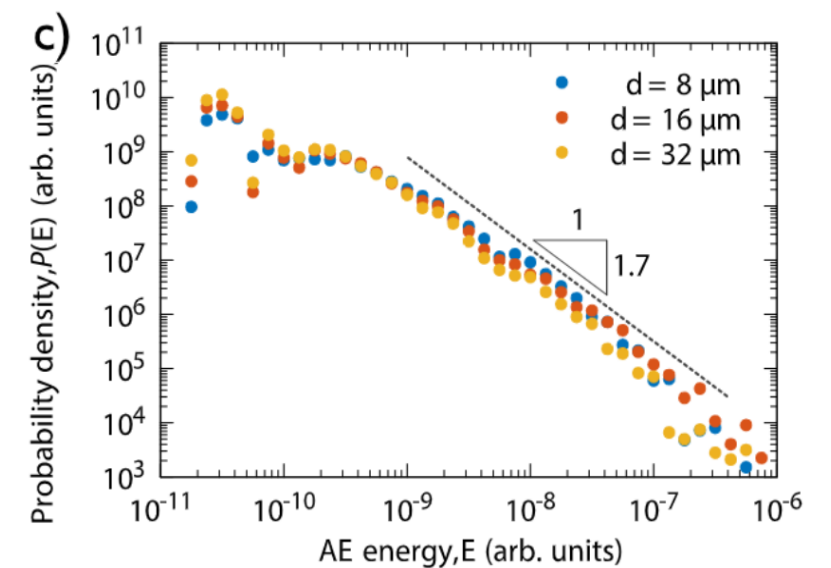
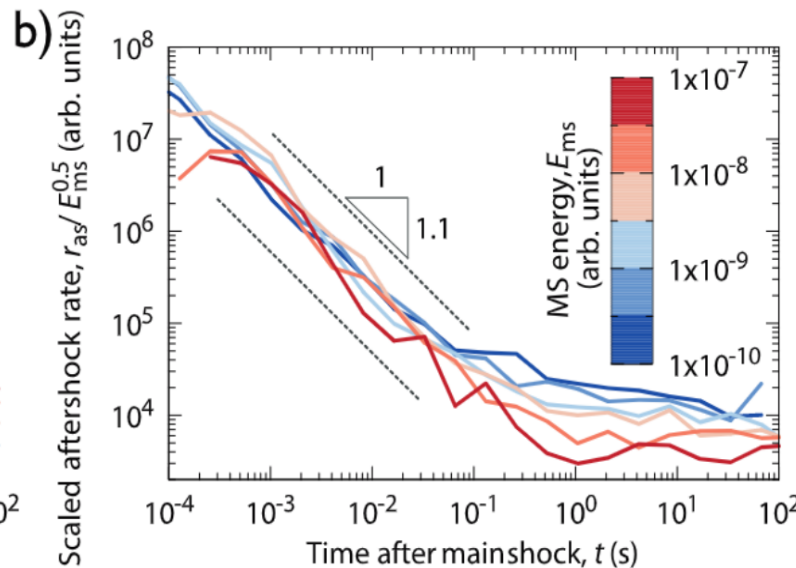
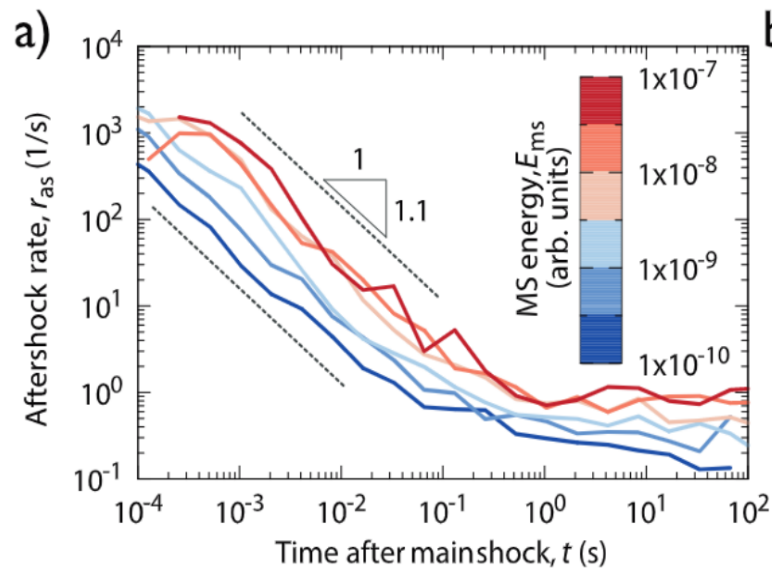
$$r_{as}(t) \propto t^{-p} \text{ with } p \approx 1$$

**Termelékenységi törvény:**

$$r_{as} \propto E_{ms}^{2\alpha/3} \text{ with } \alpha \approx 0.8$$

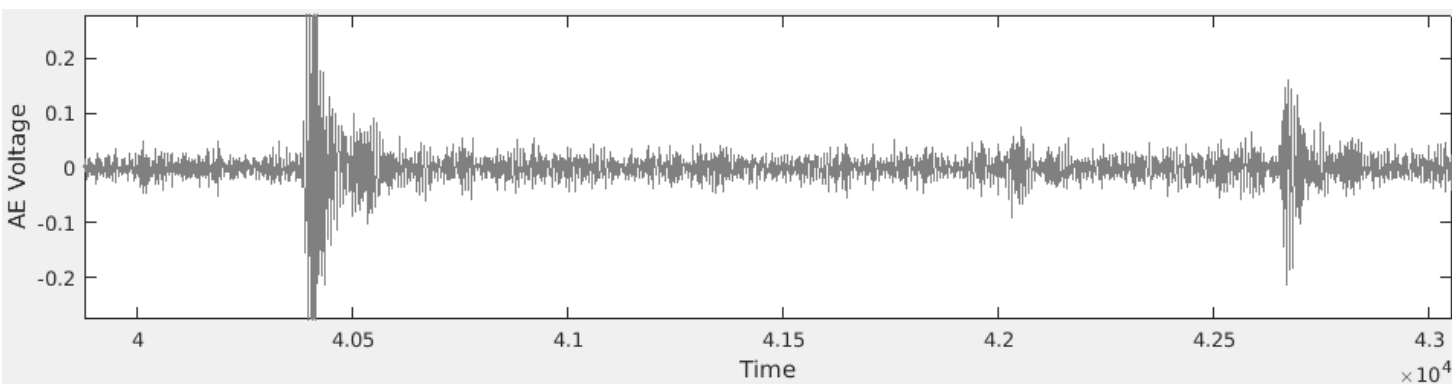
**Gutenberg-Richter törvény:**

$$P(E) \propto E^{-w} \text{ with } w \approx 5/3$$

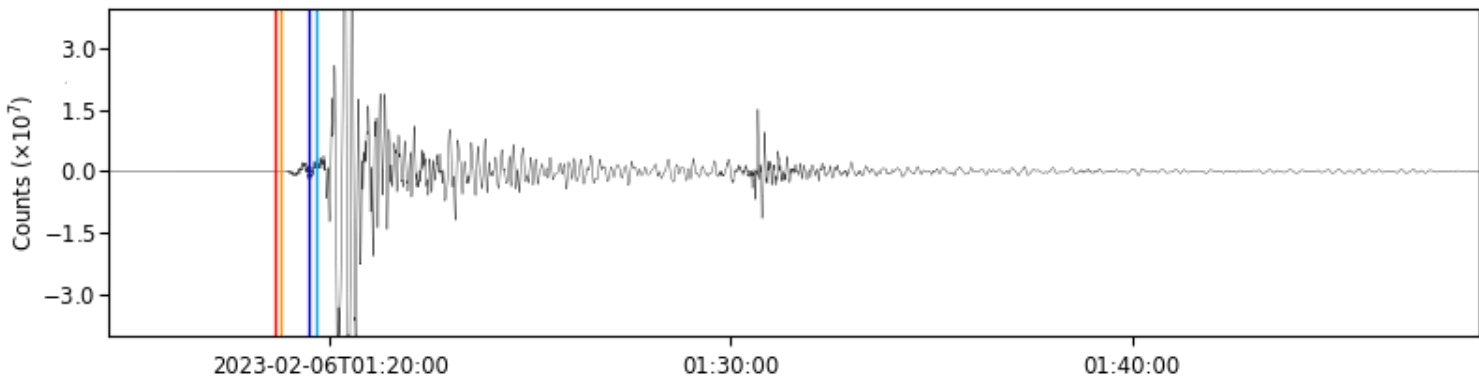




Zn egykristály diszlokációlavinától ~cm-re lévő AE detektor



Az epicentrumtól ~500 km-re (4°) fekvő Ankara-i mérőállomás



Property	Earthquakes	Dislocation avalanches
Mechanism	Slip / crack	Dislocation movement
Expanse	in plane	in plane
Typical amplitude	m	nm
Typical reach	km	µm
Typical duration	minute – month	ms – s
Typical frequency	Hz	MHz
Size distribution	Gutenberg-Richter	Gutenberg-Richter
Aftershocks	Omori- and productivity law	Omori- and productivity law



Bevezetés

Szimulációk

Kísérletek

Földrengések

+1 Ikresedés

Fémek deformációjának további változatai

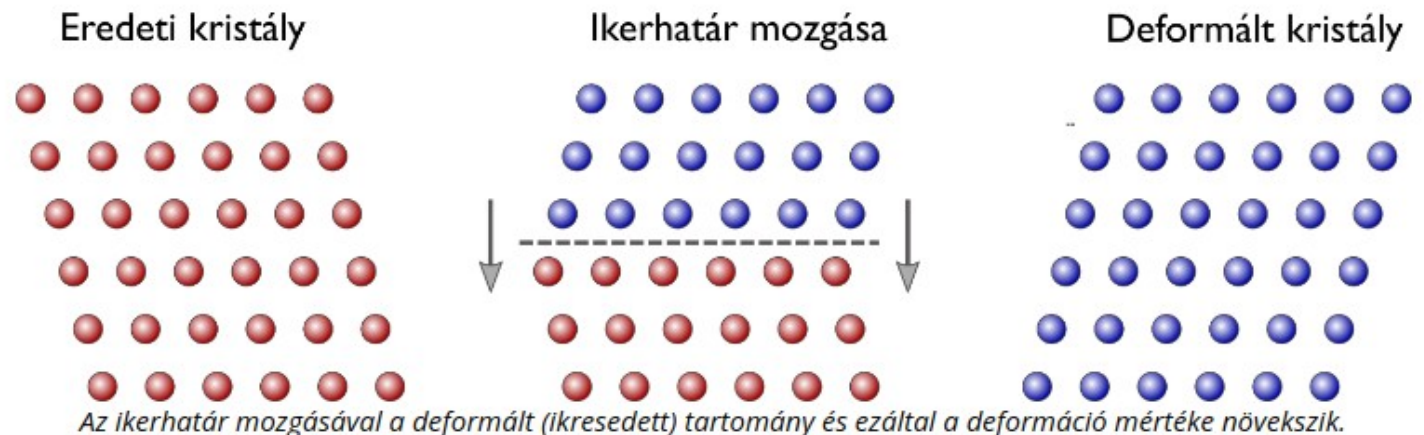
## A MAGNÉZIUM AZ ANYAGTUDOMÁNY ÚJ SZTÁRJA

2021.05.28.

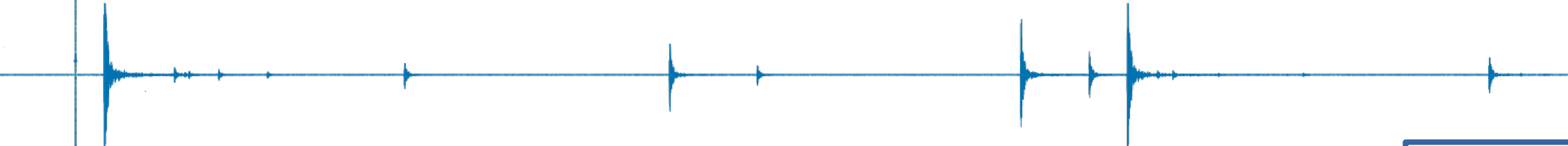


Az anyagtudományban új távlatokat nyitó eredmények szerint a magnéziumot a jövőben szerkezeti anyagként is felhasználhatják. Az ELTE kutatói feltárták a magnéziumban lejátszódó ún. ikresedési deformációs folyamatok mikroszkopikus részleteit. Eredményeiket címlapon közölte a rangos **Materials & Design** folyóirat.

A magnézium az alumíniumnál is kevésbé sűrű fém, ezért sok üzemanyagot takaríthatnánk meg, ha szerkezeti anyagként felhasználhatnánk például a repülőgépgyártásban. Különleges kristályszerkezete miatt azonban ez a fém az alumíniumnál jóval kevésbé alakítható. A magnéziumban a maradandó deformáció (vagyis az alakváltozás) gyakran ún. ikresedési folyamattal megy végbe, melynek során a deformációt egy ikerhatár mozgása idézi elő. Az ikerhatár két egymáshoz képest tükrözött kristályrácst választ el, innen ered a mechanizmus megnevezése.







Bevezetés

Szimulációk

Kísérletek

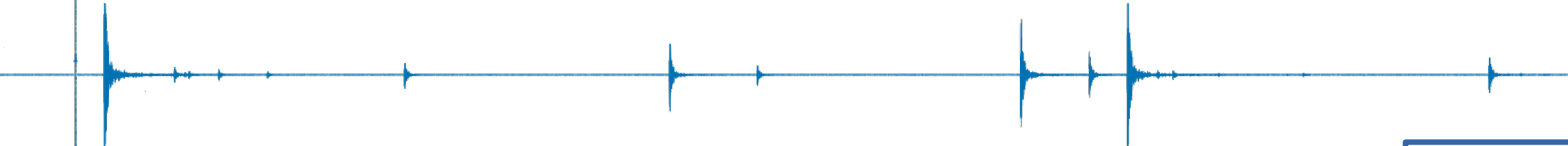
Földrengések

+1 Ikresedés

Ikresedés a  
transzmissziós  
elektronmikroszkóp  
alatt







Bevezetés

Szimulációk

Kísérletek

Földrengések

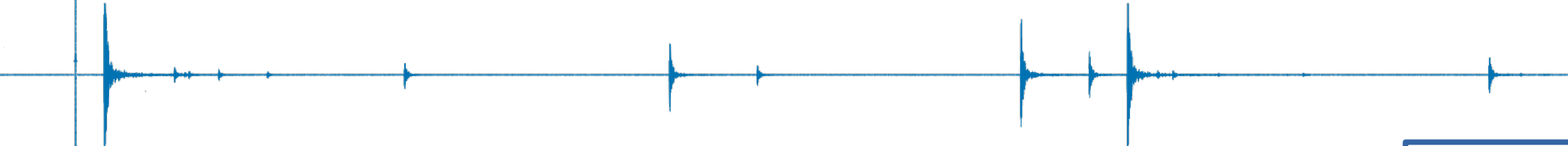
+1 Ikresedés



Alakemlékezés



**Az atomoktól a csillagokig**  
2024. április 25.



Bevezetés

Szimulációk

Kísérletek

Földrengések

**+1 Ikresedés**

● Ferromágneses Alakemlékezés





**Az atomoktól a csillagokig**  
2024. április 25.



## Köszönetnyilvánítás

### Szakmai együttműködés:



**ELTE**  
EÖTVÖS LORÁND  
UNIVERSITY



**Ispánovity Péter D.** Kranauer Tamás  
Anwar Q. Ahmed Lendvai János  
Berta Dénes Lipcsei Sándor  
**Dankházi Zoltán** Lukács Kolos  
Garima Kapoor Maksa Zsolt  
Groma István **Németh Anikó**  
Gubicza Jenő Nguyen Q.Chinh  
Heczeli Anita Péterffy Gábor  
Jenei Péter Sinkó Katalin  
**Kalácska Szilvia** **Szabó Ábel**  
Kádár Csilla Szabó I. Péter  
K. Papp László Talaye Arjmandabasi  
Kovács Zsolt Tüzes Dániel  
Kósa Eszter **Varga Gábor**



**ELKH**  
Eötvös Loránd  
Kutatási Hálózat



Fogarassy Zsolt  
Katalin L.-Goda  
Kun Róbert  
Lábár L. János  
Misják Fanni  
Radnóczy György  
Szilágyi Edit  
Wisssem Methani



**Faculty of Science**  
CHARLES UNIVERSITY

František Chmelík  
Kristián Máthis  
Michal Knapek  
Petr Harcuba



Maloveczky Anna  
Musza Alexandra  
**Vida Ádám**  
Windisch Márk



Katrin Schulz  
Kolja Zoller



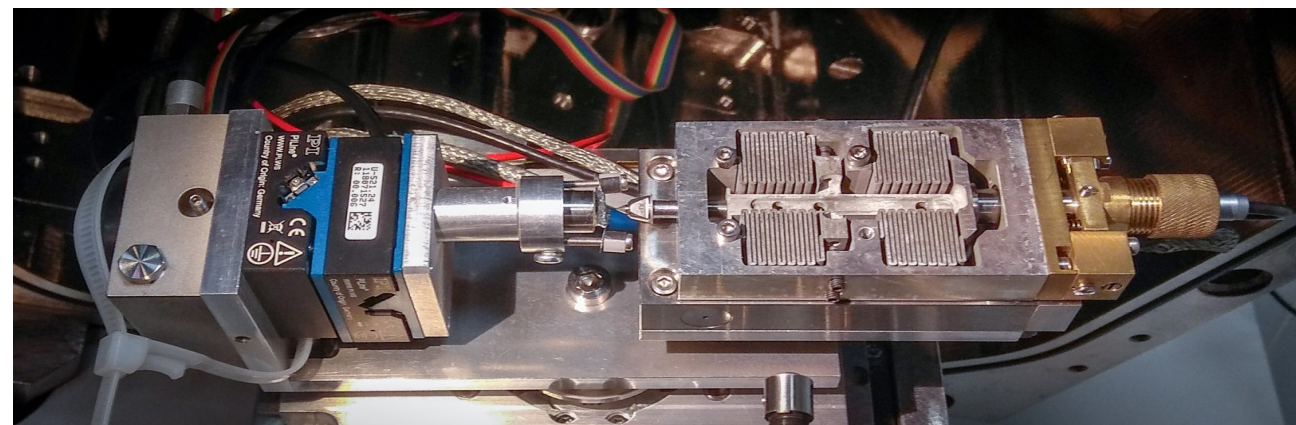
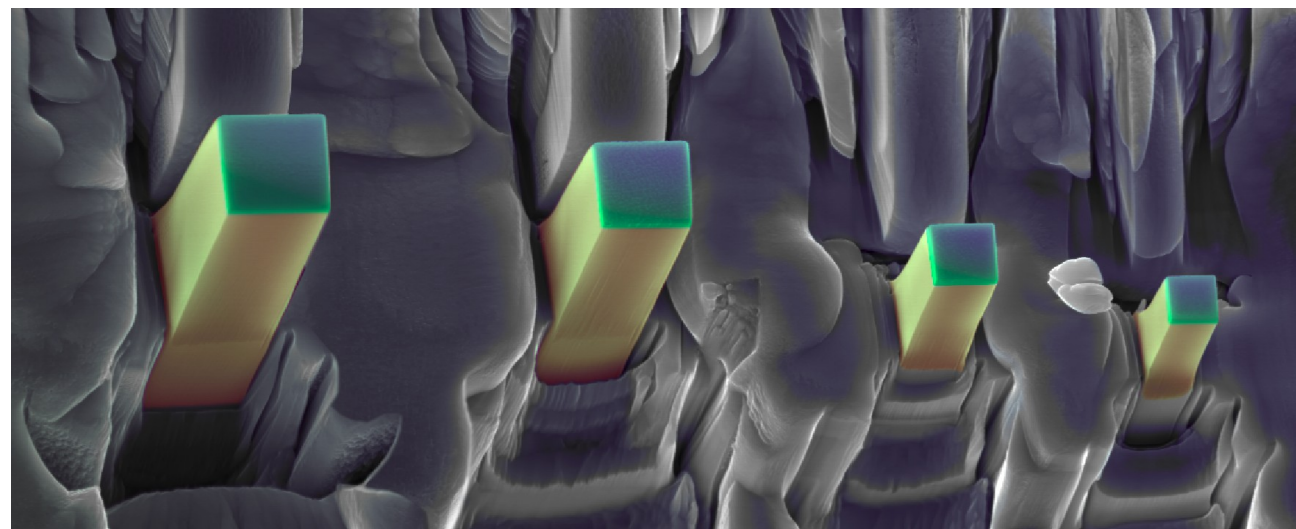
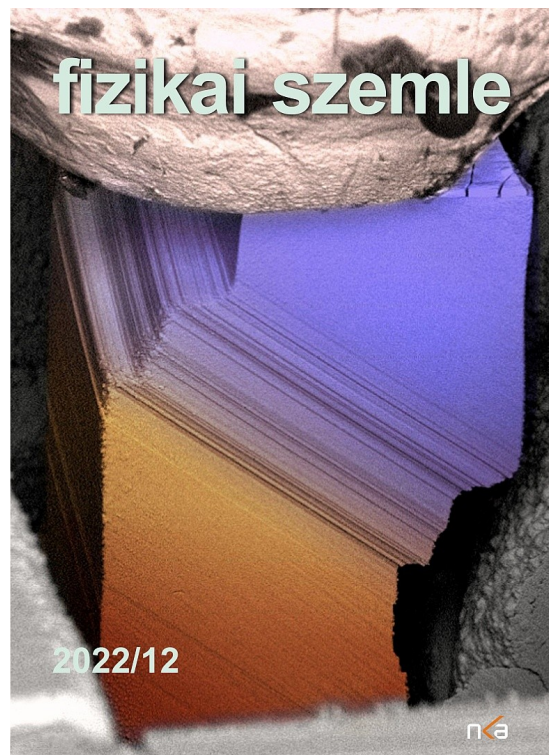
Doron Shilo  
Eilon Faran



Georges Kapelski  
Marc Fivel



Köszönöm a megtisztelő  
figyelmet!



Az atomoktól a csillagokig  
2024. április 25.