

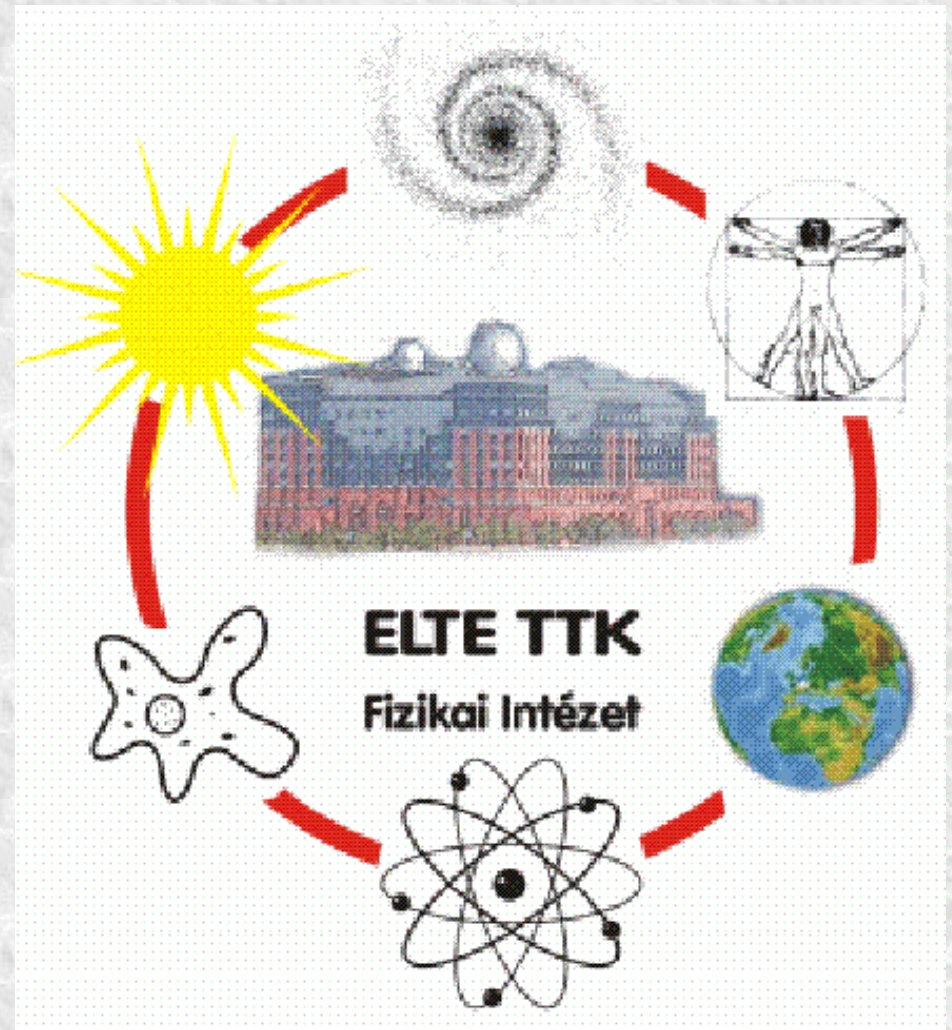
Erő a vákuumból: a Casimir effektus

Takács Gábor

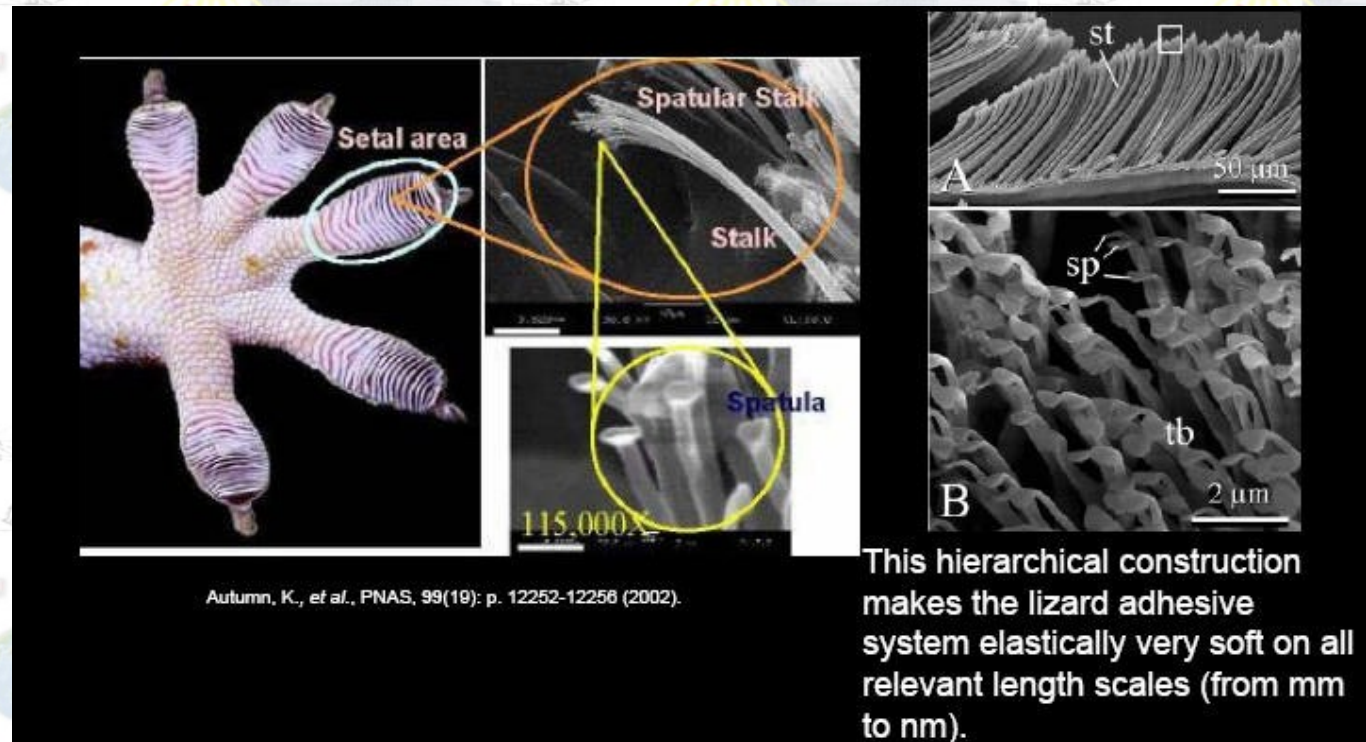
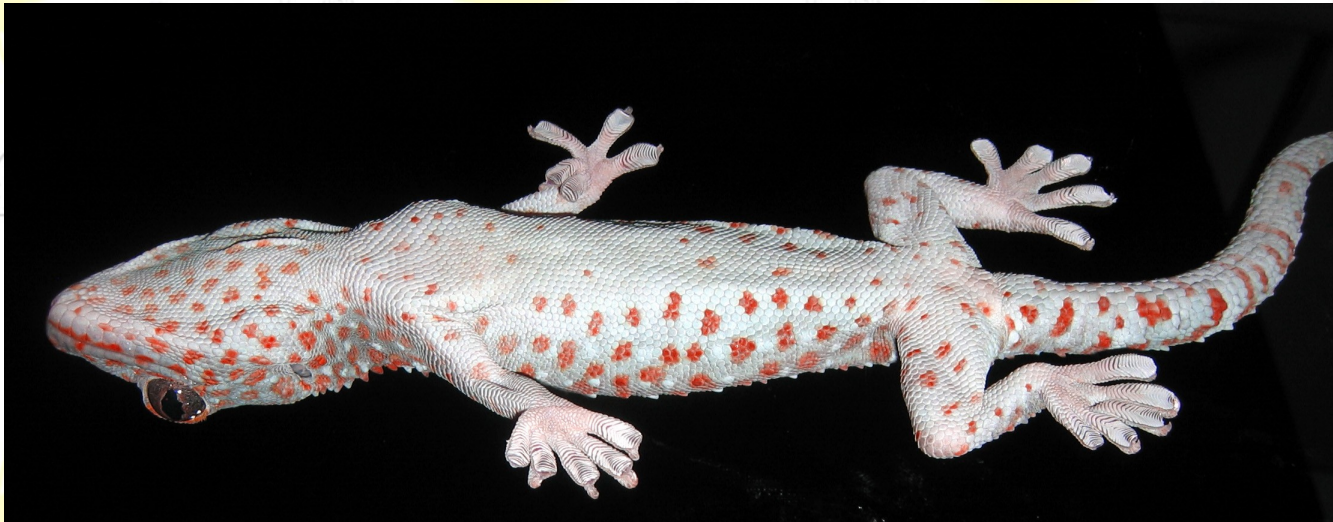
MTA-ELTE Elméleti Fizikai Kutatócsoport

Az atomoktól a csillagokig

2009. november 12.



A gekkó és a kvantumfizika

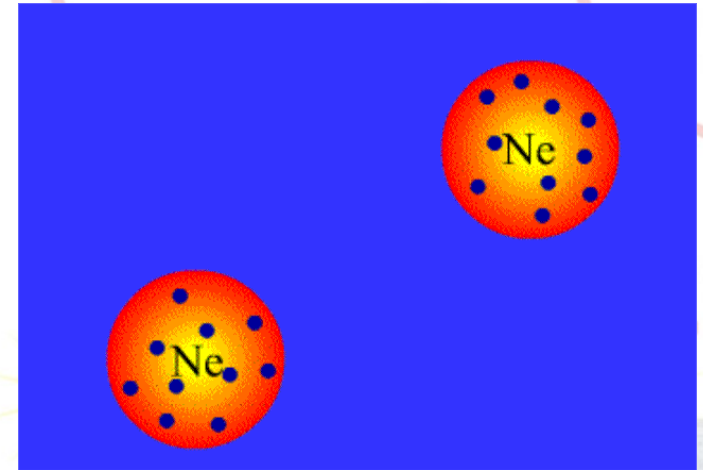


Mi a gekkó titka?

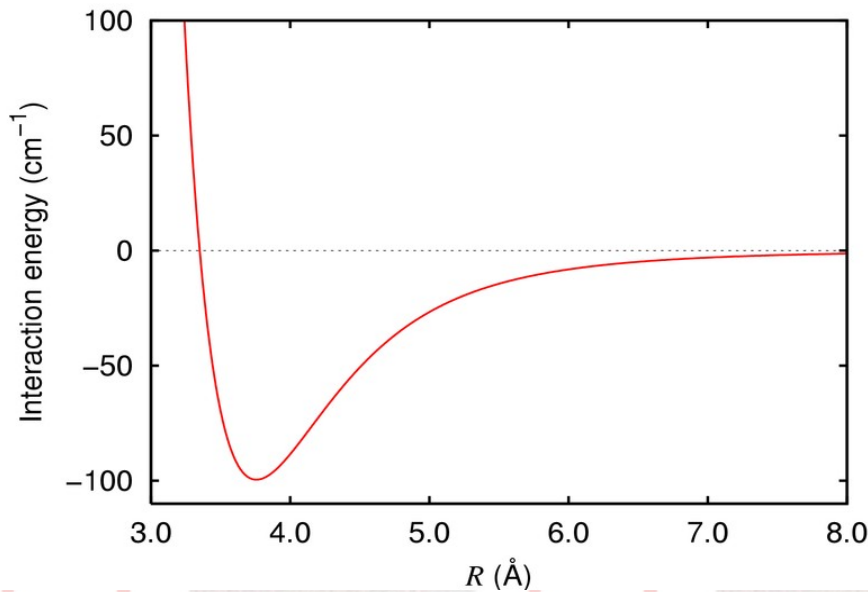
A van der Waals kölcsönhatás

A molekulák elektronsűrűségének ingadozása (fluktuációja) által létrehozott vonzóerő

Eredete: kvantumfluktuációk

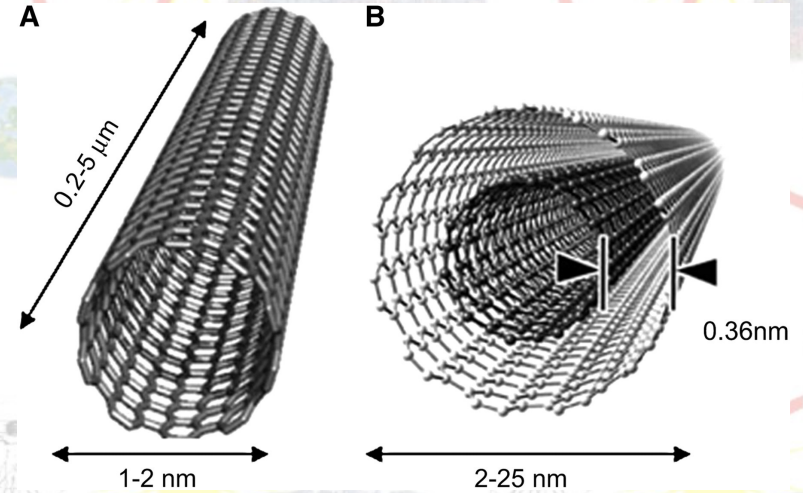
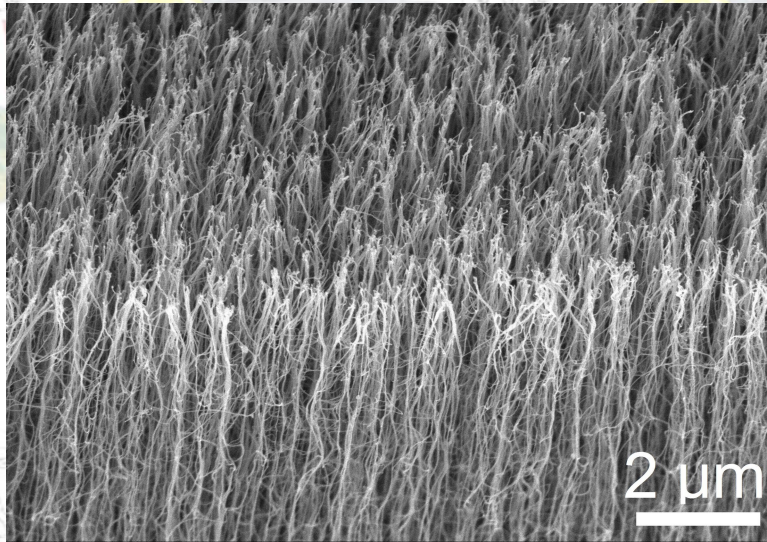


Van der Waals erő két neon atom között



Argon atomok közti kölcsönhatás potenciális energiája

Molekuláris ragasztó ("dry glue")



Szén nanocsövek

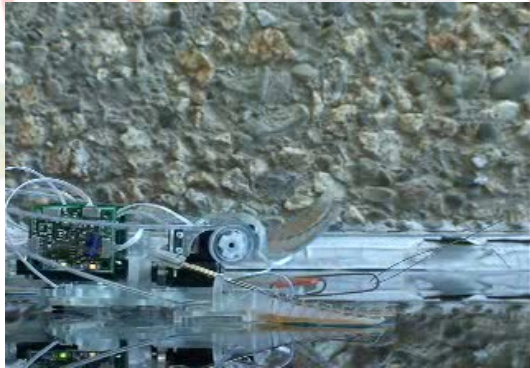
4 mm x 4 mm !

Science, 2008. október 10.

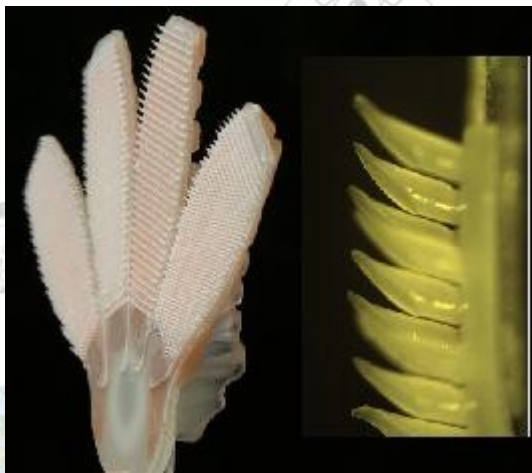
100 N/cm²:
a gekkóénál 10x erősebb!



**Most már értjük, hogy
csinálta Pókember... :-)**



**Stanford University
Biomimetics & Dexterous
Manipulation Laboratory
Első lépés: 2006. március**



A Casimir effektus felfedezése



H.B.G. Casimir
(1909-2000)

Casimir eredeti kérdése (1948): **a terjedési idő figyelembe vétele**

Távolhatásból számolt erő molekulák között: $1/r^6$

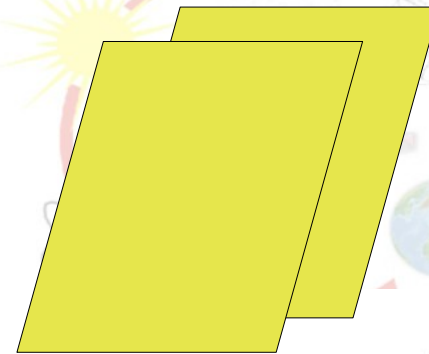
Mérések: nagy távolságon $1/r^7$ (Casimir & Polder: \checkmark)

Maxwell elmélet: az elektromágneses kölcsönhatás nem távolhatás
fénysebességgel terjed

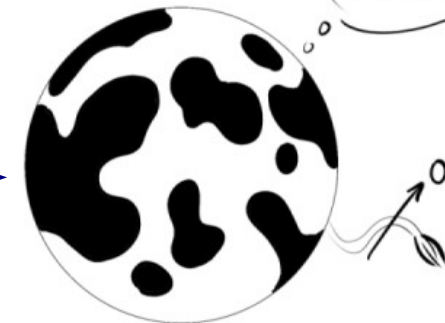
Molekulák: **bonyolult dolgok**



Casimir ötlete: vegyünk
molekulák helyett két
párhuzamos, tökéletes
vezető fémlemezt vákuumban



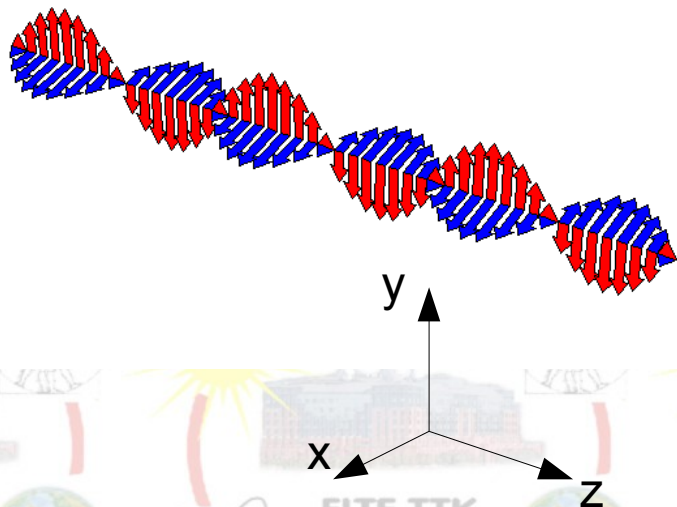
**Sokkal egyszerűbb:
mint a göbbszimmetrikus
tehén...**



Consider a spherical cow
of radius R ...

Casimir gondolatmenete

Elektromágneses mező vákuumban: **elektromágneses hullám**



Hullám = harmonikus oszcillátorok sora

Kvantummechanika:

$$E_n = h \nu \left(n + \frac{1}{2} \right)$$

Alapállapot: $E_0 = \frac{h \nu}{2}$ **zérus ponti energia**

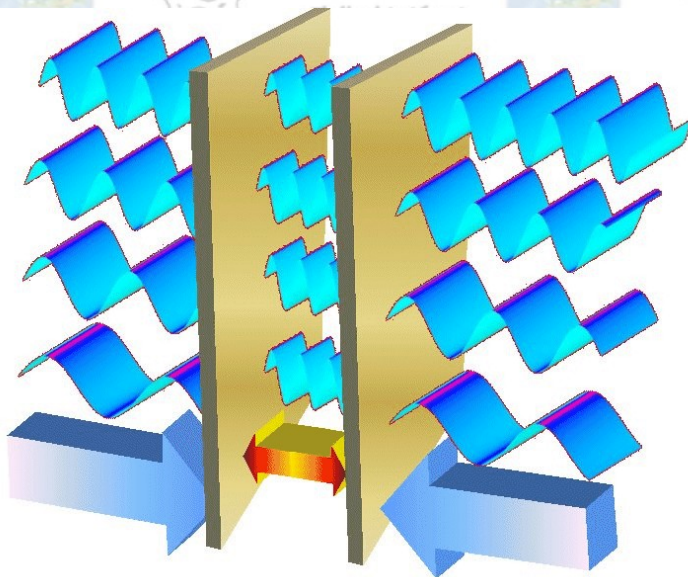
z irányú hullámok: csomópont a lemezen

a két lemez között csak olyanok megengedettek,
amikre $m \cdot \lambda / 2 = a$

sugárzási nyomás különbség: **vonzóerő**

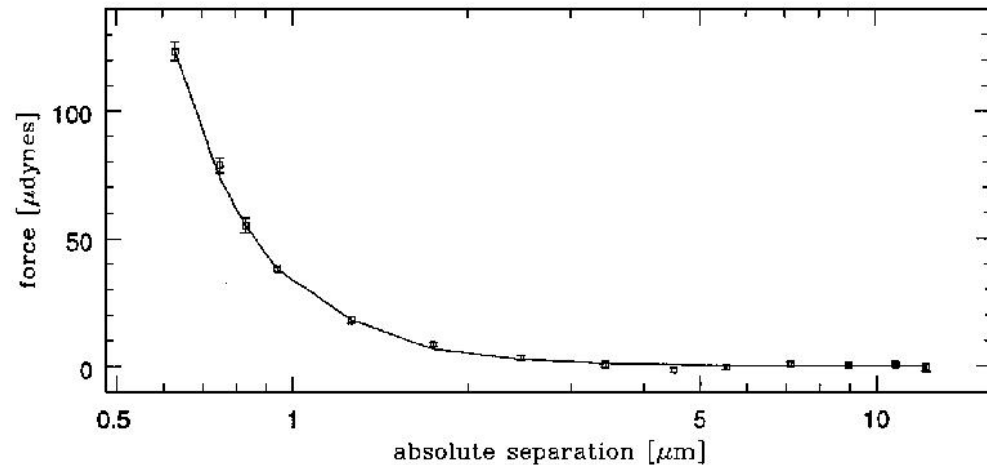
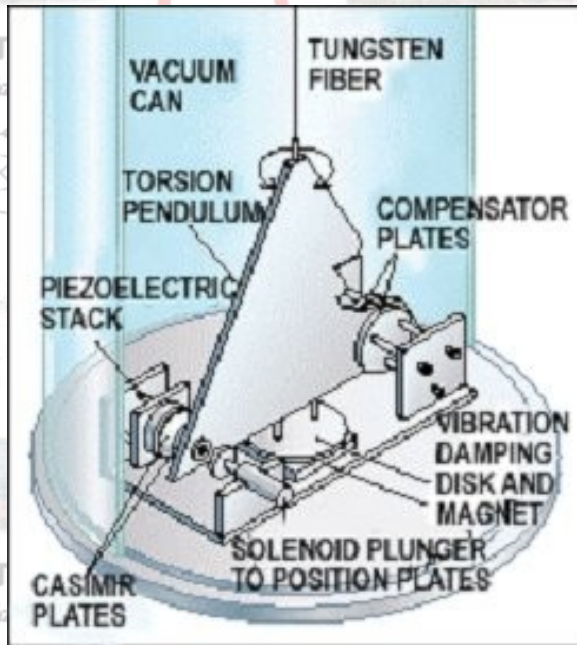
$$\frac{F}{A} = - \frac{\hbar c \pi^2}{240 a^4}$$

$$a = 1 \mu\text{m} : 1.3 \cdot 10^3 \text{ Pa}$$



Az első kísérleti igazolás

Lamoreaux, 1995 (vö. Casimir, 1948)



1 dyn = 10 μ Newton

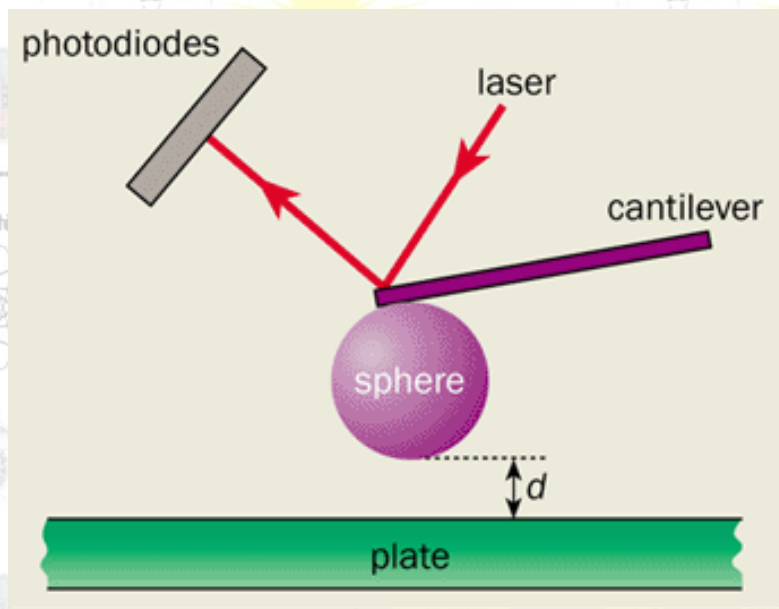
A kimérendő effektus nagyon kicsi, az elért pontosság 5% volt..

Korábbi kísérletek nem jártak eredménnyel, vagy nem kontrollálták megfelelően a hibatényezőket.

Elméleti tényezők: hőmérsékletfüggés, felületi egyenetlenségek.

Kísérleti tényezők: felületi töltések, mérési hibák.

Újabb kísérletek



Mohideen & Roy, 1998
Univ. of California, Riverside

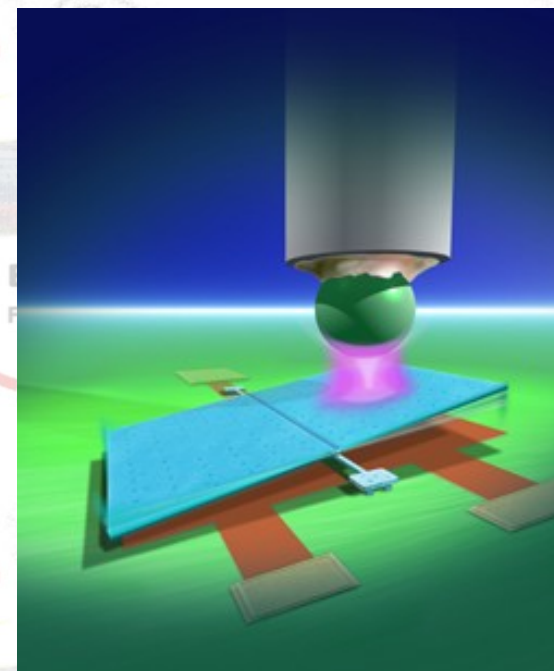
1% pontosság

Atomi erő mikroszkóp karjára erősítettek arannyal bevont polisztirol gömböcskét, epoxigyantával.

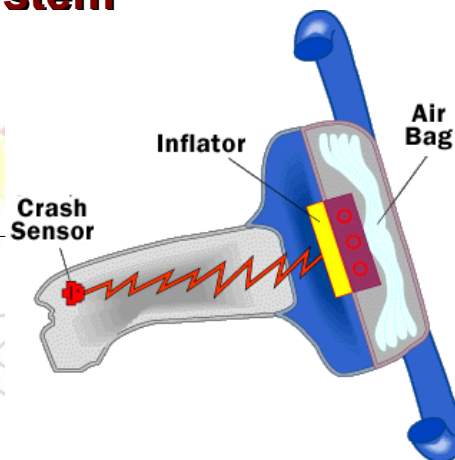
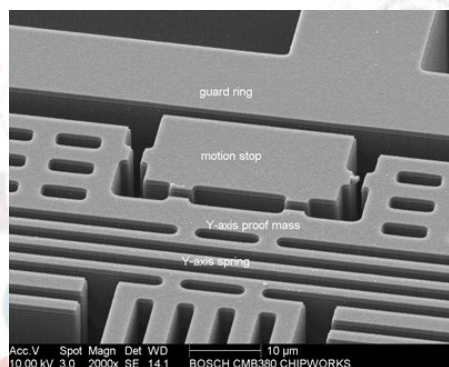
Chan et al. 2001
Bell Labs

<1% pontosság

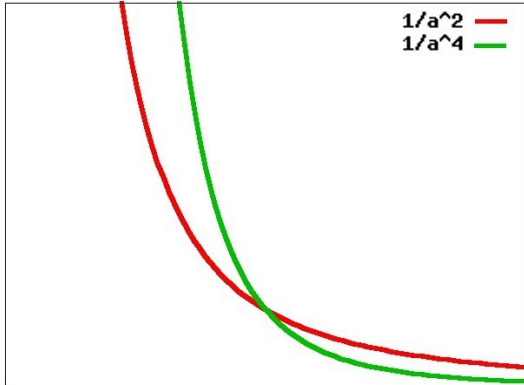
Torziós MEMS fölött mozgattak egy üvegszálra ragasztott gömböcskét.



MEMS = Micro-Electro-Mechanical System



Casimir erő a nanoskálán

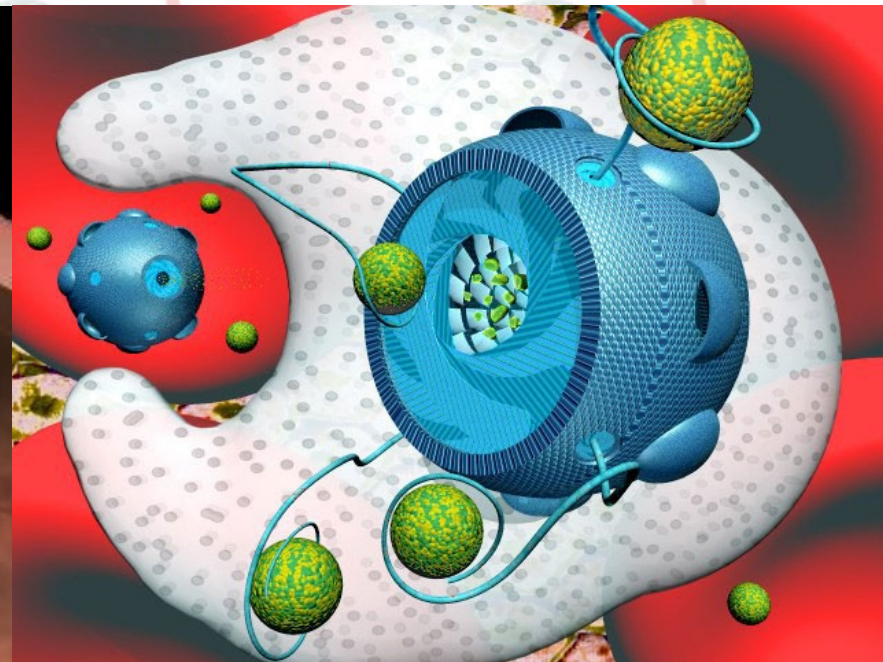
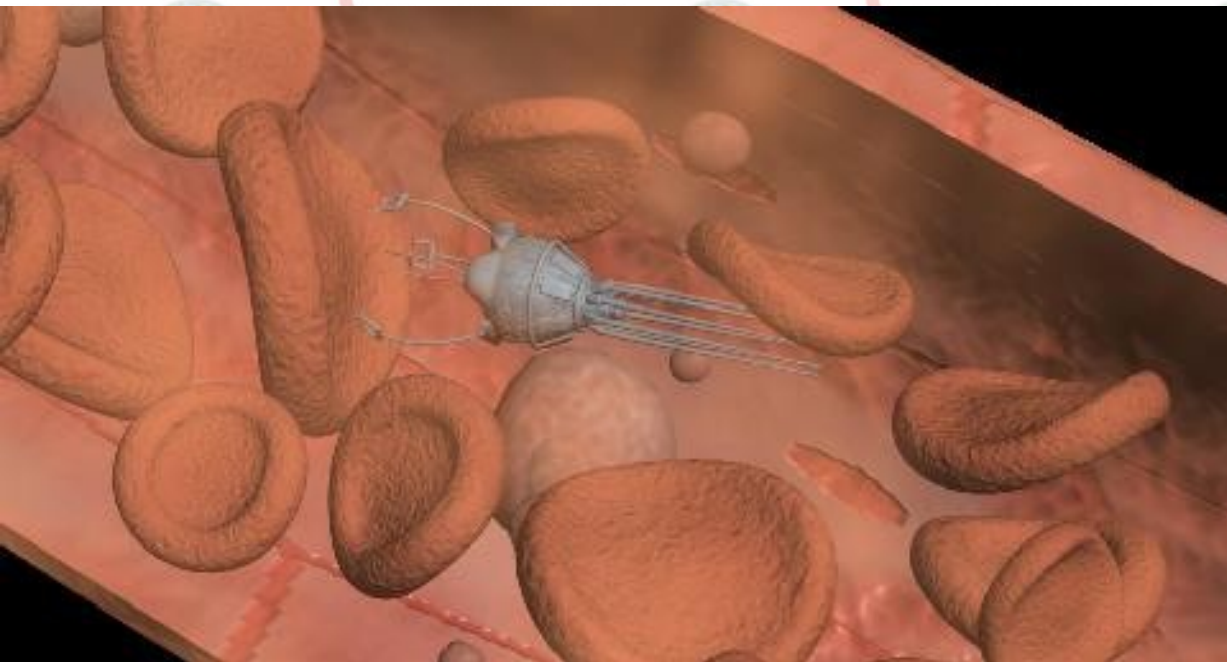


A távolságfüggése miatt a Casimir erő nanoméretekben domináns: mind az elektrosztatikus, mind a gravitációs erőkhez képest.

Ráadásul a nanoeszközök nagyon könnyűek, így ezekre a Casimir erő hatalmas hatást gyakorol!

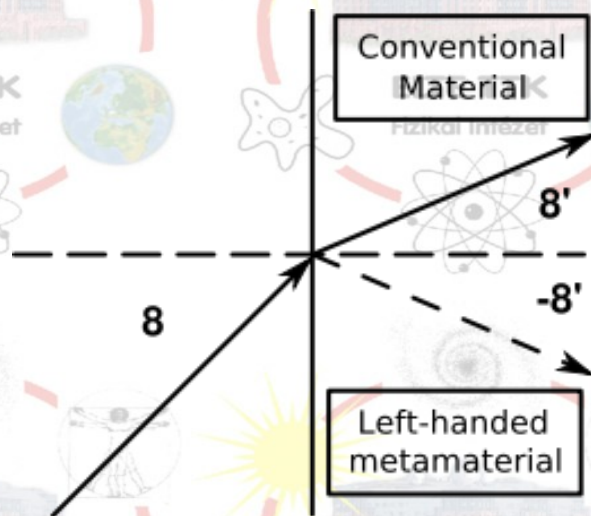
A Casimir erő minden nanoeszközt képes összeragasztani!

Lehet, hogy a nanorobot csak álom marad?

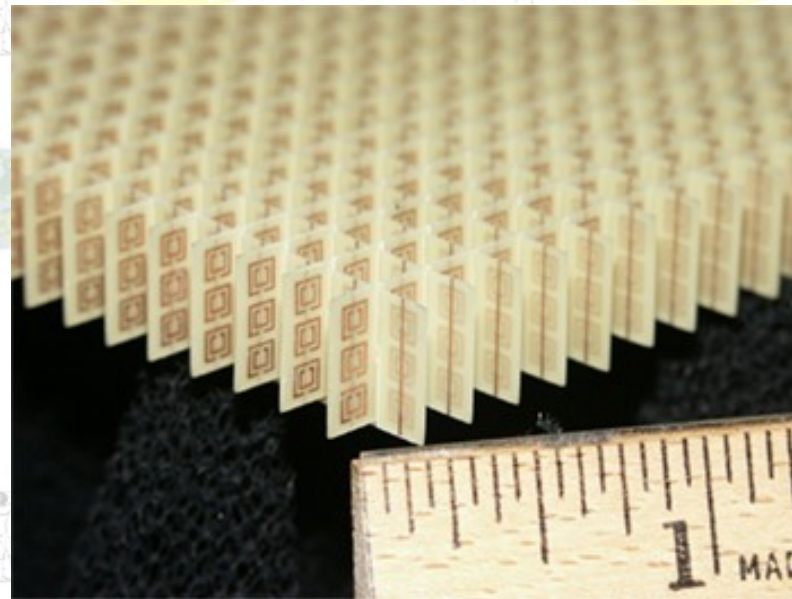


Vonzásból taszítás: megfordul a Casimir erő

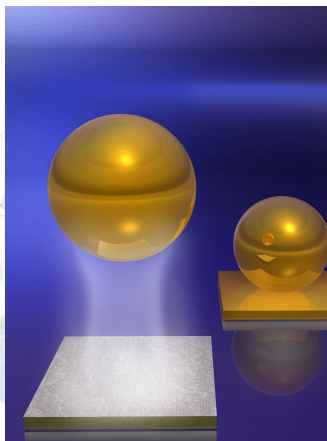
Optikai metaanyagok: negatív törésmutató



Rádióhullámú metaanyag



U. Leonhardt és T. Philbin (St. Andrews University), 2006. május

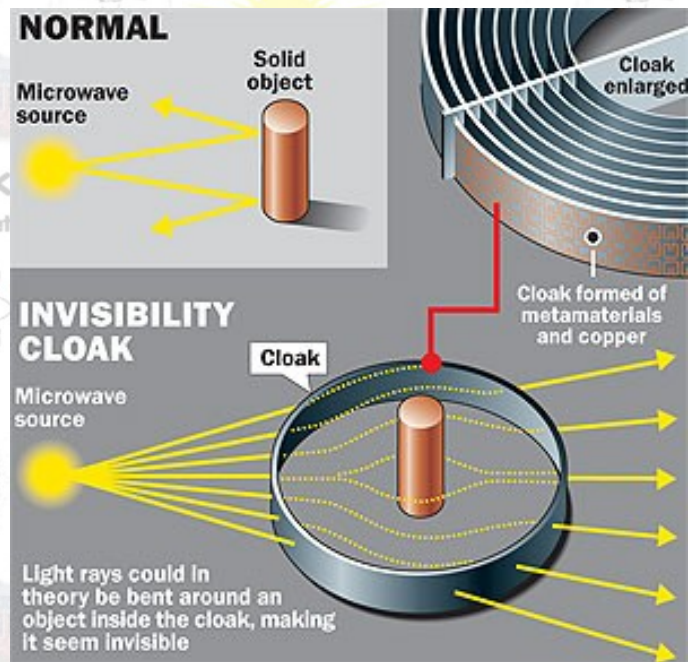


Kísérlet: F. Capasso, Harvard University
arany gömb – brómbenzol közeg – szilikon lap

Sikerült taszító erőt mérni!

$$n_{Au} \gg n_{Brbenzol} \gg n_{Si}$$

Láthatatlanná tevő köpeny és levitáció



**Mikrohullámokkal már megy:
potenciális katonai alkalmazások a láthatáron!**

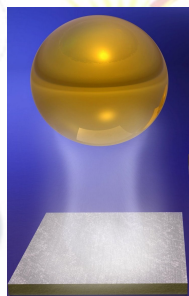
Optikai tartományban: fejlesztés alatt...

Sajnos, ilyen jó nem lesz::



**Mit kapunk, ha egy láthatatlanná tevő köpönyeget
leterítünk a földre?**

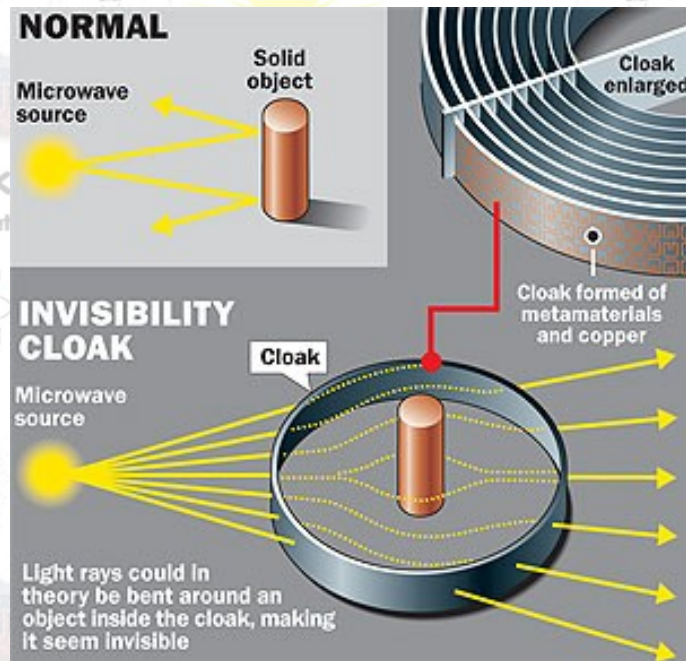
Nanoobjektumokat hamarosan lehet majd lebegtetni...



Ez, sajnos, nem nagyon fog menni:



Láthatatlanná tevő köpeny és levitáció



**Mikrohullámokkal már megy:
potenciális katonai alkalmazások a láthatáron!**

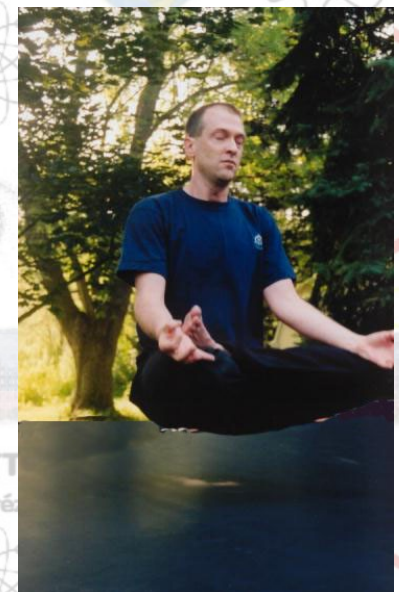
Optikai tartományban: fejlesztés alatt...

Sajnos, ilyen jó nem lesz::

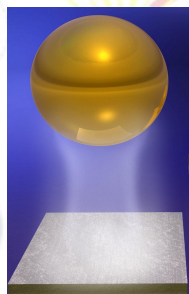


**Mit kapunk, ha egy láthatatlanná tevő köpönyeget
leterítünk a földre?**

Repülőszőnyeget!



Nanoobjektumokat hamarosan lehet majd lebegtetni...



Ez, sajnos, nem nagyon fog menni:

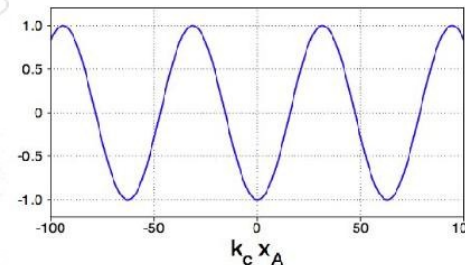
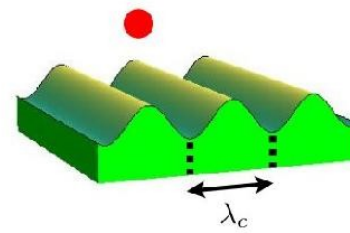
Munkába fogjuk a Casimir erőt

Oldalirányú (laterális) Casimir erő

Kísérleti igazolás:

Chen és Mohideen, 2002

Univ. California, Riverside

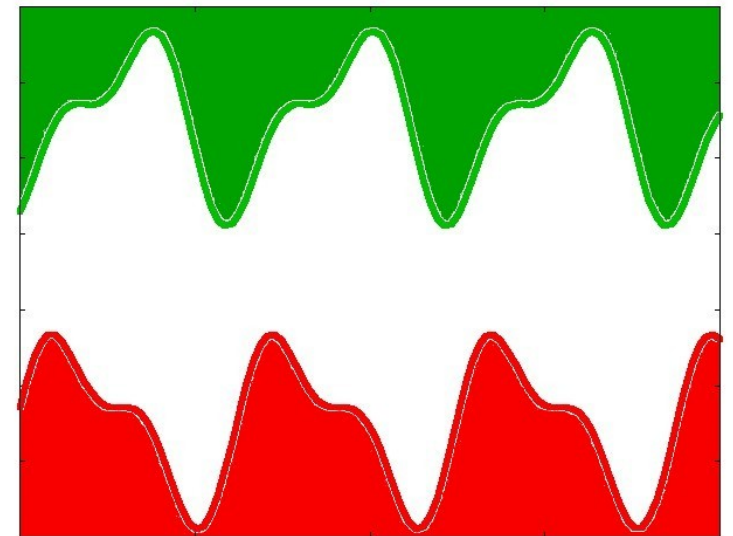


Oldalirányú mozgás generátor

“Casimir ratchet”

T. Emig, 2007

Université Paris-Sud



A felület rezgetésével:
oldalirányú sebesség arányos a frekvenciával

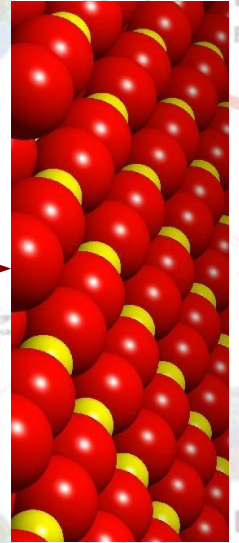
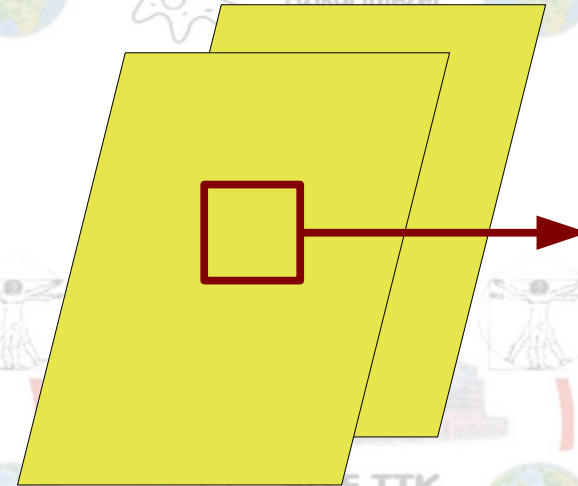
Jelenleg elektrosztatikus erőkkel oldják meg (MEMS)

Mégis lesznek nanorobotok!

Végtelen energia — vagy mégse?

Munkavégzés, amíg a lemezeket nagyon messziről a távolságra hozzuk:

$$W = -\frac{\hbar c \pi^2}{720 a^3} A$$



a	1 mm	1 μm	1 nm	1 Å (0.1 nm)
W/A (J/m ²)	$1.3 \cdot 10^{-18}$	$1.3 \cdot 10^{-9}$	1.3	1300

Valóságos anyag: sok-sok kicsi molekula

Mennyi a minimális távolság?

1 Angström (10^{-10} m) alá az anyag atomi szerkezete miatt nem lehet menni!

Hmmm... ebből nem lesz ingyenenergia!

ZPE: elterjedt tévképzetek

Zérusponthi energia

$$E_0 = \sum \frac{1}{2} h\nu$$

Ez igazából végtelen nagyra adódik,
mert elvileg akár mekkora lehet a frekvencia!

Vagy mégse?

Maximális ma elérhető energia/részecske: kb. 1 TeV

TeV = teraelektronvolt = 10^{12} elektronvolt, 1 elektronvolt = $1.6 \cdot 10^{-19}$ J

$$\frac{E}{V} = 10^{47} \frac{J}{m^3}$$



Tényleg itt lenne ez a rengeteg energia, csak ki kell bányászni?

ZPE: aminek nyomát sem leled

1. probléma: a kvantumelméleti vákuum a legalacsonyabb energiájú állapot.

A padlónál pedig nem eshetsz lejjebb – a vákuumból nem lehet energiát kivenni!

Az energia eredeti jelentése: a munkatétel

$$E_2 - E_1 = W$$

mérleg egyenlet

Az energia zéruspontja tetszőleges... azaz majdnem!

2. probléma: az energia gravitál

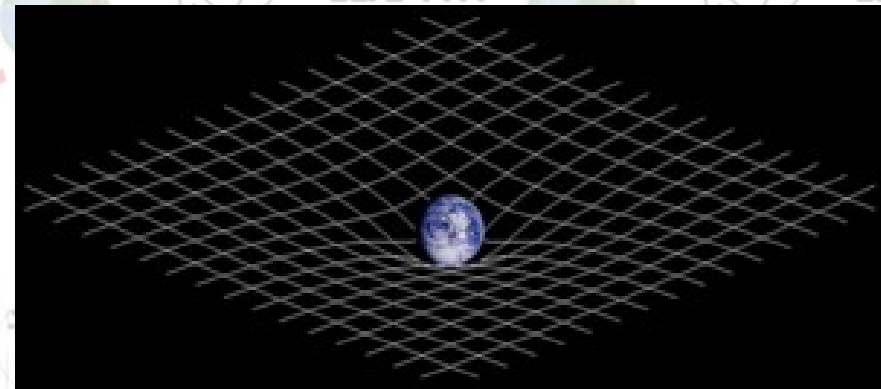
$$E = mc^2$$

Einstein általános relativitás elmélete szerint az energiasűrűség gravitál!

$$\frac{E}{V} = 10^{47} \frac{J}{m^3} \rightarrow \frac{m}{V} = \rho = 10^{30} \frac{kg}{m^3} !$$

Föld tömege: $6 \cdot 10^{24}$ kg

Nap tömege: $2 \cdot 10^{30}$ kg



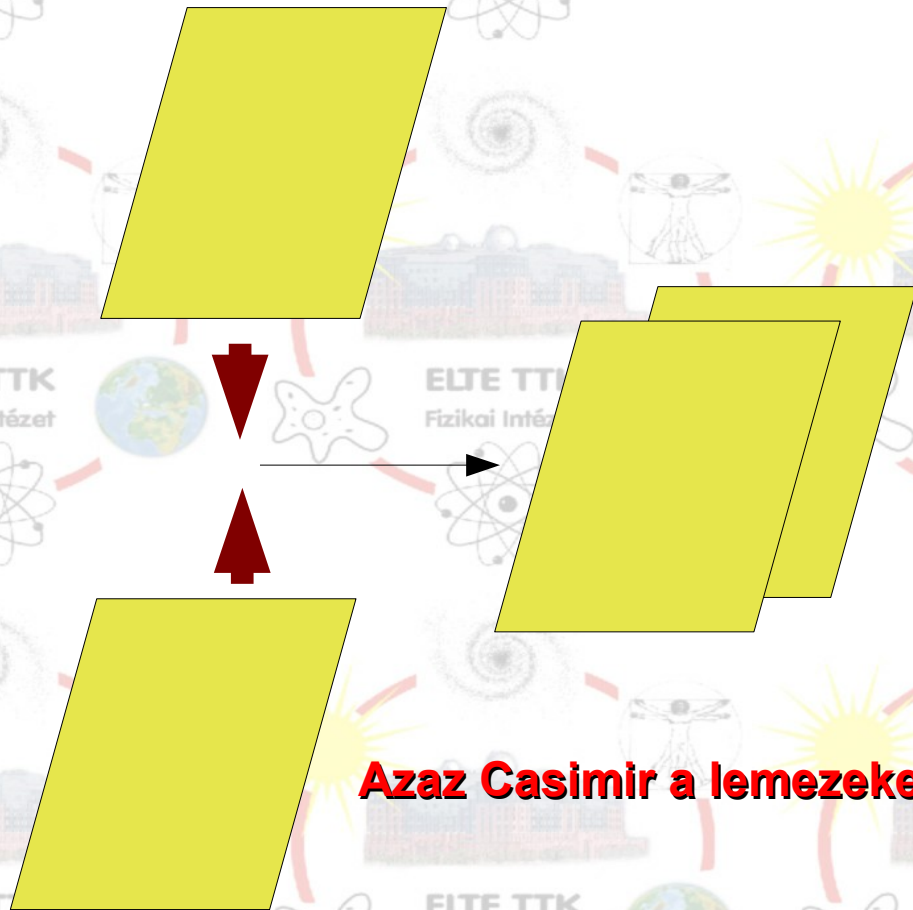
Nem nyerhető ki, nem is gravitál: ez a láthatatlan lebegő rózsaszín elefánt!

Miért működik Casimir levezetése?

Maxwell-elmélet: elektromágneses tér energiasűrűsége

$$\frac{E_{em}}{V} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \vec{E}^2 + \frac{1}{2\mu_0} \vec{B}^2$$

Azaz a Coulomb erő által végzett munka: $W = \Delta E_{em}$



$$E(a) = E_{em}(a) - E_{em}(\infty) = -\frac{\hbar c \pi^2}{720 a^3} A$$

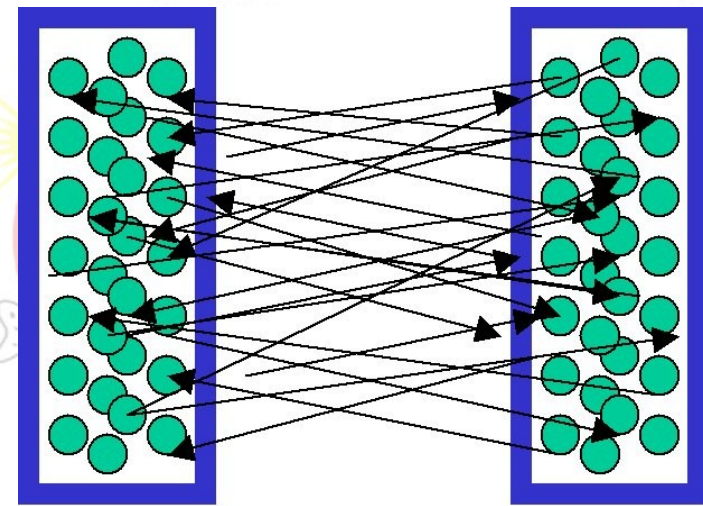
$$F(a) = -\frac{dE}{da} = -\frac{\hbar c \pi^2}{240 a^4} A$$

Azaz Casimir a lemezeken lévő fluktuáló töltések közötti erőt számolta ki !

A Casimir effektus nem igazolja a ZPE létezését!

Casimir számolása tényleg “csak” a relativisztikus van der Waals erőt adja meg!

(relativisztikus = jelterjedés figyelembevétel)



De milyen akkor a kvantum vákuum?

Rengeteg kísérlet igazolja a vákuumfluktuációk jelenlétét: elektron és müon anomális mágneses nyomatéka, Lamb-eltolódás a hidrogén-atomban, ...

Ezek a kvantumelektrodinamika kísérleti bizonyítékai

1. Vákuum fluktuációk vannak, de ez a “padló” (aminél nem eshetsz lejjebb)

2. A lemezek deformálják a fluktuációkat, ezzel egy kicsit megváltoztatják az energiasűrűséget (nem nagyon, az effektus nagyon kicsi)

3. Egyszerűen vehetnénk ezen állapot energiáját zérusnak, de...

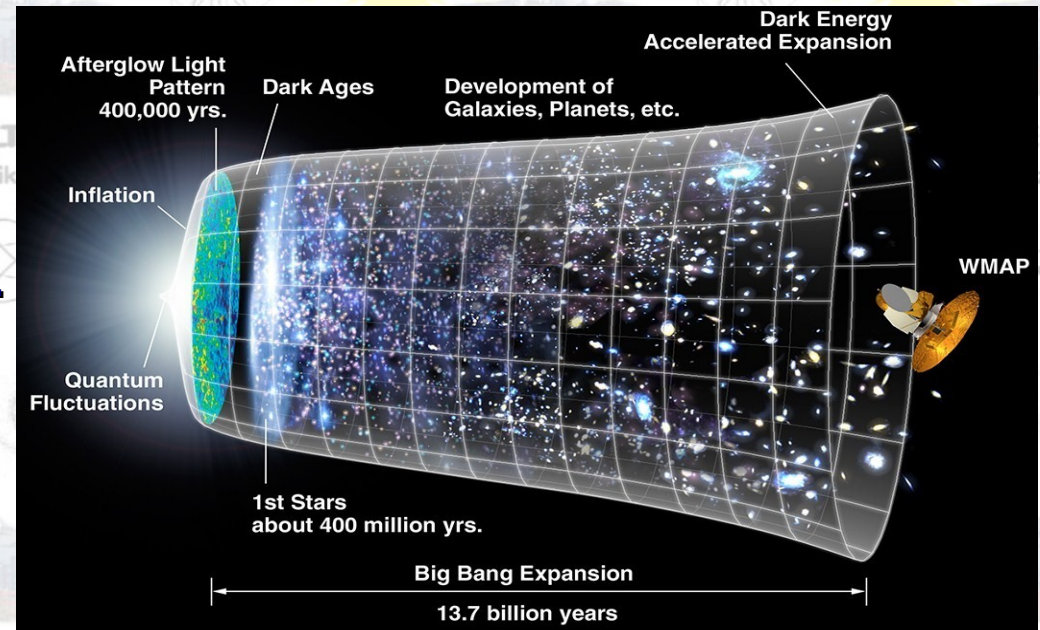
Az Univerzum tágulása

Azt várnánk, hogy az Univerzum tágulása a gravitáció miatt lassul... de nem!

5 milliárd évvel ezelőttig így is volt, de azóta az Univerzum tágulása **gyorsulóba** ment át...

Ennek feltételezett oka: **sötét energia**

Lényege: **negatív nyomású anyagfajta**



$p > 0$ anyag: táguláskor $p\Delta V$ munkát végez a környezetén – **energiát veszít**

$p < 0$ anyag: táguláskor **energiát nyer** – ezzel pótolni tudja a gravitációs veszteséget, ha

$$p < -\frac{1}{3}\epsilon$$

ϵ : energiasűrűség

Vákuumenergia:

$$p = -\epsilon$$

A jelenlegi mérések ezzel konzisztensek és:

$$\epsilon = 5.4 \cdot 10^{-10} \frac{J}{m^3}$$

A vákuumenergia helyzete

A naív ZPE érvelés biztosan rossz, nem igazolható, és a Casimir effektus sem tekinthető a ZPE igazolásának (Casimir = relativisztikus van der Waals)

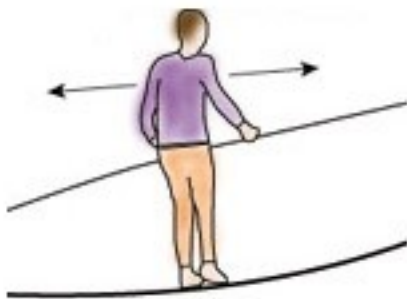
Ennek ellenére:

A kozmológiából úgy tűnik, az üres térnek van ("sötét") energiája

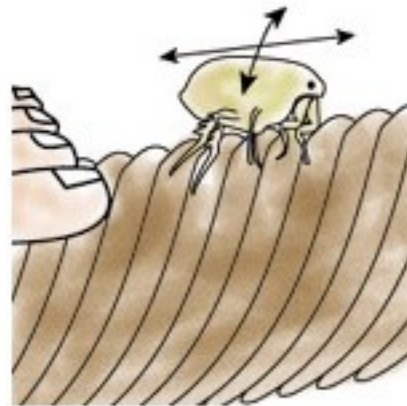
Ennek magyarázata ma Nobel-díjas kérdés!

Eredhet akár extra dimenziós Casimir effektusból is!

Az extra dimenzió méretének változása a vákuumfluktuációkat befolyásolja



An acrobat can only move in one dimension along a rope..

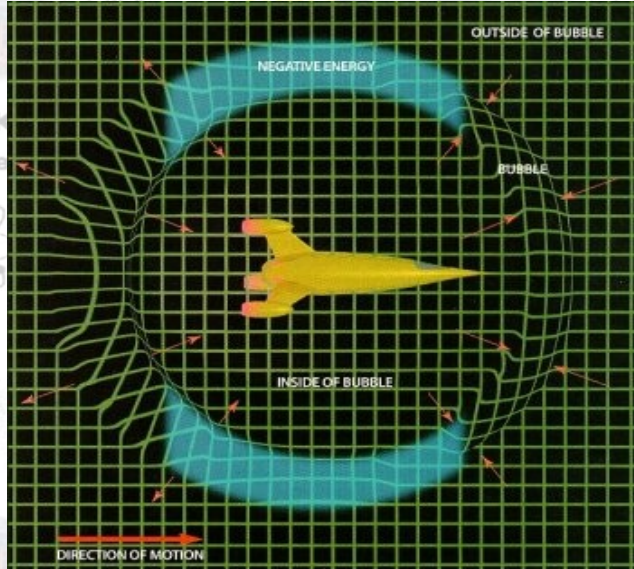


...but a flea can move in two dimensions.

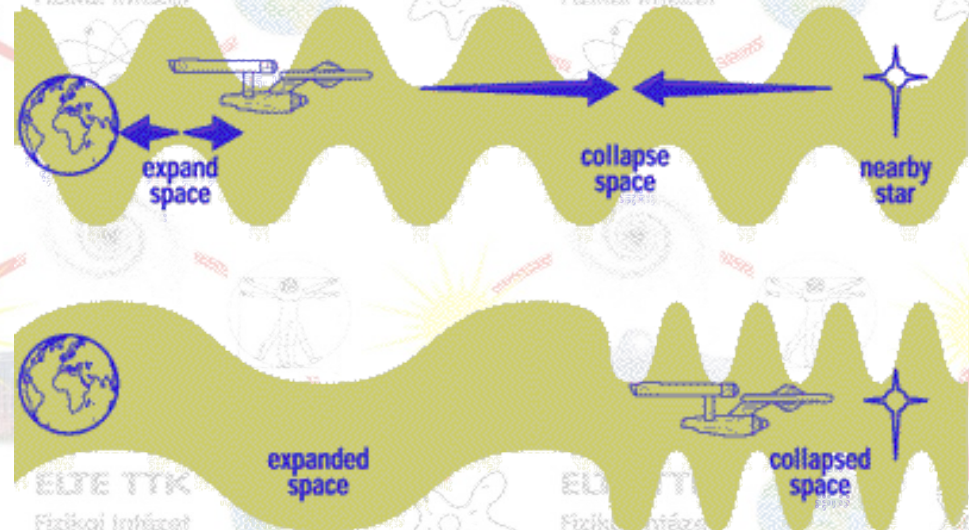


Casimir energia a négydimenziós téridőn szétkenve

Egy kis science-fiction: a warp drive



M. Alcubierre, in: **Classical and Quantum Gravity**, 1994



Egyszer, a távoli jövőben a vákuum mérnökei révén talán majd eljön a Star Trek korszaka...

de jelenleg erősen vitatott, hogy lehetséges-e egyáltalán!

Talán csak egy szórakoztató paradoxon, mint a specrel ikrei...

Köszönöm a figyelmet!

