Van-e a vákuumnak energiája? A Casimir effektus és azon túl

Takács Gábor

MTA-ELTE Elméleti Fizikai Kutatócsoport

Bolyai Kollégium, 2007. október 3.

Vázlat

1. Bevezetés
2. A Casimir effektus
3. Casimir effektus és vákuumenergia
4. Vákuumenergia és gravitáció
5. Összefoglalás

Vázlat

1. Bevezetés
2. A Casimir effektus
3. Casimir effektus és vákuumenergia
4. Vákuumenergia és gravitáció
5. Összefoglalás

Vázlat

1. Bevezetés
2. A Casimir effektus
3. Casimir effektus és vákuumenergia
4. Vákuumenergia és gravitáció
5. Összefoglalás

Vázlat

1. Bevezetés
2. A Casimir effektus
3. Casimir effektus és vákuumenergia
4. Vákuumenergia és gravitáció
5. Összefoglalás

Vázlat

1. Bevezetés
2. A Casimir effektus
3. Casimir effektus és vákuumenergia
4. Vákuumenergia és gravitáció
5. Összefoglalás

Az elektromágneses mező kvantumelmélete

1948: Feynmann, Schwinger, Tomonaga (Nobel-díj: 1965)
A relativisztikus kvantumelektrodinamika (QED) megalkotása

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{\psi}\left(i\gamma^{\mu}(\partial_{\mu} + ieA_{\mu}) - m\right)\psi \qquad F_{\mu\nu} = \partial_{\mu}A_{\nu} - \partial_{\nu}A_{\mu}$$

A foton és az elektron/pozitron elmélete
(Kezdetek: Dirac, Pauli, Weisskopf, Jordan; 1927-)
Standard modell:
a QED kiterjesztése az EM+gyenge+erős kölcsönhatásra

Az elektromágneses mező kvantumelmélete

1948: Feynmann, Schwinger, Tomonaga (Nobel-díj: 1965)
A relativisztikus kvantumelektrodinamika (QED) megalkotása

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{\psi}\left(i\gamma^{\mu}(\partial_{\mu} + ieA_{\mu}) - m\right)\psi \qquad F_{\mu\nu} = \partial_{\mu}A_{\nu} - \partial_{\nu}A_{\mu}$$

A foton és az elektron/pozitron elmélete
(Kezdetek: Dirac, Pauli, Weisskopf, Jordan; 1927-)
Standard modell:
a QED kiterjesztése az EM+gyenge+erős kölcsönhatásra

Az elektromágneses mező kvantumelmélete

1948: Feynmann, Schwinger, Tomonaga (Nobel-díj: 1965)
A relativisztikus kvantumelektrodinamika (QED) megalkotása

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{\psi}\left(i\gamma^{\mu}(\partial_{\mu} + ieA_{\mu}) - m\right)\psi \qquad F_{\mu\nu} = \partial_{\mu}A_{\nu} - \partial_{\nu}A_{\mu}$$

A foton és az elektron/pozitron elmélete
(Kezdetek: Dirac, Pauli, Weisskopf, Jordan; 1927-)
Standard modell:
a QED kiterjesztése az EM+gyenge+erős kölcsönhatásra

Az elektromágneses mező kvantumelmélete

1948: Feynmann, Schwinger, Tomonaga (Nobel-díj: 1965)
A relativisztikus kvantumelektrodinamika (QED) megalkotása

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{\psi}\left(i\gamma^{\mu}(\partial_{\mu} + ieA_{\mu}) - m\right)\psi \qquad F_{\mu\nu} = \partial_{\mu}A_{\nu} - \partial_{\nu}A_{\mu}$$

A foton és az elektron/pozitron elmélete
(Kezdetek: Dirac, Pauli, Weisskopf, Jordan; 1927-)
Standard modell:
a QED kiterjesztése az EM+gyenge+erős kölcsönhatásra

A QED kísérleti igazolása

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c} \quad \text{finomszerkezeti állandó}$$

Elektron mágneses nyomatéka:	$1/\alpha = 137.035999710(96)$
Visszalökődés atommagokon:	$1/\alpha = 137.03599878(91)$
Hiperfinom felhasadás (müonium):	$1/\alpha = 137.035994(18)$
Lamb eltolódás:	$1/\alpha = 137.0368(7)$
Kvantum Hall effektus:	$1/\alpha = 137.0359979(32)$

QED: a legpontosabban igazolt fizikai elmélet!
„quod erat demonstrandum”

A QED kísérleti igazolása

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c} \quad \text{finomszerkezeti állandó}$$

Elektron mágneses nyomatéka:	$1/\alpha = 137.035999710(96)$
Visszalökődés atommagokon:	$1/\alpha = 137.03599878(91)$
Hiperfinom felhasadás (müonium):	$1/\alpha = 137.035994(18)$
Lamb eltolódás:	$1/\alpha = 137.0368(7)$
Kvantum Hall effektus:	$1/\alpha = 137.0359979(32)$

QED: a legpontosabban igazolt fizikai elmélet!
„quod erat demonstrandum”

A QED kísérleti igazolása

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c} \quad \text{finomszerkezeti állandó}$$

Elektron mágneses nyomatéka:	$1/\alpha = 137.035999710(96)$
Visszalökődés atommagokon:	$1/\alpha = 137.03599878(91)$
Hiperfinom felhasadás (müonium):	$1/\alpha = 137.035994(18)$
Lamb eltolódás:	$1/\alpha = 137.0368(7)$
Kvantum Hall effektus:	$1/\alpha = 137.0359979(32)$

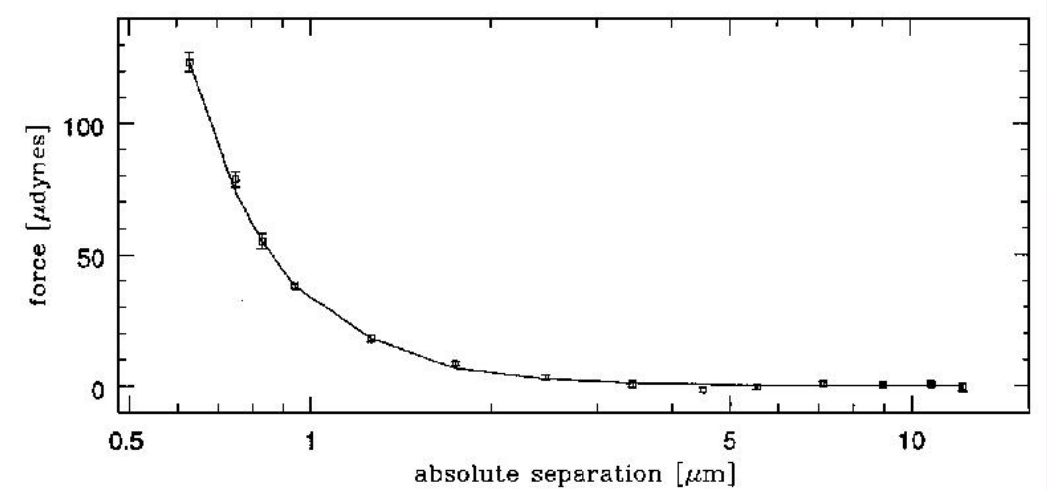
QED: a legpontosabban igazolt fizikai elmélet!
„quod erat demonstrandum”

A Casimir effektus története dióhéjban

Két tökéletes vezető lemez között vákuumban vonzóerő lép fel (Casimir, 1948)

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

A QED makroszkopikus jóslata:
1 μm távolság esetén 8.169×10^{-3} Pa



Lamoreaux, 1996: kísérleti egyezés (5%-os pontosság)

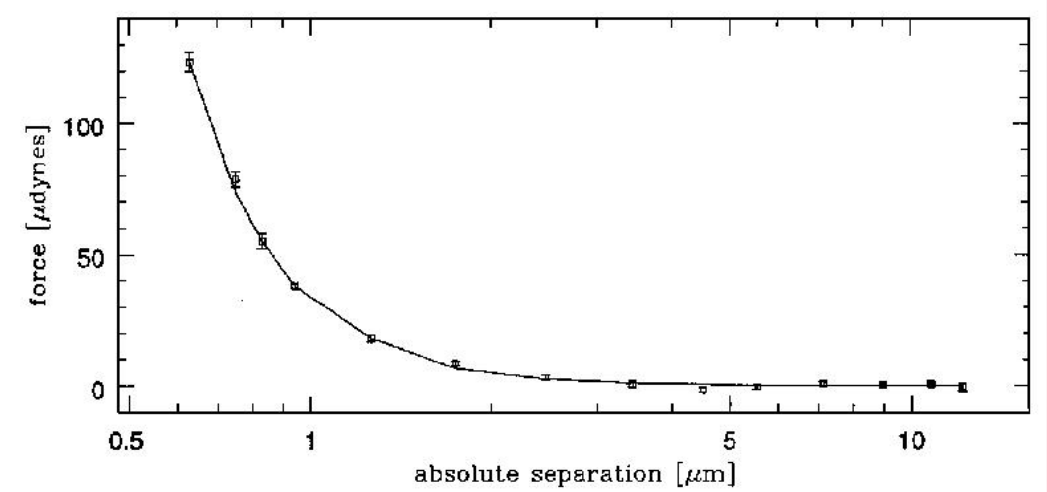
A Casimir effektus története dióhéjban

Két tökéletes vezető lemez között vákuumban vonzóerő lép fel (Casimir, 1948)

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

A QED makroszkopikus jóslata:

1 μm távolság esetén 8.169×10^{-3} Pa



Lamoreaux, 1996: kísérleti egyezés (5%-os pontosság)

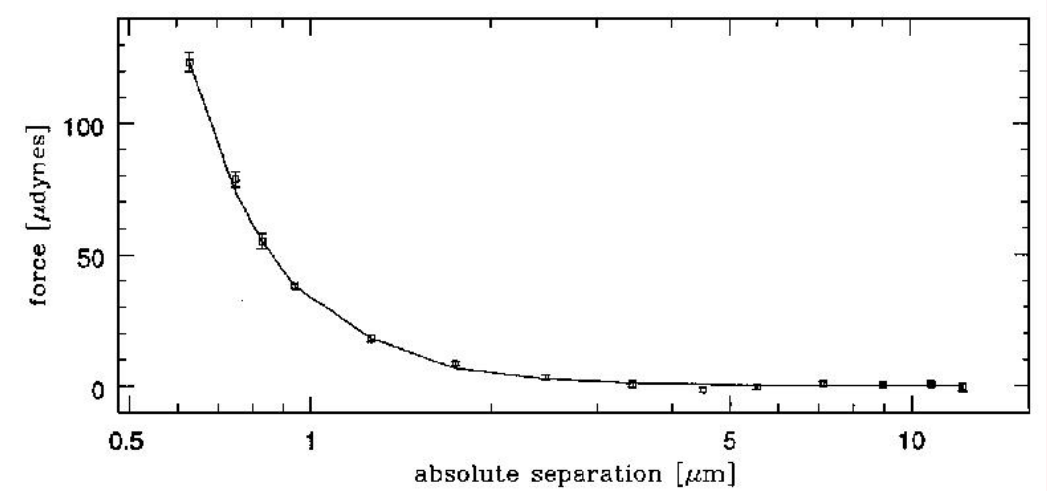
A Casimir effektus története dióhéjban

Két tökéletes vezető lemez között vákuumban vonzóerő lép fel (Casimir, 1948)

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

A QED makroszkopikus jóslata:

1 μm távolság esetén 8.169×10^{-3} Pa



Lamoreaux, 1996: kísérleti egyezés (5%-os pontosság)

Casimir levezetése I: a zérusponti fluktuációk

Kvantált elektromágneses mező: Fourier módusok

$$\omega = c\left|\vec{k}\right| \quad , \quad \text{két polarizációs állapot}$$

Harmonikus oszcillátor alapállapoti energiája

$$E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$$

Ebből a teljes térfogati energiasűrűségre jókora **végtelen** adódik:

$$\frac{\hbar}{2}\int \frac{d^3\vec{k}}{(2\pi)^3} c\left|\vec{k}\right| = \infty$$

Casimir levezetése I: a zérusponti fluktuációk

Kvantált elektromágneses mező: Fourier módusok

$$\omega = c\left|\vec{k}\right| \quad , \quad \text{két polarizációs állapot}$$

Harmonikus oszcillátor alapállapoti energiája

$$E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$$

Ebből a teljes térfogati energiasűrűségre jókora **végtelen** adódik:

$$\frac{\hbar}{2}\int \frac{d^3\vec{k}}{(2\pi)^3} c\left|\vec{k}\right| = \infty$$

Casimir levezetése I: a zérusponti fluktuációk

Kvantált elektromágneses mező: Fourier módusok

$$\omega = c\left|\vec{k}\right| \quad , \quad \text{két polarizációs állapot}$$

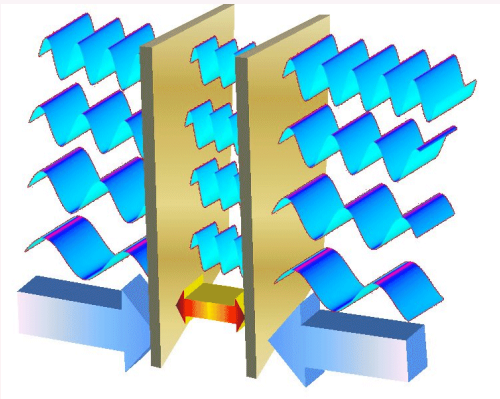
Harmonikus oszcillátor alapállapoti energiája

$$E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$$

Ebből a teljes térfogati energiasűrűségre jókora **végtelen** adódik:

$$\frac{\hbar}{2}\int \frac{d^3\vec{k}}{(2\pi)^3} c\left|\vec{k}\right| = \infty$$

Casimir levezetése II: a vákuumenergia megváltozása véges



$$\int d^3\vec{k} \to \int_0^\Lambda k^2 dk \int d\Omega_{\vec{k}}$$

és a kölcsönhatási energia

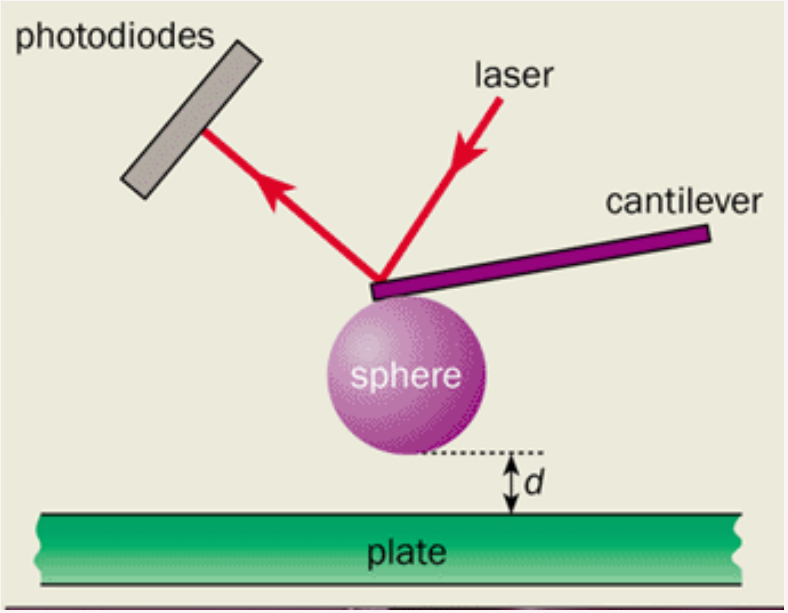
$$\Delta E(a)_\Lambda = \sum{}^\Lambda \frac{1}{2}\hbar\omega\Big|_{\text{plates}} - \sum{}^\Lambda \frac{1}{2}\hbar\omega\Big|_{\text{vacuum}}$$

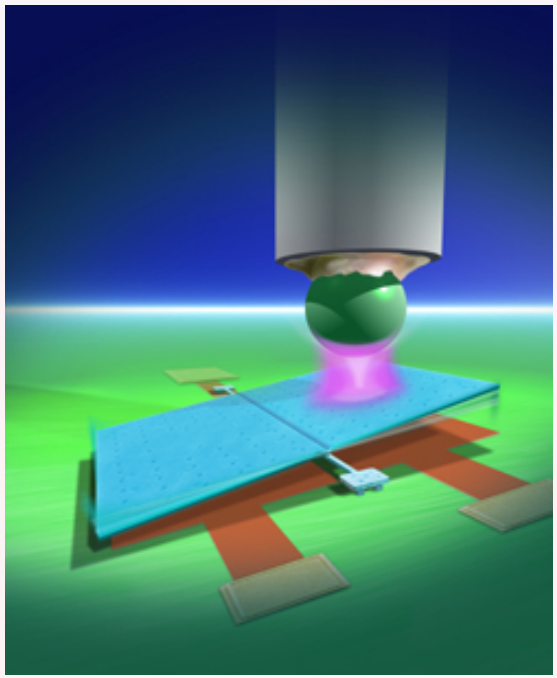
ennek van értelme $\Lambda \to \infty$ után, az erő pedig

$$F(a) = -\frac{\partial}{\partial a}\Delta E(a)_{\Lambda=\infty}$$

Kísérletek

Lamoreaux (1996) után számos más mérés

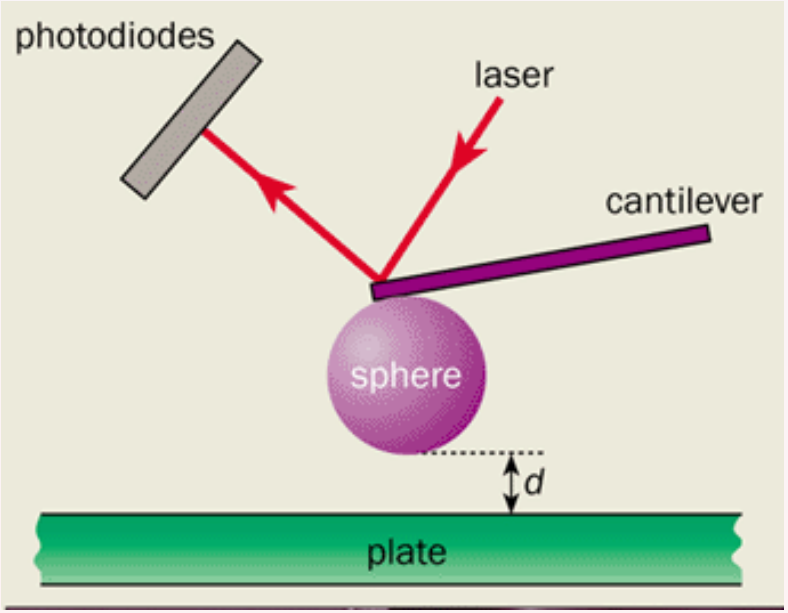


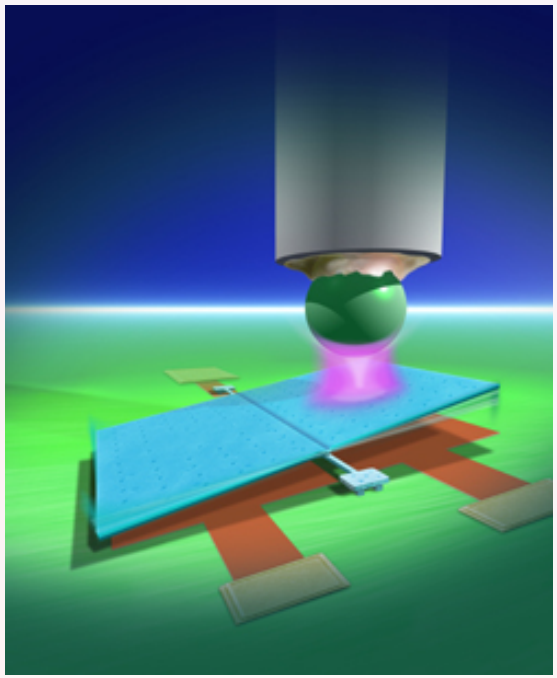


Nanotechnológiában: a Casimir erő sok esetben domináns!

Kísérletek

Lamoreaux (1996) után számos más mérés





Nanotechnológiában: a Casimir erő sok esetben domináns!

Casimir erő $\leftrightarrow$ nullponti energia?

Rejtély: ha elfogadjuk a zérómódusokat, akkor a vákuumban **nagyon nagy** energiasűrűség van.

Realisztikusan: a kvantumtérelmélet (Standard Modell) biztos igaz kb. 10^3 GeV energiáig. Ha $\Lambda \sim 1$ TeV:

$$\frac{E}{V} \sim 10^{47}\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3}$$

Ha $\Lambda = M_{\mathrm{Planck}} \sim 10^{19}$ GeV (kvantumgravitáció!) akkor pedig

$$\frac{E}{V} \sim 10^{110}\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3}$$

Hogyan lesz ebből egy ennyire kicsiny effektus?

Casimir erő $\leftrightarrow$ nullponti energia?

Rejtély: ha elfogadjuk a zérómódusokat, akkor a vákuumban **nagyon nagy** energiasűrűség van.
Realisztikusan: a kvantumtérelmélet (Standard Modell) biztos igaz kb. 10^3 GeV energiáig. Ha $\Lambda \sim 1$ TeV:

$$\frac{E}{V} \sim 10^{47}\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3}$$

Ha $\Lambda = M_{\mathrm{Planck}} \sim 10^{19}$ GeV (kvantumgravitáció!) akkor pedig

$$\frac{E}{V} \sim 10^{110}\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3}$$

Hogyan lesz ebből egy ennyire kicsiny effektus?

Casimir erő $\leftrightarrow$ nullponti energia?

Rejtély: ha elfogadjuk a zérómódusokat, akkor a vákuumban **nagyon nagy** energiasűrűség van.
Realisztikusan: a kvantumtérelmélet (Standard Modell) biztos igaz kb. 10^3 GeV energiáig. Ha $\Lambda \sim 1$ TeV:

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

Ha $\Lambda = M_{\mathrm{Planck}} \sim 10^{19}$ GeV (kvantumgravitáció!) akkor pedig

$$\frac{E}{V} \sim 10^{110} \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3}$$

Hogyan lesz ebből egy ennyire kicsiny effektus?

Casimir erő $\leftrightarrow$ nullponti energia?

Rejtély: ha elfogadjuk a zérómódusokat, akkor a vákuumban **nagyon nagy** energiasűrűség van.
Realisztikusan: a kvantumtérelmélet (Standard Modell) biztos igaz kb. 10^3 GeV energiáig. Ha $\Lambda \sim 1$ TeV:

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

Ha $\Lambda = M_{\mathrm{Planck}} \sim 10^{19}$ GeV (kvantumgravitáció!) akkor pedig

$$\frac{E}{V} \sim 10^{110} \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3}$$

Hogyan lesz ebből egy ennyire kicsiny effektus?

Mi az elektromágneses mező energiája?

Lorentz erő:

$$\vec{F} = e\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

a töltéseken **munkát végez**. A teljesítmény

$$P = e\vec{E} \cdot \vec{v} = -\int_V \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1}{2}\varepsilon_0 \vec{E}^2 + \frac{1}{2\mu_0}\vec{B}^2\right)$$

$\Uparrow$

Maxwell egyenletek

vagyis az elektromágneses mező térfogati **energiasűrűsége**

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \vec{E}^2 + \frac{1}{2\mu_0}\vec{B}^2$$

Mi az elektromágneses mező energiája?

Lorentz erő:

$$\vec{F} = e\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

a töltéseken **munkát végez**. A teljesítmény

$$P = e\vec{E} \cdot \vec{v} = -\int_V \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1}{2}\varepsilon_0 \vec{E}^2 + \frac{1}{2\mu_0}\vec{B}^2\right)$$

$\Uparrow$

Maxwell egyenletek

vagyis az elektromágneses mező térfogati **energiasűrűsége**

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \vec{E}^2 + \frac{1}{2\mu_0}\vec{B}^2$$

Mi az elektromágneses mező energiája?

Lorentz erő:

$$\vec{F} = e\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

a töltéseken **munkát végez**. A teljesítmény

$$P = e\vec{E} \cdot \vec{v} = -\int_V \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1}{2}\varepsilon_0 \vec{E}^2 + \frac{1}{2\mu_0}\vec{B}^2\right)$$

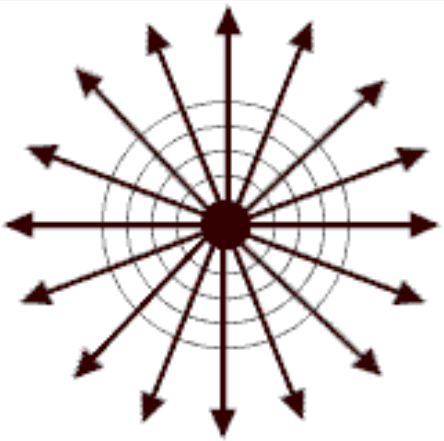
$\Uparrow$

Maxwell egyenletek

vagyis az elektromágneses mező térfogati **energiasűrűsége**

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \vec{E}^2 + \frac{1}{2\mu_0}\vec{B}^2$$

Egy ponttöltés energiája



$$E = \frac{e}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \Rightarrow \mathcal{E} = \frac{e^2}{32\pi^2\varepsilon_0 r^4}$$

Teljes mező energia:

$$\int_{r_0}^{\infty} 4\pi r^2 \mathcal{E}\, dr = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_0}$$

$r_0 = 0$: **divergens**! **Renormálás** alapötlete:

$$m_{\text{phys}} c^2 = m_0 c^2 + \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_0}$$

m_{phys}: a **fizikai tömeg**, csak ez mérhető, mivel **a mező nem kapcsolható ki!**

Az elektron sugara

$$m_{\text{phys}}c^2 = m_0c^2 + \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_0}$$

$m_0 = 0$: klasszikus elektronsugár $\rightarrow$ $r_0 \sim 10^{-15}m$

Jelenlegi kísérletek: $r_0 < 10^{-18}m$

QED sajátenergia:

$$m_0c^2 = m_{\text{phys}}c^2\left(1 - \frac{3\alpha}{4\pi}\log\left(\frac{\lambda_{\text{Compton}}^2}{r_0^2} + \frac{1}{2}\right) + O(\alpha^2)\right)$$

$$\lambda_{\text{Compton}} = 2.4263102175(33) \times 10^{-12}m$$

$r_0 \sim 10^{-18}m$: 5% korrekció.

Limit: $m_0 > 0$ $\rightarrow$ $r_0 > 10^{-136}m$

Az elektron sugara

$$m_{\text{phys}}c^2 = m_0c^2 + \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_0}$$

$m_0 = 0$: klasszikus elektronsugár $\rightarrow$ $r_0 \sim 10^{-15}m$

Jelenlegi kísérletek: $r_0 < 10^{-18}m$

QED sajátenergia:

$$m_0c^2 = m_{\text{phys}}c^2\left(1 - \frac{3\alpha}{4\pi}\log\left(\frac{\lambda_{\text{Compton}}^2}{r_0^2} + \frac{1}{2}\right) + O(\alpha^2)\right)$$

$$\lambda_{\text{Compton}} = 2.4263102175(33) \times 10^{-12}m$$

$r_0 \sim 10^{-18}m$: 5% korrekció.

Limit: $m_0 > 0$ $\rightarrow$ $r_0 > 10^{-136}m$

Az elektron sugara

$$m_{\text{phys}}c^2 = m_0c^2 + \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_0}$$

$m_0 = 0$: klasszikus elektronsugár $\rightarrow$ $r_0 \sim 10^{-15}m$

Jelenlegi kísérletek: $r_0 < 10^{-18}m$

QED sajátenergia:

$$m_0c^2 = m_{\text{phys}}c^2\left(1 - \frac{3\alpha}{4\pi}\log\left(\frac{\lambda_{\text{Compton}}^2}{r_0^2} + \frac{1}{2}\right) + O(\alpha^2)\right)$$

$$\lambda_{\text{Compton}} = 2.4263102175(33) \times 10^{-12}m$$

$r_0 \sim 10^{-18}m$: 5% korrekció.

Limit: $m_0 > 0$ $\rightarrow$ $r_0 > 10^{-136}m$

Az elektron sugara

$$m_{\text{phys}}c^2 = m_0c^2 + \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_0}$$

$m_0 = 0$: klasszikus elektronsugár $\rightarrow$ $r_0 \sim 10^{-15}m$

Jelenlegi kísérletek: $r_0 < 10^{-18}m$

QED sajátenergia:

$$m_0c^2 = m_{\text{phys}}c^2\left(1 - \frac{3\alpha}{4\pi}\log\left(\frac{\lambda_{\text{Compton}}^2}{r_0^2} + \frac{1}{2}\right) + O(\alpha^2)\right)$$

$$\lambda_{\text{Compton}} = 2.4263102175(33) \times 10^{-12}m$$

$r_0 \sim 10^{-18}m$: 5% korrekció.

Limit: $m_0 > 0$ $\rightarrow$ $r_0 > 10^{-136}m$

Az elektron sugara

$$m_{\text{phys}}c^2 = m_0c^2 + \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_0}$$

$m_0 = 0$: klasszikus elektronsugár $\rightarrow$ $r_0 \sim 10^{-15}m$

Jelenlegi kísérletek: $r_0 < 10^{-18}m$

QED sajátenergia:

$$m_0c^2 = m_{\text{phys}}c^2\left(1 - \frac{3\alpha}{4\pi}\log\left(\frac{\lambda_{\text{Compton}}^2}{r_0^2} + \frac{1}{2}\right) + O(\alpha^2)\right)$$

$$\lambda_{\text{Compton}} = 2.4263102175(33) \times 10^{-12}m$$

$r_0 \sim 10^{-18}m$: 5% korrekció.

Limit: $m_0 > 0 \rightarrow r_0 > 10^{-136}m$

Az elektron sugara

$$m_{\text{phys}}c^2 = m_0c^2 + \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_0}$$

$m_0 = 0$: klasszikus elektronsugár $\rightarrow$ $r_0 \sim 10^{-15}m$

Jelenlegi kísérletek: $r_0 < 10^{-18}m$

QED sajátenergia:

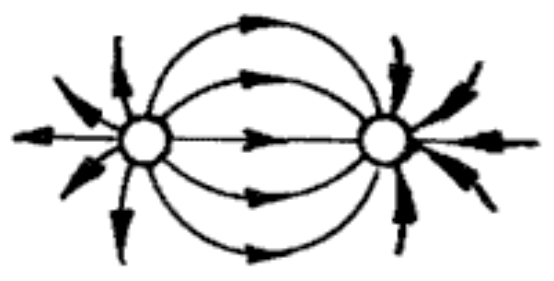
$$m_0c^2 = m_{\text{phys}}c^2\left(1 - \frac{3\alpha}{4\pi}\log\left(\frac{\lambda_{\text{Compton}}^2}{r_0^2} + \frac{1}{2}\right) + O(\alpha^2)\right)$$

$$\lambda_{\text{Compton}} = 2.4263102175(33) \times 10^{-12}m$$

$r_0 \sim 10^{-18}m$: 5% korrekció.

Limit: $m_0 > 0 \rightarrow r_0 > 10^{-136}m$

Két ponttöltés



$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad \rightarrow \quad \mathcal{E} = \tfrac{1}{2}\varepsilon_0 \vec{E}^2$$

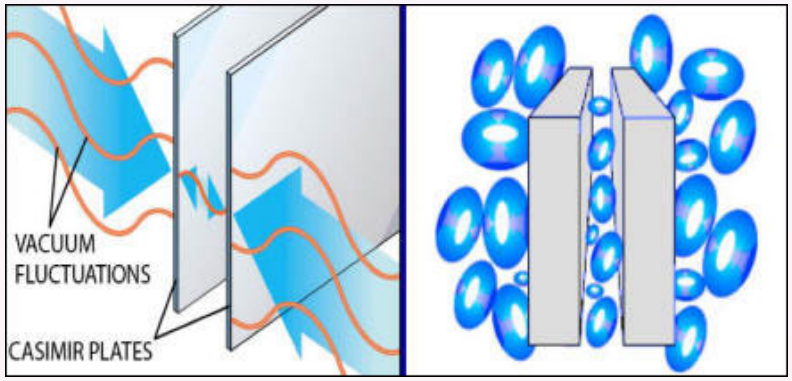
Két ponttöltés egymástól d távolságra

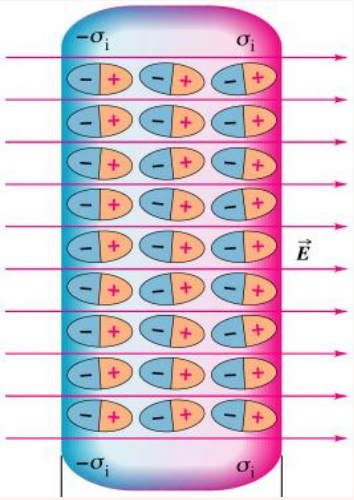
$$\mathrm{E}(d) = \int_V \mathcal{E}$$ továbbra is divergens, ha $r_0 = 0$

de: $\mathrm{E}(d_1) - \mathrm{E}(d_2) = \dfrac{e_1 e_2}{4\pi\epsilon_0}\left(\dfrac{1}{d_1} - \dfrac{1}{d_2}\right)$ véges!

Kölcsönhatási energia: $\mathrm{E}_{int}(d) = \dfrac{e_1 e_2}{4\pi\epsilon_0 d}$

Alkalmazás a Casimir effektusra





Kvantumos elektromágneses mező: vákuumfluktuációk

$\Downarrow$

fluktuáló indukált felületi töltések

Casimir kölcsönhatás

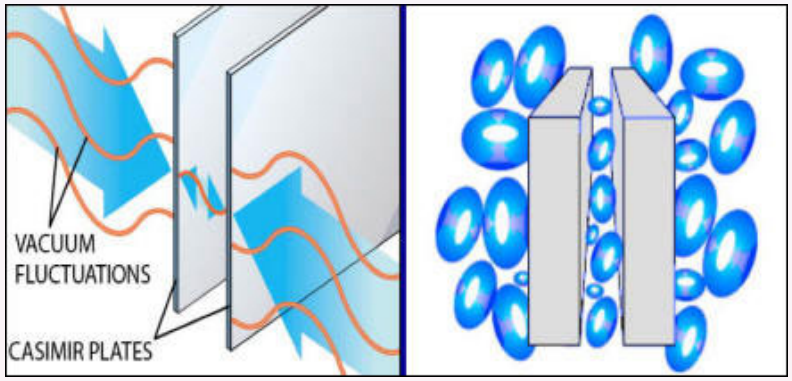
$\|$

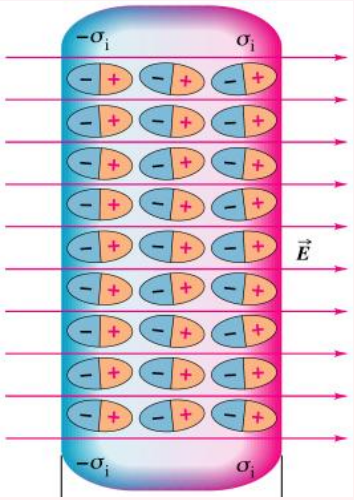
a fluktuáló felületi töltésekre kiátlagolt erő

Emig, Graham, Jaffe & Kardar (2007. július)

Tökéletesen véges, konvergens, fizikailag értelmes eredmény

Alkalmazás a Casimir effektusra





Kvantumos elektromágneses mező: vákuumfluktuációk

$\Downarrow$

fluktuáló indukált felületi töltések

Casimir kölcsönhatás

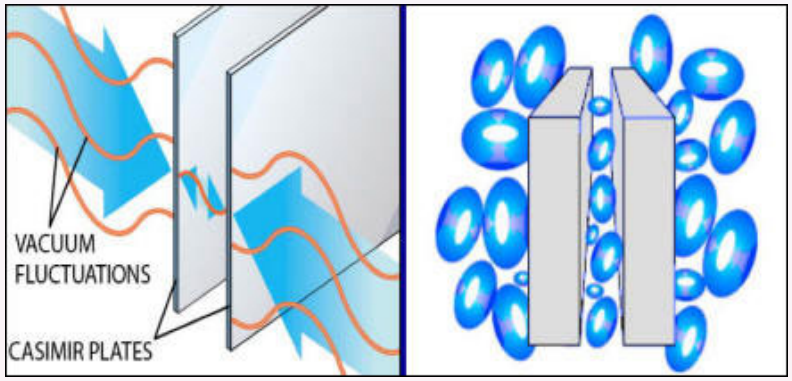
$\|$

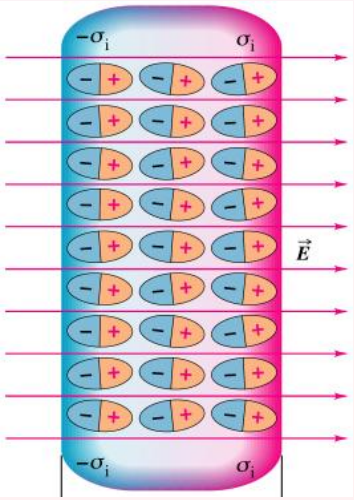
a fluktuáló felületi töltésekre kiátlagolt erő

Emig, Graham, Jaffe & Kardar (2007. július)

Tökéletesen véges, konvergens, fizikailag értelmes eredmény

Alkalmazás a Casimir effektusra





Kvantumos elektromágneses mező: vákuumfluktuációk

$\Downarrow$

fluktuáló indukált felületi töltések

Casimir kölcsönhatás

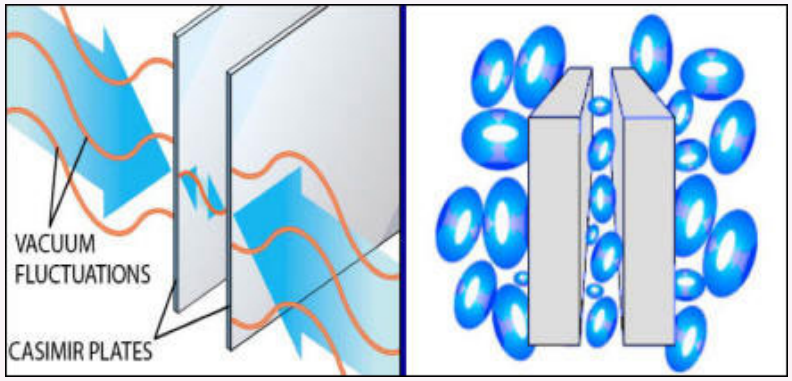
$\|$

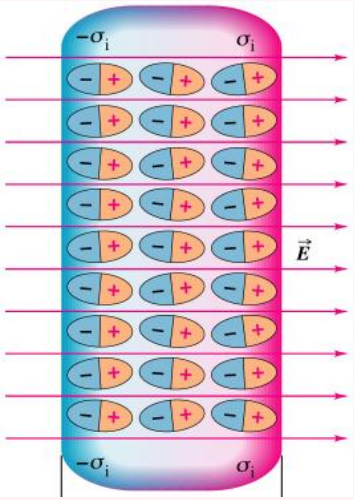
a fluktuáló felületi töltésekre kiátlagolt erő

Emig, Graham, Jaffe & Kardar (2007. július)

Tökéletesen véges, konvergens, fizikailag értelmes eredmény

Alkalmazás a Casimir effektusra





Kvantumos elektromágneses mező: vákuumfluktuációk

$\Downarrow$

fluktuáló indukált felületi töltések

Casimir kölcsönhatás

$\|$

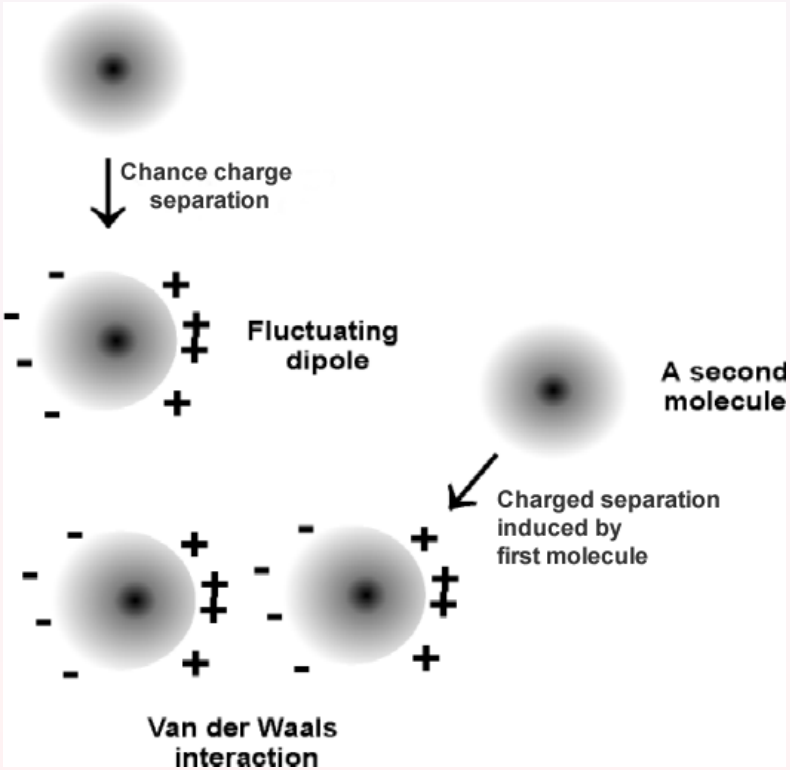
a fluktuáló felületi töltésekre kiátlagolt erő

Emig, Graham, Jaffe & Kardar (2007. július)

Tökéletesen véges, konvergens, fizikailag értelmes eredmény

Casimir effektus és van der Waals erő

van der Waals erő = fluktuáló dipólusok közti kölcsönhatás



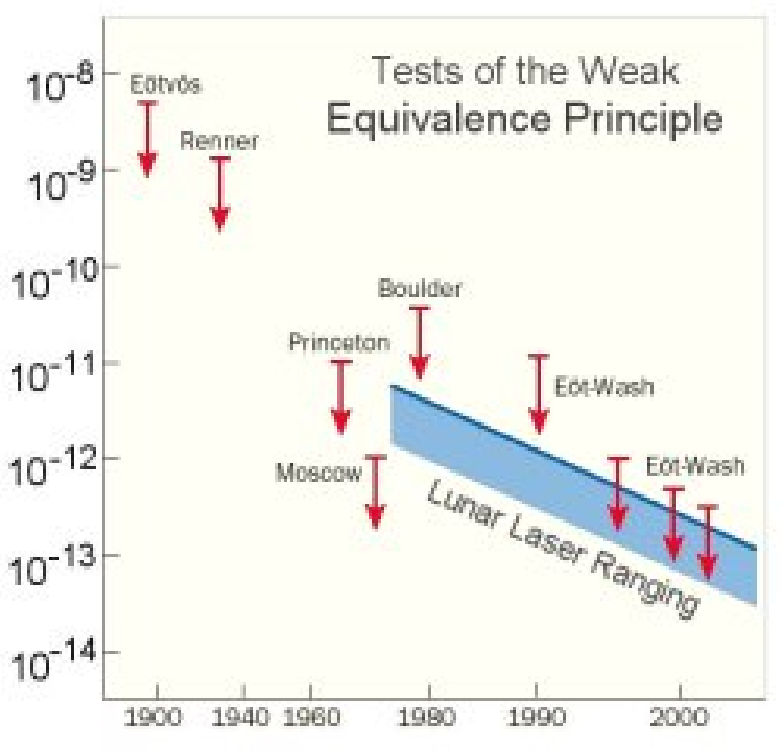
Casimir eredetileg ezt próbálta relativisztikusan megfogalmazni

Casimir effektus

||

vdW+retardálás+kvantált EM mező

Az ekvivalencia elv

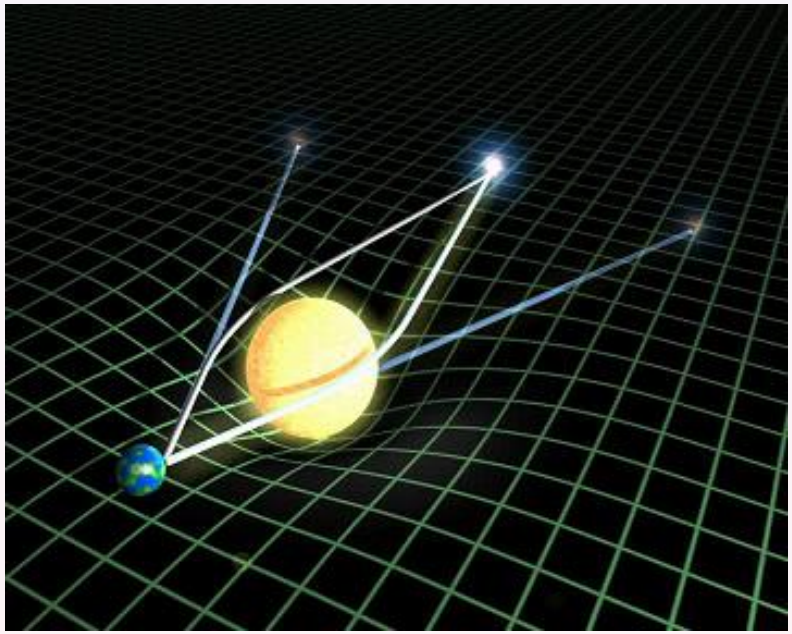


Kötési energia: tömegdefektus
Kémiai kötések: $\Delta m/m = 10^{-9}$

$\Downarrow$

EM energiára az ekvivalencia elv legalább 10^{-3} pontossággal érvényes!
Az elektromágneses energia és impulzus is gravitál!

Energia-impulzus és az Einstein egyenlet



$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R}_{\text{geometria}} = \underbrace{\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}}_{\text{anyag (energia-impulzus)}}$$

EM: $T_{00} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2$. Másrészt a nullponti rezgésekből

$$T_{00} = \frac{E}{V} \sim 10^{47} \times \left(\frac{\Lambda}{1\ \mathrm{TeV}}\right)^4 \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3}$$

óriási érték $\Rightarrow$ **nullponti rezgések nem gravitálhatnak!**

A kozmológiai konstans

Einstein „legnagyobb tévedése”:

$$
\begin{aligned}
R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} &= \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \\
T^{(\Lambda)}_{\mu\nu} &= -\frac{c^4 \Lambda}{8\pi G} g_{\mu\nu}
\end{aligned}
$$

Sík téridőben

$$
T_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \mathcal{E} & & & \\ & -p & & \\ & & -p & \\ & & & -p \end{pmatrix}
$$

$\Rightarrow$ **Λ olyan anyag, amire $p = -\mathcal{E}$.**
Ilyen lenne a nullponti rezgések energia-impulzus sűrűsége is!

A kozmológiai konstans

Einstein „legnagyobb tévedése”:

$$
\begin{aligned}
R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} &= \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \\
T^{(\Lambda)}_{\mu\nu} &= -\frac{c^4 \Lambda}{8\pi G} g_{\mu\nu}
\end{aligned}
$$

Sík téridőben

$$
T_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \mathcal{E} & & & \\ & -p & & \\ & & -p & \\ & & & -p \end{pmatrix}
$$

$\Rightarrow$ **Λ olyan anyag, amire $p = -\mathcal{E}$.**
Ilyen lenne a nullponti rezgések energia-impulzus sűrűsége is!

A kozmológiai konstans

Einstein „legnagyobb tévedése”:

$$
\begin{aligned}
R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} &= \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \\
T^{(\Lambda)}_{\mu\nu} &= -\frac{c^4 \Lambda}{8\pi G} g_{\mu\nu}
\end{aligned}
$$

Sík téridőben

$$
T_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \mathcal{E} & & & \\ & -p & & \\ & & -p & \\ & & & -p \end{pmatrix}
$$

$\Rightarrow$ **Λ olyan anyag, amire $p = -\mathcal{E}$.**
Ilyen lenne a nullponti rezgések energia-impulzus sűrűsége is!

FRW kozmológia

Nagy léptékben az Univerzum sík, de tágul:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

Friedman-Robertson-Walker kozmológia:

$$H(t)^2 = \frac{8\pi G}{3c^2}\mathcal{E}(t) \quad H(t) = \frac{\dot{a}}{a}$$

A tágulás sebessége nem állandó:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2}(\mathcal{E} + 3p)$$

Közönséges anyag: $\mathcal{E}, p > 0 \Rightarrow$ **a tágulásnak lassulnia kellene!**

FRW kozmológia

Nagy léptékben az Univerzum sík, de tágul:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

Friedman-Robertson-Walker kozmológia:

$$H(t)^2 = \frac{8\pi G}{3c^2}\mathcal{E}(t) \quad H(t) = \frac{\dot{a}}{a}$$

A tágulás sebessége nem állandó:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2}(\mathcal{E} + 3p)$$

Közönséges anyag: $\mathcal{E}, p > 0 \Rightarrow$ **a tágulásnak lassulnia kellene!**

FRW kozmológia

Nagy léptékben az Univerzum sík, de tágul:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

Friedman-Robertson-Walker kozmológia:

$$H(t)^2 = \frac{8\pi G}{3c^2}\mathcal{E}(t) \quad H(t) = \frac{\dot{a}}{a}$$

A tágulás sebessége nem állandó:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2}(\mathcal{E} + 3p)$$

Közönséges anyag: $\mathcal{E}, p > 0 \Rightarrow$ **a tágulásnak lassulnia kellene!**

FRW kozmológia

Nagy léptékben az Univerzum sík, de tágul:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

Friedman-Robertson-Walker kozmológia:

$$H(t)^2 = \frac{8\pi G}{3c^2}\mathcal{E}(t) \quad H(t) = \frac{\dot{a}}{a}$$

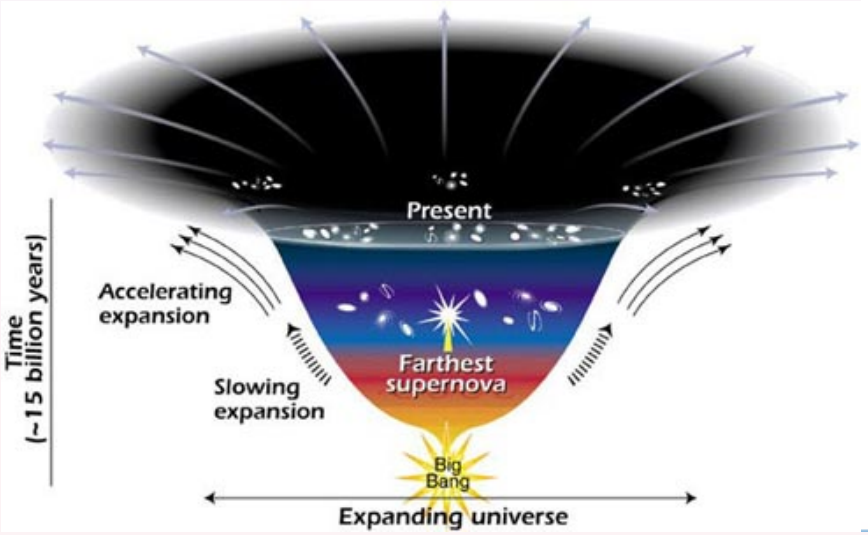
A tágulás sebessége nem állandó:

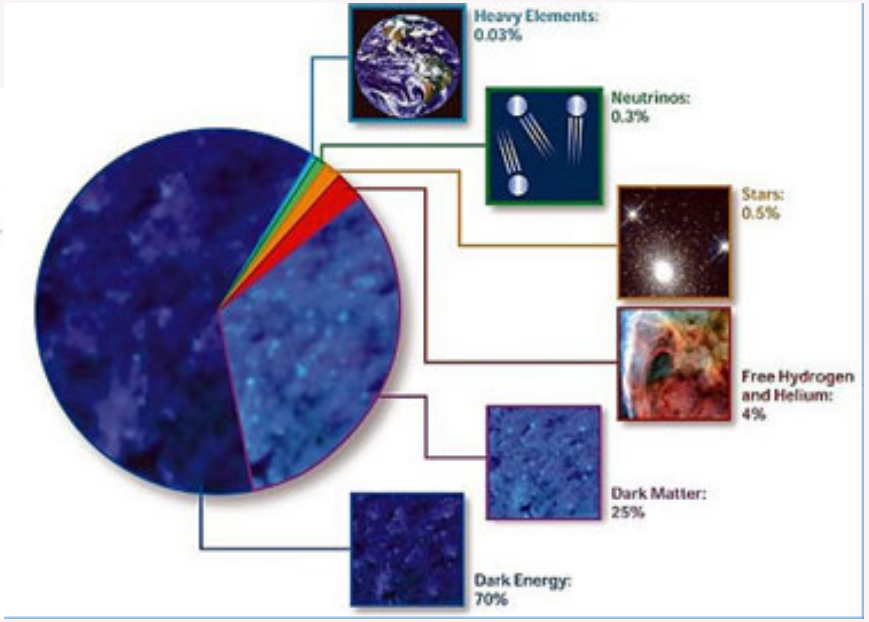
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2}(\mathcal{E} + 3p)$$

Közönséges anyag: $\mathcal{E}, p > 0 \Rightarrow$ **a tágulásnak lassulnia kellene!**

Sötét energia

Kozmológiai mérések: a tágulás gyorsul!





Sötét energia: $p = w\mathcal{E}$ és $w < -1/3$

Mérések: $\mathcal{E} \sim 5.4 \times 10^{-10} \dfrac{J}{m^3}$ $w = -1.00 \pm 0.05$

Mi lehet a sötét energia?

Nullponti rezgésekkel Λ energián levágva:

$$\mathcal{E} \sim 10^{47} \times \left(\frac{\Lambda}{1\,\mathrm{TeV}}\right)^4 \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3}$$

Mérések:

$$\mathcal{E} \sim 5.4 \times 10^{-10} \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3}$$

$\Rightarrow$ **nullponti rezgésekkel nem fog menni!**
Lehetne dinamikai effektus (pl. kvintesszencia), de $w = -1.0 \pm 0.05$ ezt egyre jobban kizárja.

Mi lehet a sötét energia?

Nullponti rezgésekkel Λ energián levágva:

$$\mathcal{E} \sim 10^{47} \times \left(\frac{\Lambda}{1\,\mathrm{TeV}}\right)^4 \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3}$$

Mérések:

$$\mathcal{E} \sim 5.4 \times 10^{-10} \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3}$$

$\Rightarrow$ **nullponti rezgésekkel nem fog menni!**
Lehetne dinamikai effektus (pl. kvintesszencia), de $w = -1.0 \pm 0.05$ ezt egyre jobban kizárja.

Mi lehet a sötét energia?

Nullponti rezgésekkel Λ energián levágva:

$$\mathcal{E} \sim 10^{47} \times \left(\frac{\Lambda}{1\,\mathrm{TeV}}\right)^4 \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3}$$

Mérések:

$$\mathcal{E} \sim 5.4 \times 10^{-10} \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3}$$

$\Rightarrow$ **nullponti rezgésekkel nem fog menni!**

Lehetne dinamikai effektus (pl. kvintesszencia), de $w = -1.0 \pm 0.05$ ezt egyre jobban kizárja.

Mi lehet a sötét energia?

Nullponti rezgésekkel Λ energián levágva:

$$\mathcal{E} \sim 10^{47} \times \left(\frac{\Lambda}{1\,\mathrm{TeV}}\right)^4 \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3}$$

Mérések:

$$\mathcal{E} \sim 5.4 \times 10^{-10} \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3}$$

$\Rightarrow$ **nullponti rezgésekkel nem fog menni!**
Lehetne dinamikai effektus (pl. kvintesszencia), de $w = -1.0 \pm 0.05$ ezt egyre jobban kizárja.

Összegzés

1. Casimir effektus: a kvantált elektromágneses mező által indukált fluktuáló töltések kölcsönhatása
2.
3.
4.
5.
6.
7.

Összegzés

1. Casimir effektus: a kvantált elektromágneses mező által indukált fluktuáló töltések kölcsönhatása
2. A kvantumelektrodinamika vákuuma polarizálható médium ("éter")
3.
4.
5.
6.
7.

Összegzés

1. Casimir effektus: a kvantált elektromágneses mező által indukált fluktuáló töltések kölcsönhatása
2. A kvantumelektrodinamika vákuuma polarizálható médium ("éter")
3. A kvantumelektrodinamika **makroszkopikus** jóslata
4.
5.
6.
7.

Összegzés

1. Casimir effektus: a kvantált elektromágneses mező által indukált fluktuáló töltések kölcsönhatása
2. A kvantumelektrodinamika vákuuma polarizálható médium ("éter")
3. A kvantumelektrodinamika **makroszkopikus** jóslata
4. Kísérletileg kimérhető, de:
5.
6.
7.

Összegzés

1. Casimir effektus: a kvantált elektromágneses mező által indukált fluktuáló töltések kölcsönhatása
2. A kvantumelektrodinamika vákuuma polarizálható médium ("éter")
3. A kvantumelektrodinamika **makroszkopikus** jóslata
4. Kísérletileg kimérhető, de:
5. Casimir erő léte $\not\Rightarrow$ vákuumbeli nullponti rezgések energiája valóságos (ld. ZPE áltudomány)
6.
7.

Összegzés

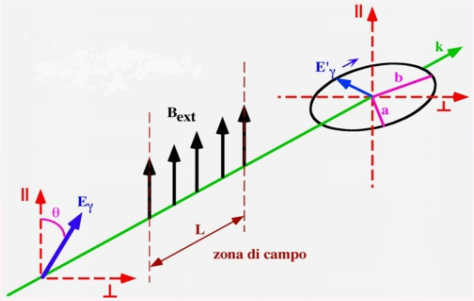
1. Casimir effektus: a kvantált elektromágneses mező által indukált fluktuáló töltések kölcsönhatása
2. A kvantumelektrodinamika vákuuma polarizálható médium ("éter")
3. A kvantumelektrodinamika **makroszkopikus** jóslata
4. Kísérletileg kimérhető, de:
5. Casimir erő léte $\not\Rightarrow$ vákuumbeli nullponti rezgések energiája valóságos (ld. ZPE áltudomány)
6. A nullponti rezgések **nem gravitálhatnak** (túl nagy effektus lenne)
7.

Összegzés

1. Casimir effektus: a kvantált elektromágneses mező által indukált fluktuáló töltések kölcsönhatása
2. A kvantumelektrodinamika vákuuma polarizálható médium ("éter")
3. A kvantumelektrodinamika **makroszkopikus** jóslata
4. Kísérletileg kimérhető, de:
5. Casimir erő léte $\not\Rightarrow$ vákuumbeli nullponti rezgések energiája valóságos (ld. ZPE áltudomány)
6. A nullponti rezgések **nem gravitálhatnak** (túl nagy effektus lenne)
7. Ennek ellenére: sötét energia $\Rightarrow$ **az üres térnek mégis csak van energiája**

Nyitott kérdések

1. Más makroszkopikus QED effektusok: **erős külső elektromágneses mezők**



$$\Delta n \sim 4 \times 10^{-24} (B_{\text{ext}}/1\ \text{Tesla})^2$$

Kettős törés vákuumban: PVLAS, magnetárok

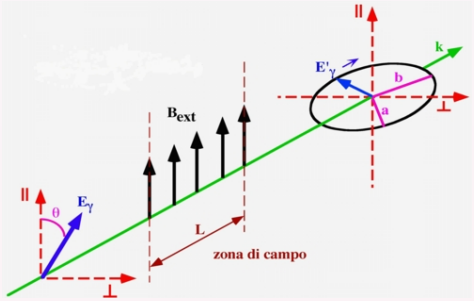
2.

3.

4.

Nyitott kérdések

1. Más makroszkopikus QED effektusok: **erős külső elektromágneses mezők**



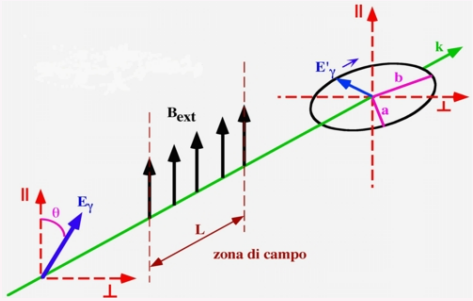
$$\Delta n \sim 4 \times 10^{-24} (B_{\text{ext}}/1\ \text{Tesla})^2$$

Kettős törés vákuumban: PVLAS, magnetárok

2. Casimir effektus pontosabb kimérése (**geometriafüggés**)
3.
4.

Nyitott kérdések

1. Más makroszkopikus QED effektusok: **erős külső elektromágneses mezők**



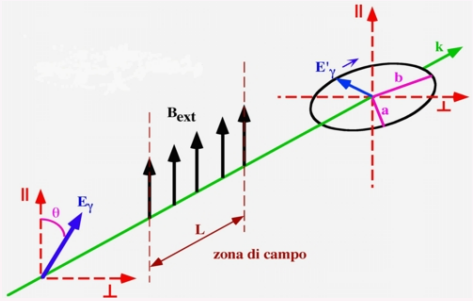
$$\Delta n \sim 4 \times 10^{-24} (B_{\text{ext}}/1\ \text{Tesla})^2$$

Kettős törés vákuumban: PVLAS, magnetárok

2. Casimir effektus pontosabb kimérése (**geometriafüggés**)
3. Casimir energiasűrűség és gravitáció, avagy: **hogyan esik a Casimir energia?**
4.

Nyitott kérdések

1. Más makroszkopikus QED effektusok: **erős külső elektromágneses mezők**



$$\Delta n \sim 4 \times 10^{-24} (B_{\text{ext}}/1\ \text{Tesla})^2$$

Kettős törés vákuumban: PVLAS, magnetárok

2. Casimir effektus pontosabb kimérése (**geometriafüggés**)
3. Casimir energiasűrűség és gravitáció, avagy: **hogyan esik a Casimir energia?**
4. **Mi a sötét energia?** Csak egy extra paraméter vagy új fizika?