

# A finomszerkezeti állandó és változásai

Nagy Szilvia



Széchenyi István Egyetem

Győr

Távközlési Tanszék



# Tartalom

- Előzmények
- Sommerfeld és a röntgenvonalak finomszerkezete
- XX. század első fele
- QED
- térelmélet és renormalizáció
- mérési módszerek
- matematikai formulák
- az állandó változási gyorsasága



# Előzmények

## • Planck

- fekete test sugárzás - természetes mértékek rendszere: dimenziómentes konstanskombinációk
- $h$  és  $e^2/c$  egysége azonos
- Einstein: egyenlők?
- Jeans

$$\frac{h}{2\pi} \stackrel{?}{=} \frac{(4\pi e)^2}{c}$$

$$(\alpha^{-1} \approx 158)$$

M. Planck, "Über irreversible Strahlungsvorgänge. 5. Mitteilung," Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte (1899), 440–480.

A. Einstein, "Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblem," Physikalische Zeitschrift 10 (1909), 185–193

J. Jeans, "Discussion on radiation," Report, British Association of the Advancement of Science (1913), 376–386



# Előzmények

- Haas: H (Thomson-szerű) 
$$C = \frac{hc}{e^2} = 2\pi\sqrt{\frac{2a}{3r}}$$
  
( $\approx 2\pi \cdot 310$ )

## ● Bohr

- a pályasebességben 
$$v_1 = \frac{2\pi e^2}{h}$$

de sosem használta a  $v_1 = \alpha \cdot c$  kifejezést

- csak későbbi fejtegetések hozták Bohr mennyiségeit  $\alpha$ -val kapcsolatba

A. E. Haas, "Über die elektrodynamische Bedeutung des Planck'schen Strahlungsgesetzes und über eine neue Bestimmung des elektrischen Elementarquantums und der Dimensionen des Wasserstoffatoms," Akademie der Wissenschaften, Wien, Sitzungsberichte 119 (1910), 119–144.<sup>4</sup>



# Előzmények

## • Bohr

- H finomszerkezet: tömeg sebességfüggését, elliptikus pályákat figyelembe véve javul az eredmény ( $\alpha/8$  egység, de nem kimondva)

## • Lewis és Adams

- „ultimate rational units”, Stefan-törvényből  
 $\varepsilon = aT^4$ , és  $ae^{*6}/k^4 \approx 1$   
( $\alpha^{-1} = 137,348$ )

N. Bohr, “On the series spectrum of hydrogen and the structure of the atom,” *Phil. Mag.* 29 (1915), 332–335.

G. N. Lewis, E. Q. Adams, “A theory of ultimate rational units; numerical relations between elementary charge Wirkungsquantum, constant of Stefan’s law,” *Phys. Rev.* 3 (1914), 92–102.



# Előzmények

- Allen:  $\alpha^2$ -re,

$$e \approx 9\alpha^2 \cdot 10^{-6}, \quad \frac{e}{m} \approx \alpha^2 \cdot 10^{22}, \quad \frac{m}{M} \approx 10\alpha^2$$

- Lunn: 5 független invariáns közül az egyik

$$\left( \alpha = \sqrt[3]{\frac{15}{\pi^8 2^{12}}} = 7,281 \cdot 10^{-3} \right)$$

Összefüggés  $G = \frac{\alpha^{17}}{2^{16} \pi^6}$

H. S. Allen, "Numerical relations between electronic and atomic constants," Proc. Phys. Soc. (London) 27 (1915), 425–431.

A. C. Lunn, "Atomic constants and dimensional invariants," Phys. Rev. 20 (1922), 1–14.



# Sommerfeld és a röntgenvonalak

- 1915-16, Sommerfeld a relativisztikus tömegváltozást hozzáadta a Bohr-modellhez

$$\frac{W(n, k)}{m_0 c^2} = \left\{ 1 + \frac{\alpha^2 Z^2}{\left[ (n - k) + \sqrt{k^2 - \alpha^2 Z^2} \right]^2} \right\}^{-1}$$

- eredeti finomszerkezeti paraméter:  $\alpha' = \left( \frac{\pi e^2}{ch} \right)^2$   
ehhez 75,076-os inverz
- finomszerkezeti állandó  $\alpha = \frac{2\pi e^2}{ch}$

A. Sommerfeld, "Die Feinstruktur der Wasserstoff- und der Wasserstoff-ähnlichen Linien," Akademie der Wissenschaften, München, Sitzungsberichte (1915), 459–500.

A. Sommerfeld, "Zur Quantentheorie der Spektrallinien," Annalen der Physik 51 (1916), 1–94.



# Sommerfeld és a röntgenvonalak

## • 1915-16, Sommerfeld

- finomszerkezeti állandó  $\alpha = \frac{2\pi e^2}{ch}$
- motiváció: két „Kepler-jellegű” pálya impulzusmomentum-aránya?:

$$p_0 = \frac{e^2}{c}, \quad p_1 = \frac{h}{2\pi}$$

- Paschen méréseivel

$$\alpha = (7,259 \pm 0,005) \cdot 10^{-3}, \quad \alpha^{-1} = 137,76$$





# XX. század első fele

## • Reakciók:

- Einstein (1916): az egyik legszebb fizikai élmény, csak vele válik a Bohr ötlete teljesen meggyőzővé
- Planck (1920): varázssformula, akkora eredmény, mint mikor LeVerrier megjósolta a Neptun létezését
- Haas... (1920-25): Paschen mérése nem csak Bohr és Sommerfeld elméletének, de a relativitáselméletnek a sikerességét bizonyítja
- A Weimari Köztársaság nem ismerte el

Planck, *Vorträge und Erinnerungen* Darmstadt:Wissenschaftlicher Buchgesellschaft 1969  
A. E. Haas, *Atomtheorie in Elementare Darstellung*, Berlin: Walther de Gruyter, 1924  
L. Glaser, "Die Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante als prinzipielle Frage der Physik,"  
*Zeitschrift für die gesamte Naturwissenschaft* 5 (1939), 289–331.



# XX. század első fele

## • Reakciók:

- Sommerfeld: nem csak hasznos állandó, az elektromágnesesség, a relativitás és a kvantumelmélet egységét sugallja:  $e, h, c$
- szinte egész szám
- What we are nowadays hearing in the language of spectra, is a true music of the spheres within the atom, chords of integral relationships, an order and harmony that becomes ever more perfect in spite of the manifold variety... All integral laws of spectral lines and of atomic theory spring originally from the quantum theory. It is the mysterious organon on which Nature plays her music of the spectra, and according to the rhythm of which she regulates the structure of the atoms and nuclei.



# XX. század első fele

## • Reakciók: Pauli

- a számértékének elméleti interpretációja az atomfizika egyik legfontosabb megoldatlan problémája
- a kvantummechanika újraformálása csak azáltal nyerne értelmet, ha a finomszerkezeti állandót,  $e$  dimenzió nélküli számot interpretálni tudná
- *"From the point of view of logic, my report on 'Exclusion principle and quantum mechanics' has no conclusion. I believe that it will only be possible to write the conclusion if a theory will be established which will determine the value of the fine structure constant and will thus explain the atomistic structure of electricity, which is such an essential quality of all atomic sources of electric fields actually occurring in nature."*

W. Pauli, "Sommerfeld's Beiträge zur Quantentheorie," Die Naturwissenschaften 35 (1948), 129–132.

W. Pauli, "Exclusion Principle and Quantum Mechanics," Nobel Prize Lecture, Stockholm, 1946. december 13.



# XX. század első fele

## • Reakciók:

- $\alpha$  kicsi voltának szerepét a nemrelativisztikus atomfizika sikerében többen méltatták (Heisenberg, Pauli, Dirac)
- általában tisztán a spektroszkópiához rendelték, de
- Schrödinger (1922): általános relativitáshoz köti
- Rice (1925): a kozmikus egységhez köti

E. Schrödinger, "Über eine bemerkenswerte Eigenschaft der Quantenbahnen eines einzelnen Elektrons," *Z. Physik* 12 (1922), 13–23

J. Rice, "On Eddington's natural unit of the field and possible relations between it and the universal constants of physics," *Philos. Mag.* 49 (1925), 457–463.

A. S. Eddington, *The Mathematical Theory of Relativity* (Cambridge: Cambridge University Press, 1923).

J. Rice, "On Eddington's natural unit of the field," *Philos. Mag.* 49 (1925), 1056–1057.



# QED

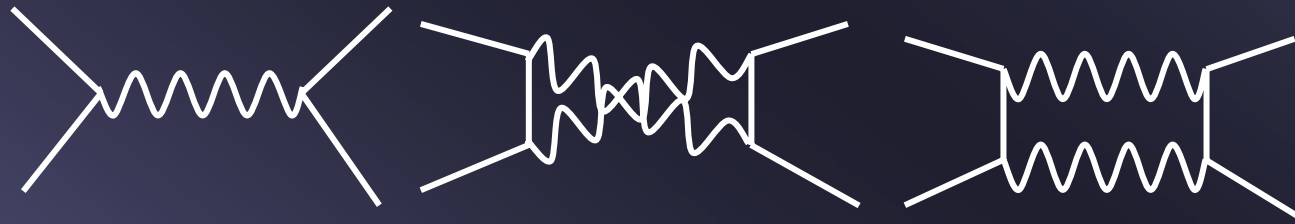
- Dirac-egyenlet (1928)
  - eredetileg nem említi  $\alpha$ -t
  - határértékben kiadja a Sommerfeld-féle finomszerkezetet
- Heisenberg—Pauli-féle relativisztikus kvantum térelmélete (1929-30)
  - még tele van divergenciákkal
  - $\alpha$ -ra irányította a figyelmet, meg akarták érteni értékét



# QED

- az elektromágneses kölcsönhatás erősségét jellemzi, csatolási állandó

- elektron szórás: egy (több) virtuális foton cseréje a szóróközponttal



$$Ze^2 \propto Z\sqrt{\alpha}$$

- virtuális fotonfelhő – leptonok mágneses momentumának anomáliája

$$\frac{g-2}{2} = \frac{\alpha}{2\pi} + \mathcal{O}(\alpha^2)$$

- vákuum polarizációja (műonikus!)



# QED

- Nagy és kisenergiás számítások, magas rendig
  - a mérésekkel való összehasonlítással alkalmasak a meghatározására

“It has been a mystery ever since it was discovered more than fifty years ago, and all good theoretical physicists put this number up on their wall and worry about it.”

QED: The Strange Theory of Light and Matter, Princeton University Press 1985, p. 129.



# Térelmélet és renormalizáció

- Renormalizáció – a diagram-összegzések végtelen részeinek kivonása, így véges eredmény
  - ekkor a csatolási állandó is energiafüggővé válik, nagy energián konvergál
- a gravitáció és a többi alap erőtípus összevonásakor (vsz.) szükséges dimenziók időfejlődése a csatolási állandók időbeli változásában testesül meg





# Mérési módszerek

- H, He finomszerkezet és hiperfinom-szerkezet
- Josephson-effektus (1967)
- kvantum Hall-effektus (1980)
- $e^-$  és  $e^+$  mágneses momentumának anomáliája
- lassú neutronok de-Broglie-hullámhossza
- $h/m_A$  mérés
- egyelektron alagúteffektus

Parker W H, Taylor B N and Langenberg D N 1967 *Phys. Rev. Lett.* **18** 287

von Klitzing K, Dorda G and Pepper M 1980 *Phys. Rev. Lett.* 45 494

Van Dyck R S Jr, Schwinger P B and Dehmelt H G 1987 *Phys. Rev. Lett.* 59 26

Krueger E, Nistler W and Weirauch W 1995 *Metrologia* 32 117

Weiss D S, Young B C and Chu S 1993 *Phys. Rev. Lett.* 70 2706

Martinis J M, Nahum M and Jensen H D 1994 *Phys. Rev. Lett.* 72 904



# Mérési módszerek

- elektron mágneses momentuma
  - QED,  $g$  mérés kvantum-ugrás spektroszkópia

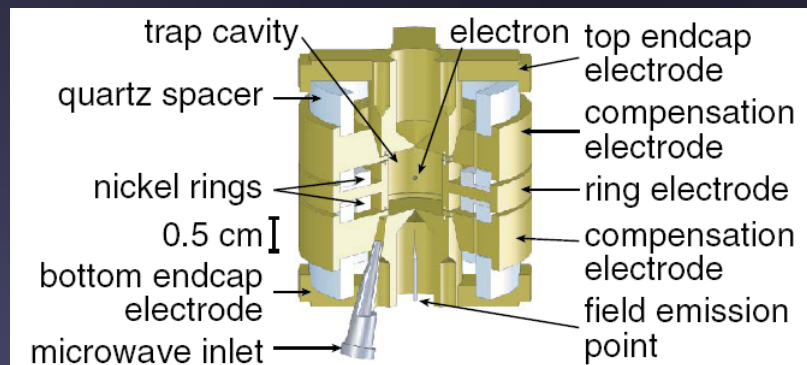
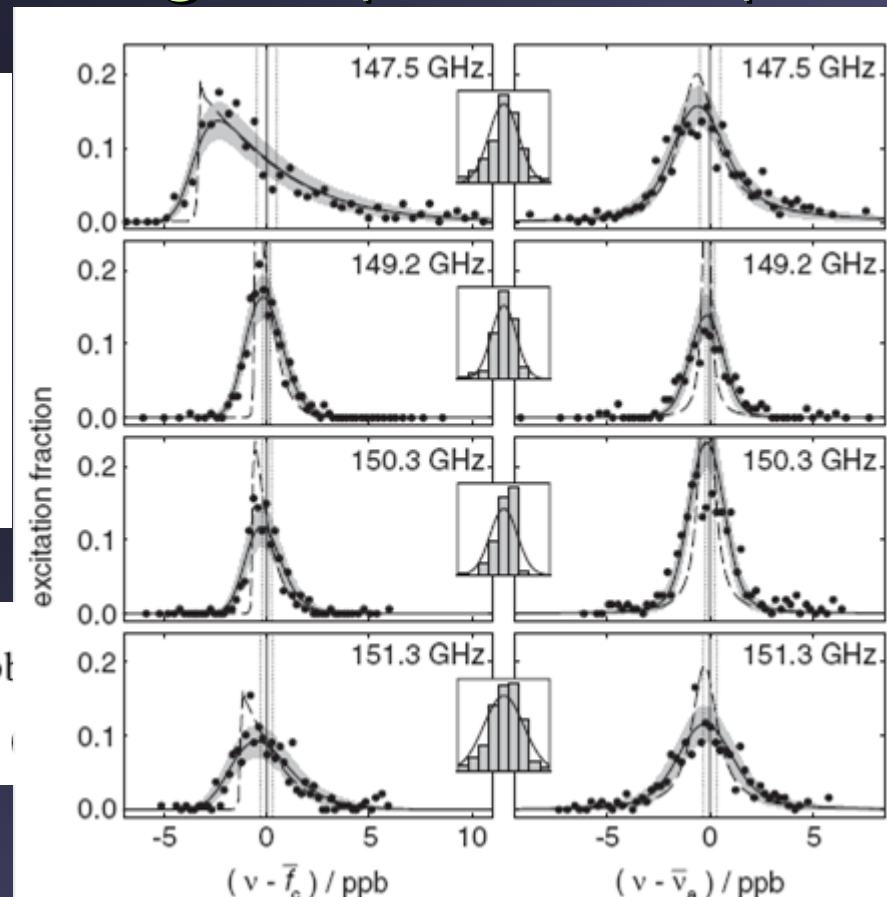


FIG. 2 (color). Cylindrical Penning trap cavity used to confine a single electron and inhibit spontaneous emission.

$$\alpha^{-1} = 137.035\,999\,084\,(33)\,(39) \quad [0.24 \text{ ppb}][0.28 \text{ ppt}]$$

$$= 137.035\,999\,084\,(51) \quad [0.37 \text{ ppb}].$$





# Mérési módszerek

|                         |                       |              |
|-------------------------|-----------------------|--------------|
| $\alpha^{-1}_{h/mA}$    | = 137,036 011 28(524) | (0:039 ppm)  |
| $\alpha^{-1}_{acJ}$     | = 137,035 9770(77)    | (0:056 ppm)  |
| $\alpha^{-1}_{qH}$      | = 137,036 0037(27)    | (0:020 ppm)  |
| $\alpha^{-1}_{ae}$      | = 137,035 999 93(52)  | (0:0038 ppm) |
| $\alpha^{-1}_{\mu hfs}$ | = 137,035 9940(184)   | (0:134 ppm)  |

Parker W H, Taylor B N and Langenberg D N 1967 *Phys. Rev. Lett.* **18** 287  
von Klitzing K, Dorda G and Pepper M 1980 *Phys. Rev. Lett.* 45 494  
Van Dyck R S Jr, Schwinger P B and Dehmelt H G 1987 *Phys. Rev. Lett.* 59 26  
Krueger E, Nistler W and Weirauch W 1995 *Metrologia* 32 117  
Weiss D S, Young B C and Chu S 1993 *Phys. Rev. Lett.* 70 2706  
Martinis J M, Nahum M and Jensen H D 1994 *Phys. Rev. Lett.* 72 904



# Matematikai formulák

## • Lunn

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{15}{\pi^8 2^{12}}} = 7,281 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{7}{\pi^6}, \quad \frac{\pi}{2^4 3^3}, \quad \frac{32}{45\pi^4}, \quad \frac{3^3}{5^3 \pi^2}$$

## • Eddington

- nem  $\alpha$ -t, hanem inverzét kezdi nézni
- a numerikus érték matematikai elérése fizikai magyarázatot hordozhat

A. C. Lunn, "Atomic constants and dimensional invariants," Phys. Rev. 20 (1922), 1–14.

A. S. Eddington, "On the value of the cosmical constant," Proceedings of the Royal Society A 133 (1931), 605–615, p. 606.

A. S. Eddington, "The charge of an electron," Proceedings of the Royal Society A 122 (1929), 358–369, p. 365.



# Matematikai formulák

## • Eddington nyomán

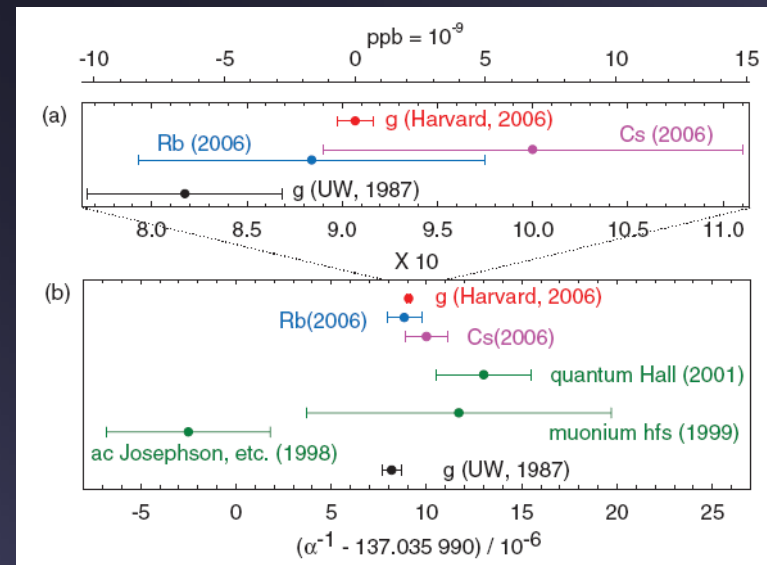
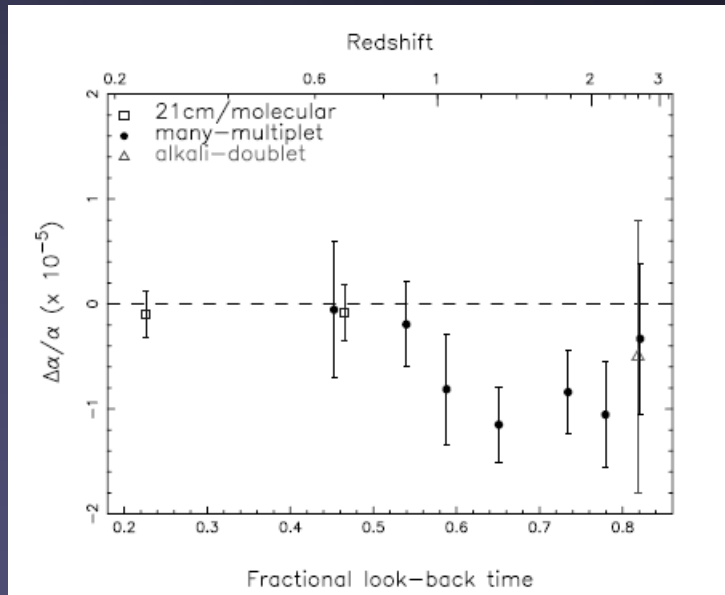
|                        |      |                       |                      |
|------------------------|------|-----------------------|----------------------|
| R. Birge               | 1929 | $137.29 \pm 0.11$     | Nature 123, 318      |
| W. Bond                | 1930 | $136.94 \pm 0.15$     | PrPhysS 44, 374      |
| R. Birge               | 1932 | $137.305 \pm 0.005$   | PR 40, 228           |
| F. Spedding et al.     | 1935 | $137.04 \pm 0.02$     | PR 47, 38            |
| R. Birge               | 1941 | $137.030 \pm 0.016$   | RepProgPhys<br>8, 90 |
| U. Stille              | 1943 | $137.033 \pm 0.092$   | ZP 121, 133          |
| J. DuMond, E. Cohen    | 1949 | $137.027 \pm 0.007$   | RMP 21, 651          |
| H. Bethe, C. Longmire  | 1949 | $137.041 \pm 0.005$   | PR 75, 306           |
| J. Bearden, J. Thomsen | 1957 | $137.0371 \pm 0.0005$ | NC 5, 267            |



# Az állandó változási gyorsasága

## Kozmikus háttérsugárzás

- kvazárok, gázfelhők alkáli dubletjei
- mikrohullámú (H)





# Az állandó változási gyorsasága

## Kozmikus háttérsugárzás

- kvazárok, gázfelhők alkáli dubletjei
- mikrohullámú (H)

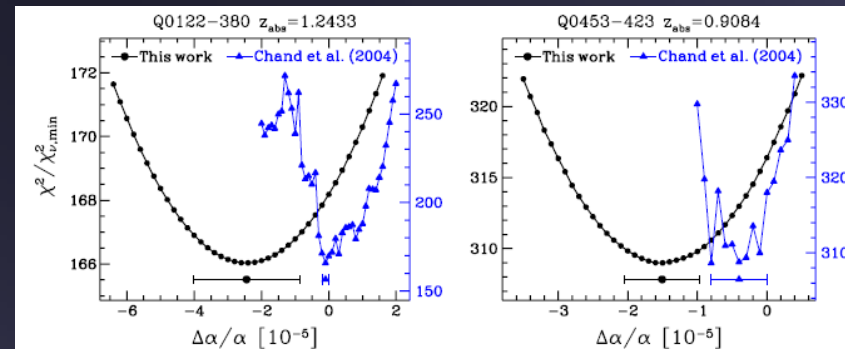
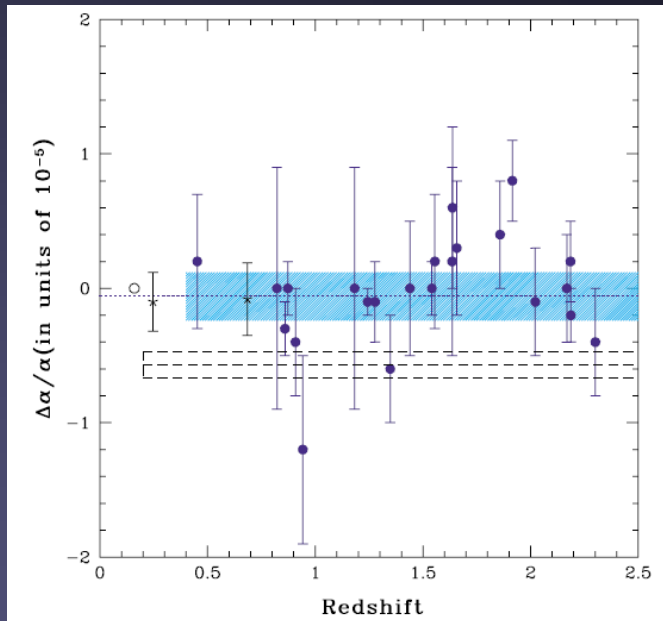
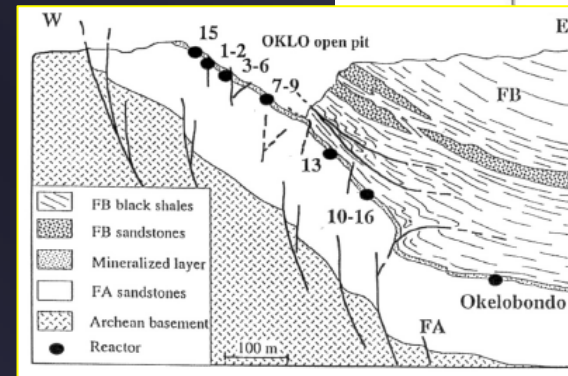
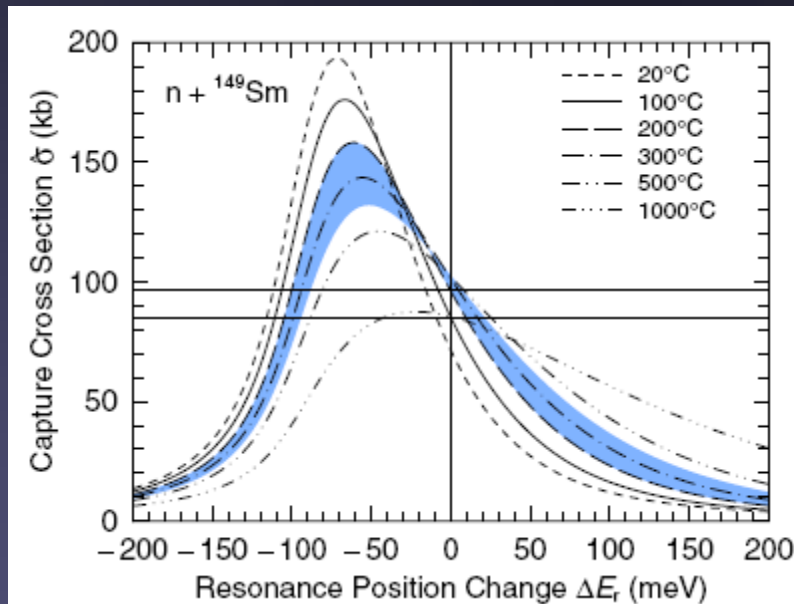
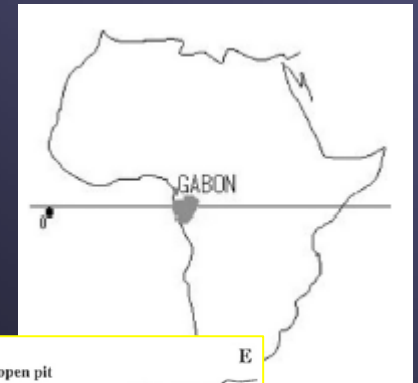
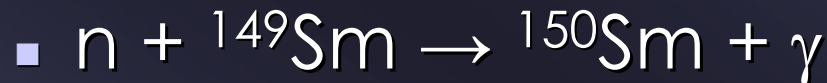


FIG. 1 (color online). Example  $\chi^2$  curves from our minimization (circles) and that of [1] (triangles). Fluctuations in the latter indicate failings in the minimization. Points and error bars indicate best-fitting values and  $1-\sigma$  uncertainties; for our curves  $\Delta\alpha/\alpha$  was a free parameter. Note the different vertical scales: left-hand scales for our curves, right-hand scales for [1].



# Az állandó változási gyorsasága

## Oklo „természetes atomreaktor”



$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{\Delta E_r}{\mathcal{M}_c} = \begin{cases} (-0.8 \pm 1.0) \times 10^{-8}, & \text{null, upper bound} \\ (0.88 \pm 0.07) \times 10^{-7}, & \text{non-null} \end{cases}$$

Divide by  $-2 \times 10^9$  yr to get

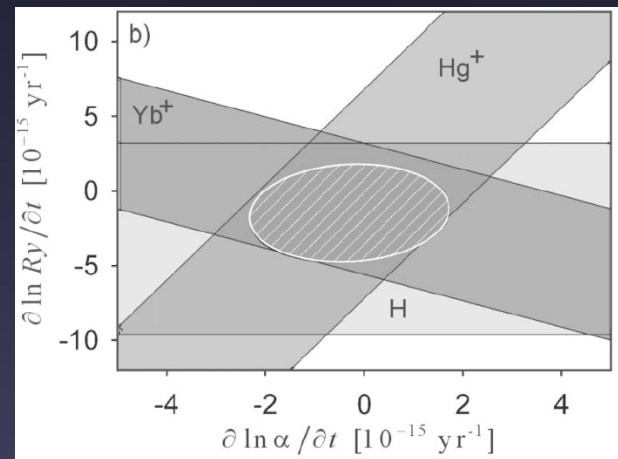
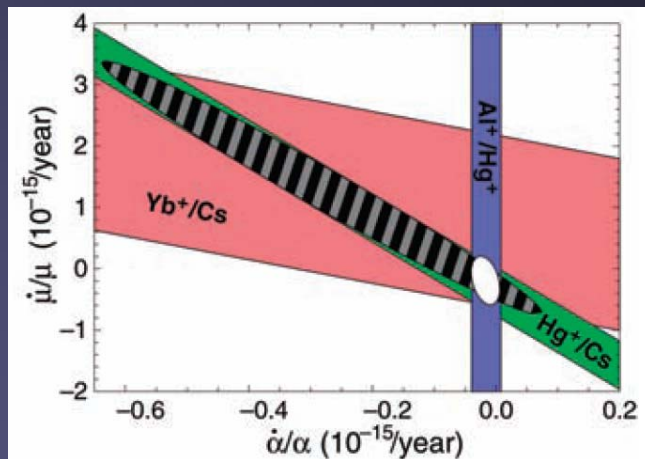
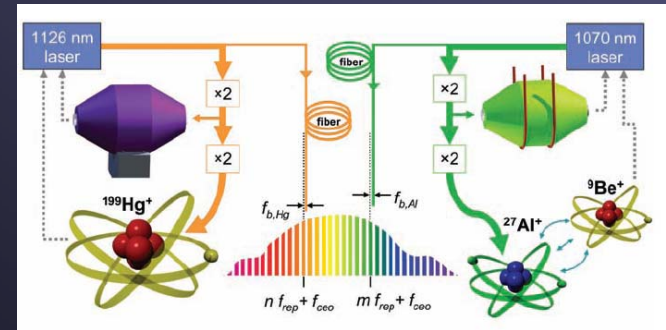
$$\dot{\frac{\alpha}{\alpha}} = \begin{cases} (0.4 \pm 0.5) \times 10^{-17} \text{ yr}^{-1}, & \text{null, upper bound} \\ (-0.44 \pm 0.04) \times 10^{-16} \text{ yr}^{-1}, & \text{non-null} \end{cases}$$





# Az állandó változási gyorsasága

- optikai átmenetek
  - csapdázott  $\text{Al}^+$  és  $\text{Hg}^+$  ionokban
  - $\text{Yb}^+$  ion Cs atomórával





Köszönöm a figyelmet



# Irodalom

- H. Kragh, *Arch. Hist. Exact Sci.* 57 395–431 (2003)
- Toichiro Kinoshita, *Rep. Prog. Phys.* 59 1459–1492 (1996)
- J.A. King, D.J. Mortlock, J.K. Webb, M. T. Murphy, *Mem. S.A.It.* 1, 1-6 (2008)  
arXiv:0910.2699v1 [astro-ph.CO] 14 Oct 2009
- T. Rosenband, et al., *Science* 319, 1808 (2008)
- P. Várlaki, L. Nádai, J. Bokor, *Acta Polytechn. Hun.* 5, 71-104 (2008)
- J.-P. Uzan, arXiv:astro-ph/0409424v2 7 Oct 2004
- H. Chand, R. Srianand, P. Petitjean, B. Aracil, *Astron&Astroph* 417, 853–871 (2004)
- <http://kicp.uchicago.edu/~odom/compton.htm>, The 64th Compton Lecture Series, Unsolved Mysteries of the Universe: Looking for Clues in Surprising Places
- S. Hannestad, *Phys. Rev. D*, 60, 023515 (1999)
- G. Gabrielse, D. Hanneke, T. Kinoshita, M. Nio, B. Odom, *Phys. Rev. Lett.* 99, 039902 (2007)
- G. Gamow, *Phys. Rev. Lett.* 19, 759 (1967)
- G. Gamow, *Phys. Rev. Lett.* 19, 913 (1967)
- Yasunori Fujii, *Lect. Notes Phys.* 648, 167–185 (2004)



# Irodalom

- L. Bergström, S. Iguri, H. Rubinstein, Phys. Rev. D, 60, 045005 (1999)
- J. K. Webb, et al., Phys. Rev. Lett. 87, 091301 (2001)
- L.-X. Li and J. R. Gott III, Phys. Rev. D, 58, 103513(1998)
- R. Khatri, B.D. Wandelt, Phys. Rev. Lett. 98, 111301 (2007)
- D. Hanneke, S. Fogwell, G. Gabrielse, Phys. Rev. Lett. 100, 120801 (2008)
- R. Srianand, H. Chand, P. Petitjean, B. Aracil, Phys. Rev. Lett. 92, 121302, (2004)
- S. K. Lamoreaux, J. R. Torgerson, Phys. Rev. D 69, 121701 (2004)
- E. Peik, et al., Phys. Rev. Lett. 93, 170801 (2004)
- M. T. Murphy, J. K. Webb, V.V. Flambaum, Phys. Rev. Lett. 99, 239001 (2007)
- M. T. Murphy, J. K. Webb, V. V. Flambaum, M. Not. Roy. Astron. Soc.: Lett. 345 609 – 638 (2003)
- J.-P. Uzan, Rev. Mod. Phys. 75, 403-455 (2003)
- J.K. Webb, V.V. Flambaum, C.W. Churchill, M.J. Drinkwater, J.D. Barrow, Phys. Rev. Lett. 82, 884 (1999)
- J.H. Kühn, M. Steinhauser, Physics Letters B 437, 425–431 (1998)
- E. Borie, Metrologia 22, 140-145 (1986)