

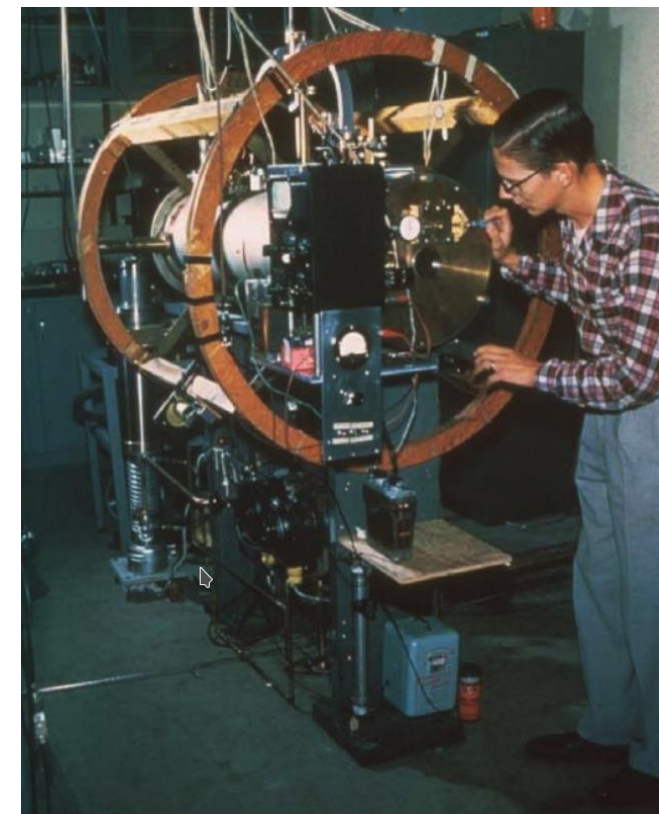
Az atomórák

Vukics András

vukics.andras@wigner.hun-ren.hu

Wigner FK, Kvantumoptika Csoport

Atomcsill, 2024. január 11.



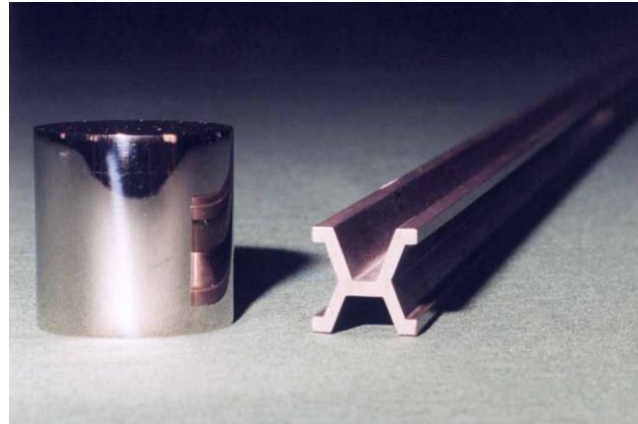
„A metrológia minden tudomány szülőanyja”



(John Hall 2005-ös
Nobel-előadása)

- Mértékegységek

- definiálása
- realizálása

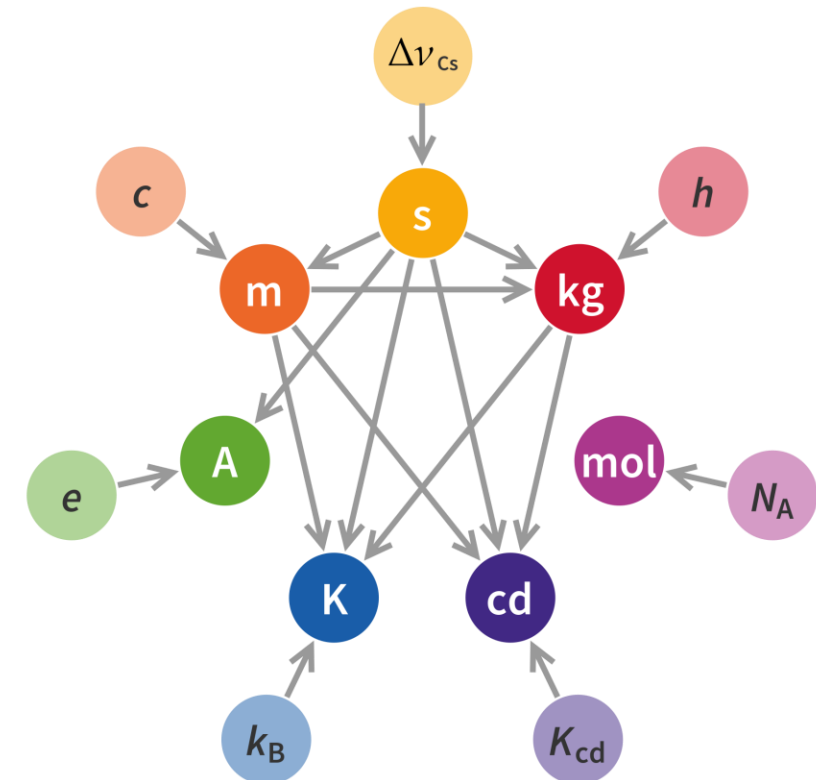


- Korábban: etalonok (definíció = realizáció)

- Ma: természeti állandók rögzített értéke

- c , h , $\Delta\nu_{Cs}$

- A másodperc a legpontosabban realizált egység

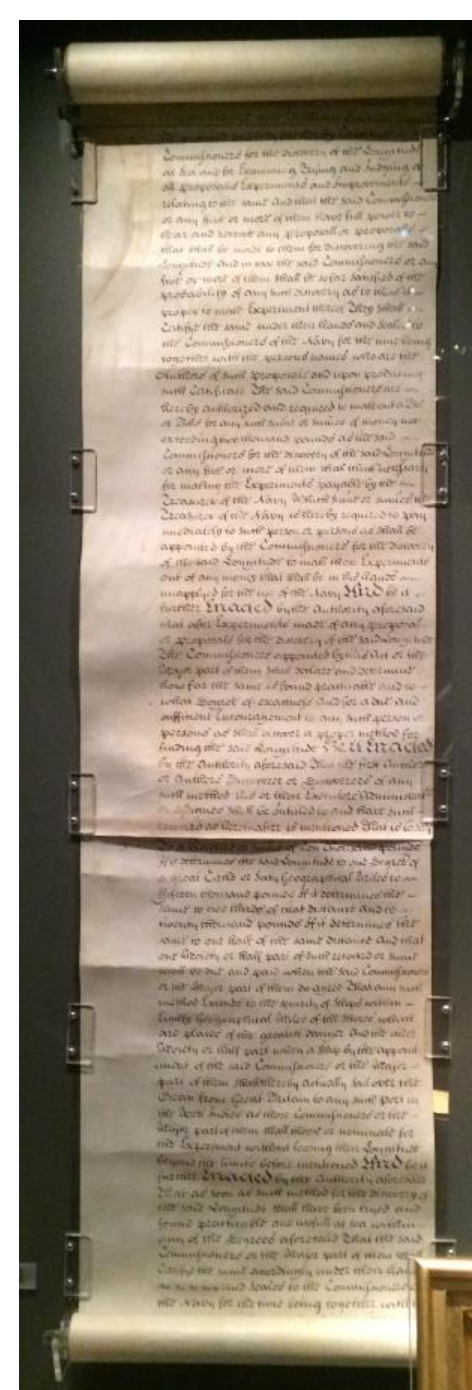
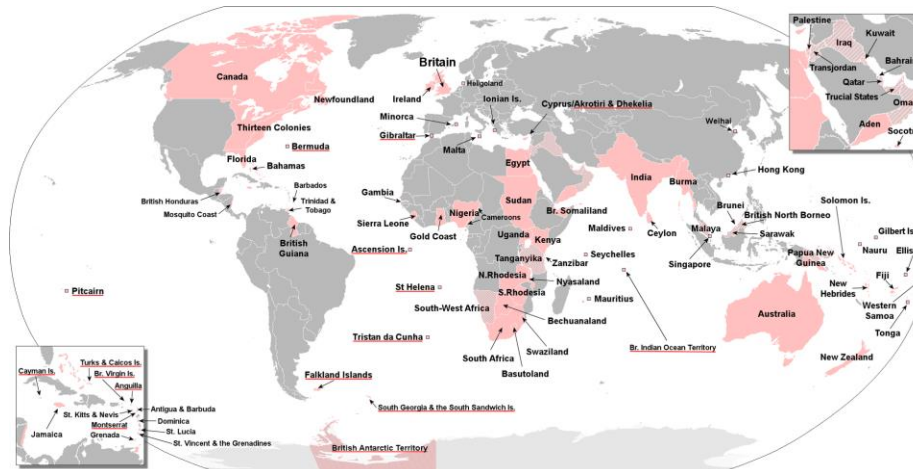


A földrajzi hosszúság problémája

(transzóceáni hajózásoknál)

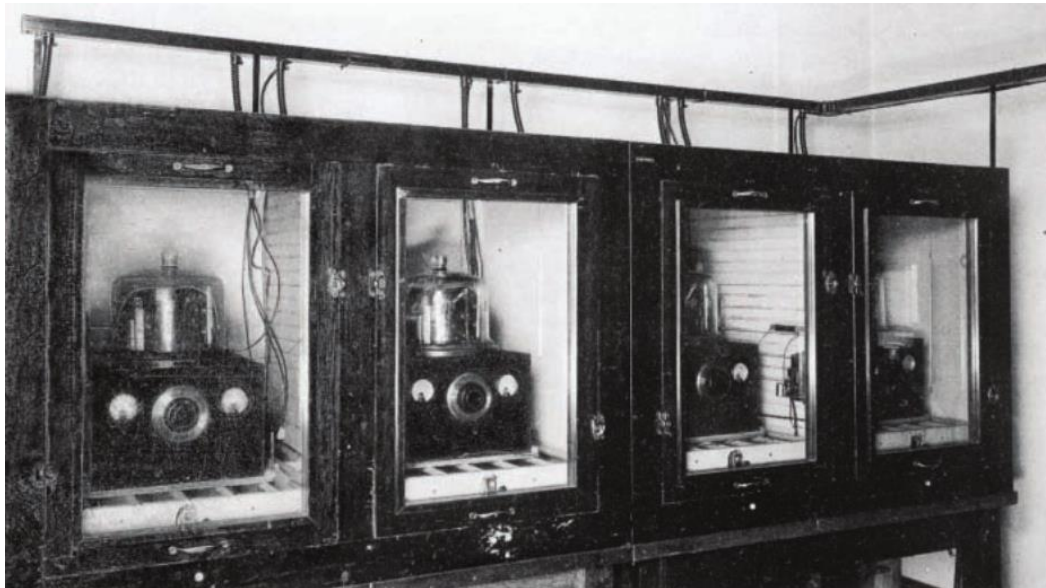
földrajzi hosszúság = idő
(1° = 4 perc
~ 100 km az Egyenlítőn)

- Galilei ötlete: Jupiter holdjai mint űr-óra
- Tengeri kronométerek
 - technológiai kihívás: stabilitás tengeri körülmények között
 - pl. Harrison H-4 órája (1761): 0.2 s/nap ($\approx 2.5 \times 10^{-6}$ stabilitás)



Időmérési standardok (NIST)

- Ingaóra
 - Shortt-óra: $\approx 10^{-7}$ stabilitás
 - probléma: csatolás az inga és az óraszerkezet között
- Kvarc
 - 4db 100kHz-es oszillátor: $\approx 10^{-9}$ stabilitás
 - probléma: kristály megmunkálásának pontatlansága + öregedés



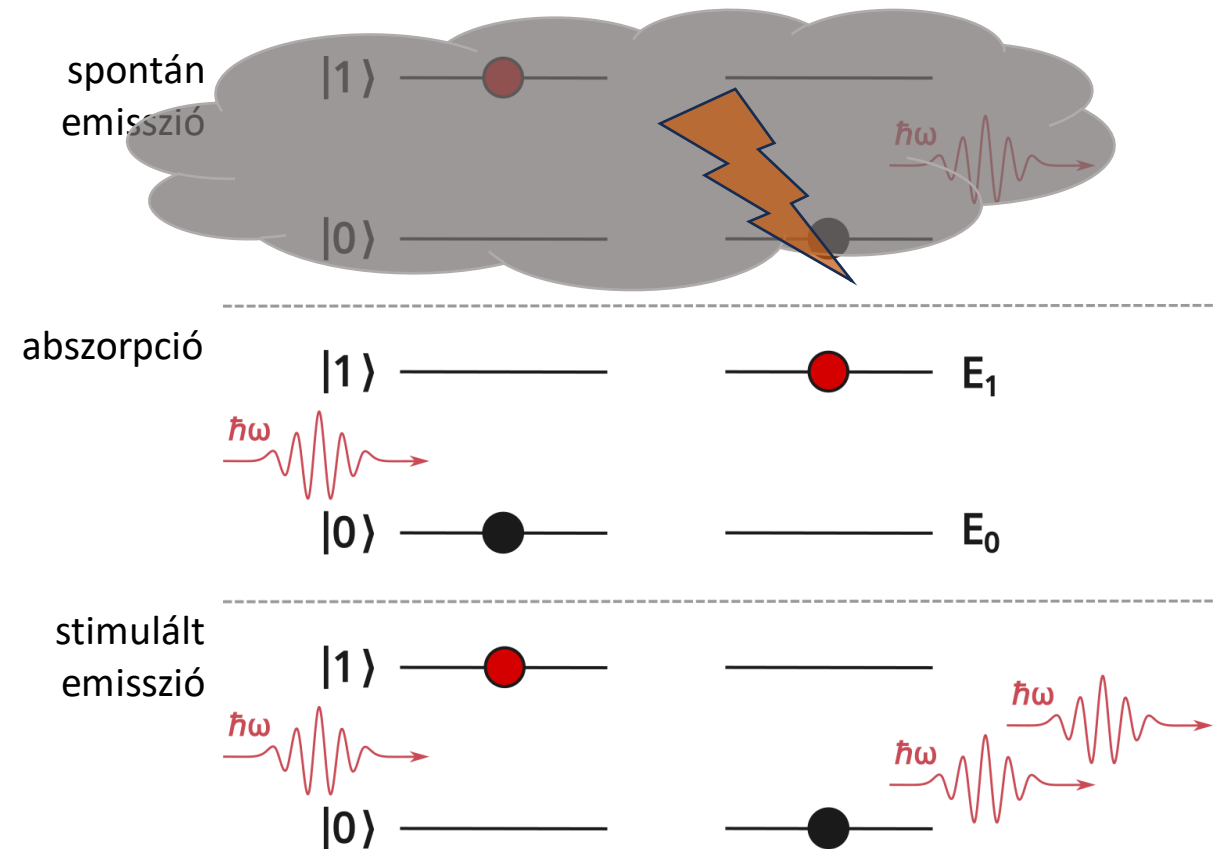
Atomi oszcillátorok

“The recent discoveries due to the kinetic theory of gases and to spectrum analysis (especially when it is applied to the light of the heavenly bodies) indicate to us **natural standard** pieces of matter such as **atoms of hydrogen or sodium**, ready made in **infinite numbers**, all **absolutely alike** in every physical property. The **time of vibration** of a sodium particle corresponding to any one of its modes of vibration is known to be **absolutely independent** of its position in the Universe, and it will probably **remain the same** so long as the particle itself exists.” (Lord Kelvin, 1879)

- végtelen számú, abszolút egyforma, öregedésmentes oszcillátor
- „valami oszcillál” az atomokban – mi az?

Kétállapotú kvantumrendszer + sugárzási tér

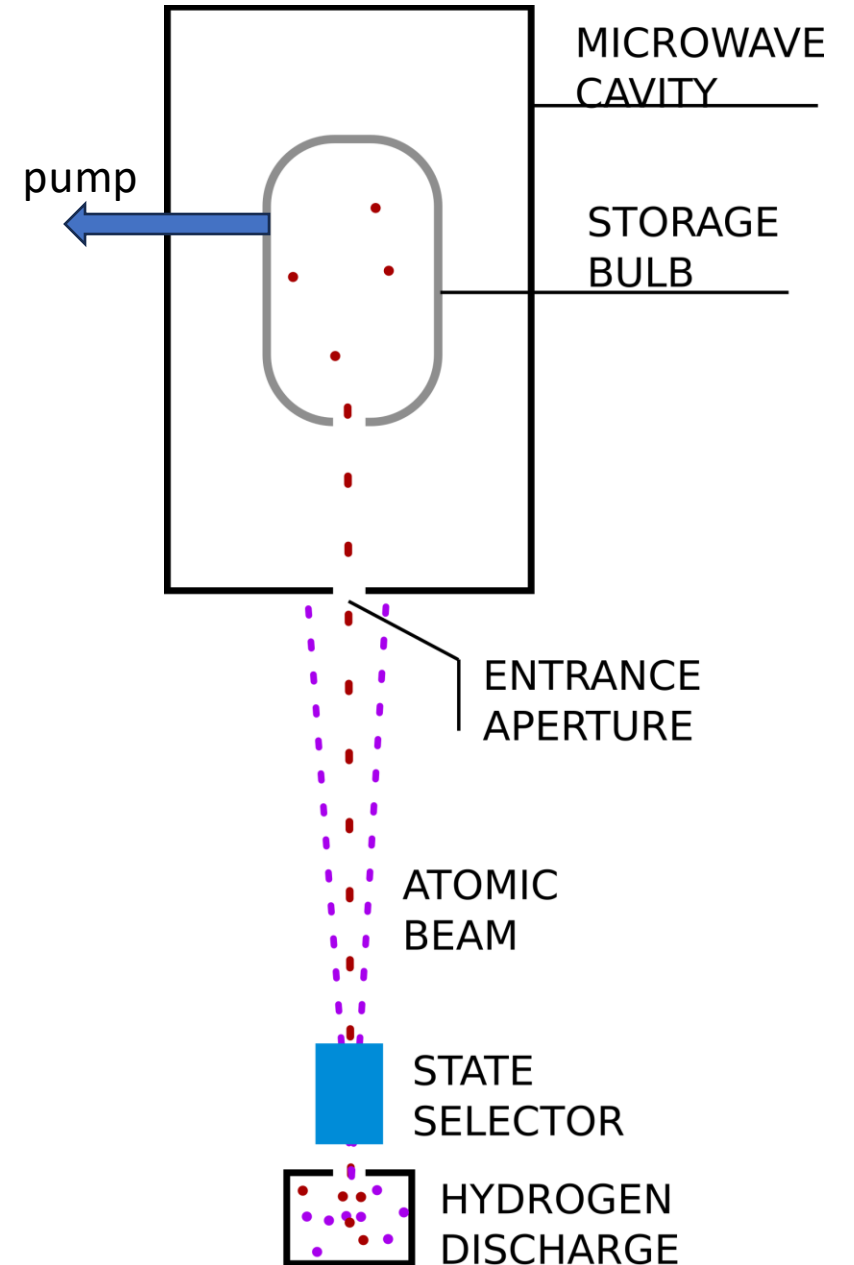
⇒ 3-féle kölcsönhatás



Folyamatos fotonáram
⇒ oszcilláció

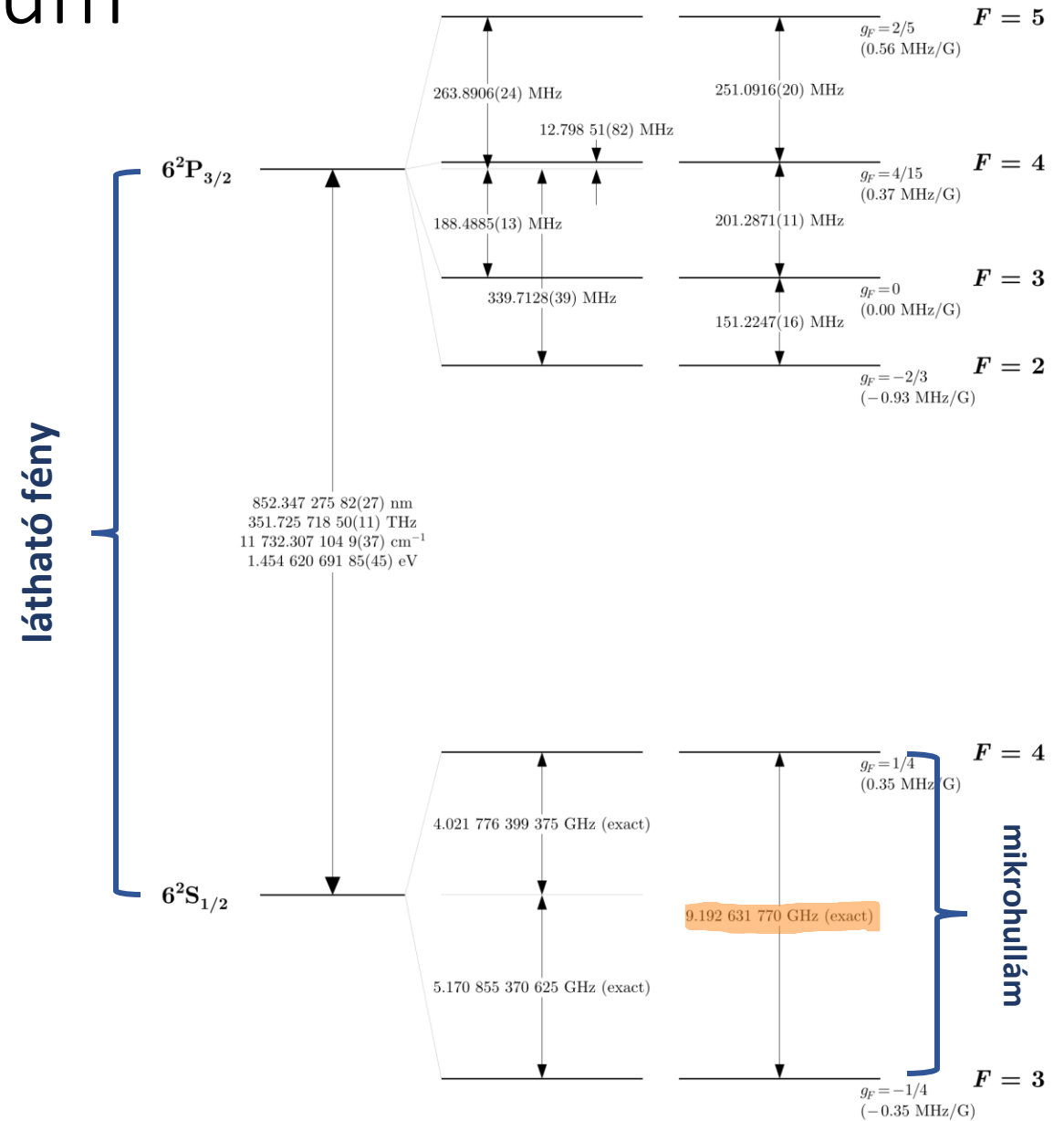
A mézer

- mikrohullámú elektronika kifejlődése a radar kapcsán (2. vh.)
- 1948: ammónium-mézer (23.8 GHz inverziós átmenet)
- hidrogén-mézer: 21 cm H-vonal (=1.42 GHz)
 - rövidtávú stabilitás $\approx 10^{-(12-13)}$
- 1964-es Nobel-díj: Basov, Prokhorov, Townes
- **aktív frekvenciareferencia**



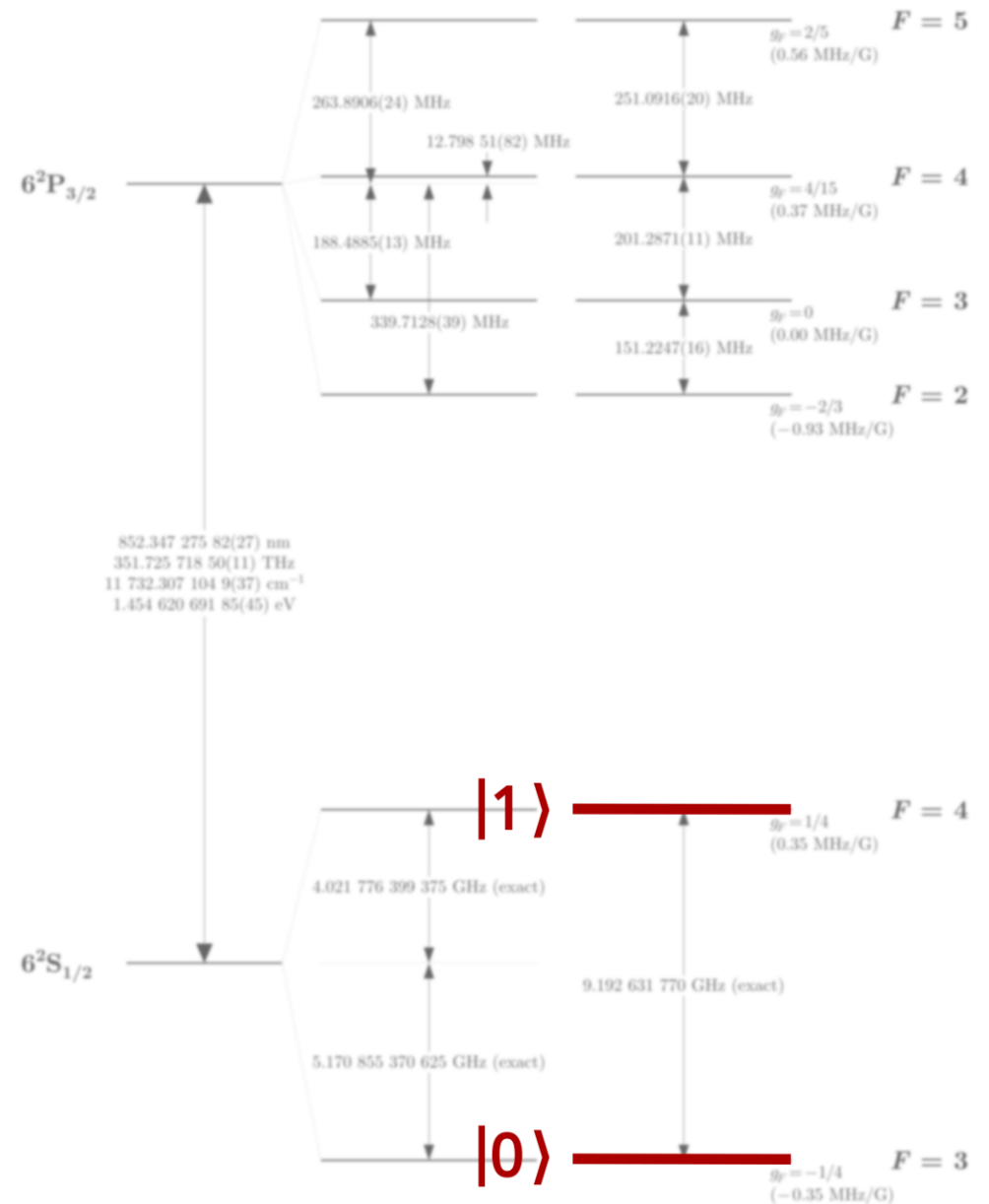
Hiperfinom szerkezet és a cézium

- magspin és elektronspin kölcsönhatása
- hiperfinom alapállapotok között nagyon kicsi spontán legerjesztődés
 ⇒ **jó óraállapotok**
- cézium előnyei: nagy gőznyomás, nagy magspin ($I=7/2$), izotóptisztaság, nehéz atomok

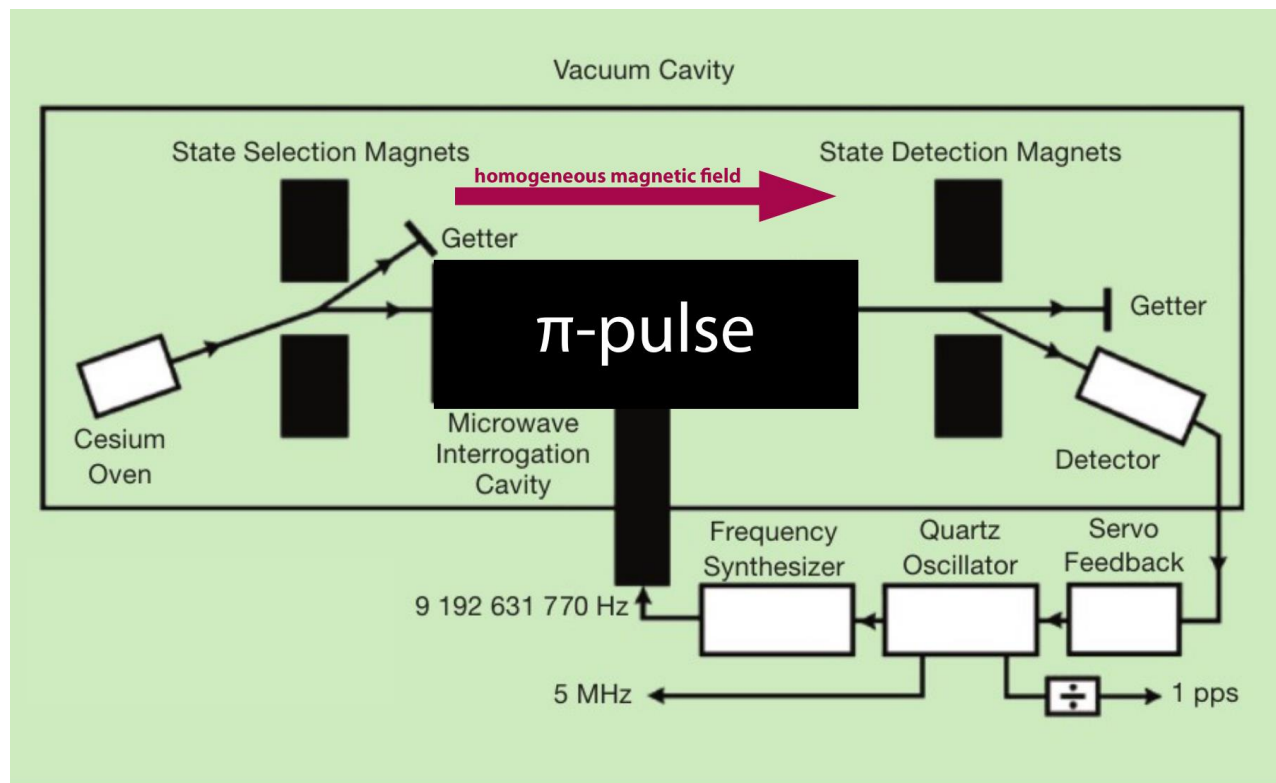


Hiperfinom szerkezet és a cézium

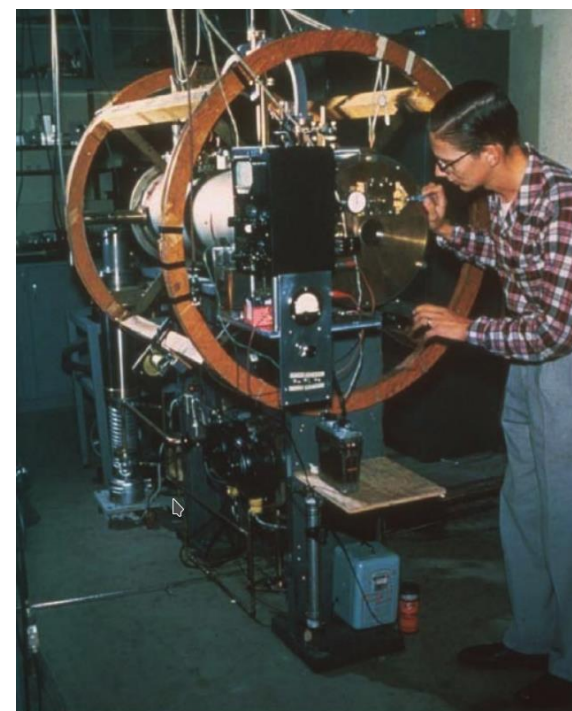
- magspin és elektronspin kölcsönhatása
- hiperfinom alapállapotok között nagyon kicsi spontán legerjesztődés
 \Rightarrow **jó óraállapotok**
- cézium előnyei: nagy gőznyomás, nagy magspin ($I=7/2$), izotóptisztaság, nehéz atomok



A cézium-nyaláb óra



$\approx 10^{-11}$ stabilitás



Másodperc-definíciók

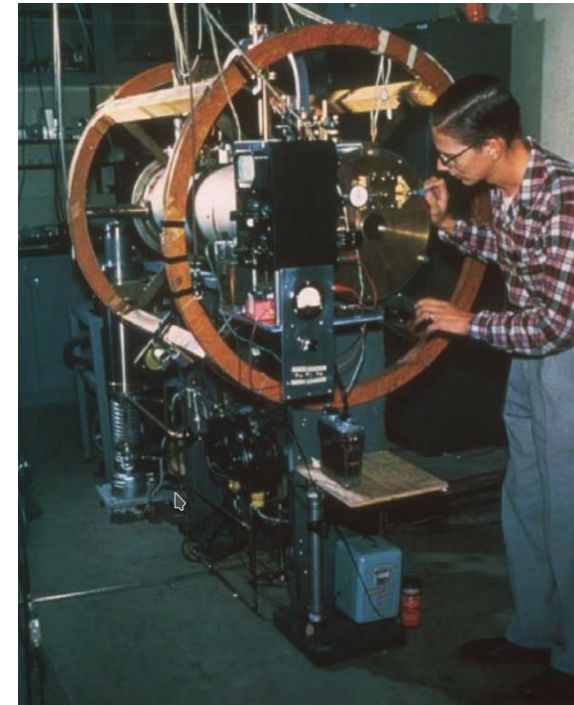
A Hold mozgásához mint másodlagos realizációhoz való kalibrálás 1955–1958

- **Csillagászati**

- történetileg: egy szoláris nap $1/86\,400$ -ad része – nagy évszakos ingadozás
- MKS (SI elődje): átlagos szoláris nap
- 1956: efemeris másodperc – az 1900-as tropikus év $1/31\,556\,925.974\,7$ -ed része – kevésbé praktikus

- **Atomi**

- 1967: atomi másodperc
“az alapállapotú ^{133}Cs atom két hiperfinom energiaszintje közötti átmenetnek megfelelő sugárzás $9\,192\,631\,770$ periódusának időtartama”
- 1997-as kiegészítés:
“... nyugalomban, 0 K termodinamikai hőmérsékleten lévő ^{133}Cs atom ...”



Másodperc-definíciók

A Hold mozgásához mint másodlagos realizációhoz való kalibrálás 1955–1958

FREQUENCY OF CESIUM IN TERMS OF EPHEMERIS TIME

W. Markowitz and R. Glenn Hall,
United States Naval Observatory, Washington, D. C.

and
L. Essen and J. V. L. Parry,

National Physical Laboratory, Teddington, England
(Received July 7, 1958)

The National Physical Laboratory, Teddington, and the U. S. Naval Observatory, Washington, have been cooperating in a joint program since June 1955 to determine ν_E , the frequency of cesium in terms of the second of Ephemeris Time.¹ In 1955 the International Astronomical Union recommended that the second of Ephemeris Time be adopted as the fundamental unit of time, and in 1956 the International Committee of Weights and Measures redefined the second so as to make it identical with the second of Ephemeris Time (E.T.), which is considered to be a constant unit of time. The second of Universal Time is thus no longer the fundamental unit of time.

Ephemeris Time is defined by the orbital mo-

105

comparison between the cesium beam at Teddington and the moon camera at Washington. From an analysis of the various factors involved we have adopted a probable error of ± 20 cps.

We find, thus, the transition frequency of cesium (4, 0) \rightarrow (3, 0) at zero magnetic field is

$$\nu_E = 9\,192\,631\,770 \pm 20 \text{ cycles per second (of E.T.) at 1957.0.}$$

The mean epoch is specified because there is a possibility that the gravitational and atomic time scales may not be the same, and may change secularly. Future determinations of ν_E will decide this question.

¹ Essen, Parry, Markowitz, and R. G. Hall, *Nature* **181**, 1054 (1958).

² Wm. Markowitz, *Astron. J.* **59**, 69 (1954).

Table I. Results for ν_E obtained from four different sets of data.

	Means	ΔH (sec)	$\nu_E - \bar{\nu}_U$	ν_E	$\Delta T''$ (sec/yr ²)
1.	ΔT_0 , 1954.25-1958.25	+1.146	-121	9 192 631 761	+ 0.17
2.	ΔT_0 , 1955.25-1958.25	1.085	-115	767	+ 0.10
3.	ΔT_C , 1954.25-1958.25	1.035	-110	772	+ 0.12
4.	ΔT_C , 1955.25-1958.25	0.966	-102	780	+ 0.17

tion of the earth about the sun, but is obtained in practice from the orbital motion of the moon about the earth. The dual-rate moon position camera has been used at the U.S. Naval Observatory since June, 1952, to determine Ephemeris Time.² Photographs of the moon and surrounding stars are taken to determine the position of the moon at a known Universal Time. The Improved Lunar Ephemeris 1952-1959 tabulates the position of the moon as a function of E. T. The Lunar Ephemeris is entered with the observed position of the moon and E. T. is taken out. There is thus obtained the quantity $\Delta T = E.T. - U.T.$

Semiannual means have been determined for the epochs 1952.75 to 1958.25, in two forms. ΔT_0 is the mean obtained initially and ΔT_C is the mean obtained by correcting for terms which depend upon the mean anomaly of the moon.

In a previous note¹ we have described an intermediate step, namely, the determination of ν_U , the frequency of cesium in terms of the second of UT₂. In this note we describe how the observations of the moon are used to convert from ν_U to ν_E .

It may be shown that

$$\nu_E = \bar{\nu}_U - \nu_E (\Delta H/H),$$

where ν_U is the mean value of ν_U in an interval of time H , and ΔH is the total change in ΔT during the interval.

The interval of comparison used is 1955.50 to 1958.25. For this interval $H = 8.68 \times 10^7$ sec, and $\bar{\nu}_U = 9\,192\,631\,822$ cps of UT₂. ΔH was obtained by passing a parabola through the means, by least squares, and evaluating ΔT for the ends of the interval. Four solutions were made in order to determine the effect of using different data. The results are shown in Table I.

The last column gives the deceleration in the rotation of the earth as determined with the moon camera. The deceleration previously determined with the cesium standard was 50 parts

in 10^{10} per year, which is equivalent to 0.16 sec/yr². The agreement between the moon camera and cesium is satisfactory.

The value of ν_E adopted is the mean of the four solutions, that is, 9 192 631 770 cps.

With this value of ν_E we may obtain $\Delta A = A.T. - U.T.$, where A.T. denotes atomic time, by integrating the values of ν_U previously obtained and by assigning an initial value of ΔA . The value adopted is $\Delta A = 30.580$ sec at 1957.0. Figure 1 shows ΔA , ΔT_0 , ΔT_C , and ΔT_C , the parabola obtained from solution No. 3. Its equation is

$$\Delta T_{C3} = [30.853 - 0.469 (t-1950.0) + 0.0615 (t-1950.0)^2] \text{ sec.}$$

It is believed that the dispersion in the values of ΔT will be reduced by the application, in the future, of corrections for the figure of the moon which are now being completed by Dr. C. B. Watts of the Naval Observatory.

The probable error of ν_E is estimated to be ± 10 cps from internal considerations. The result, however, may be affected by possible systematic errors, especially in the determination of ΔH . There is also the possibility that a systematic error may be present in the chain of

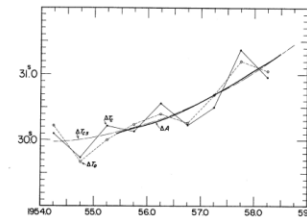
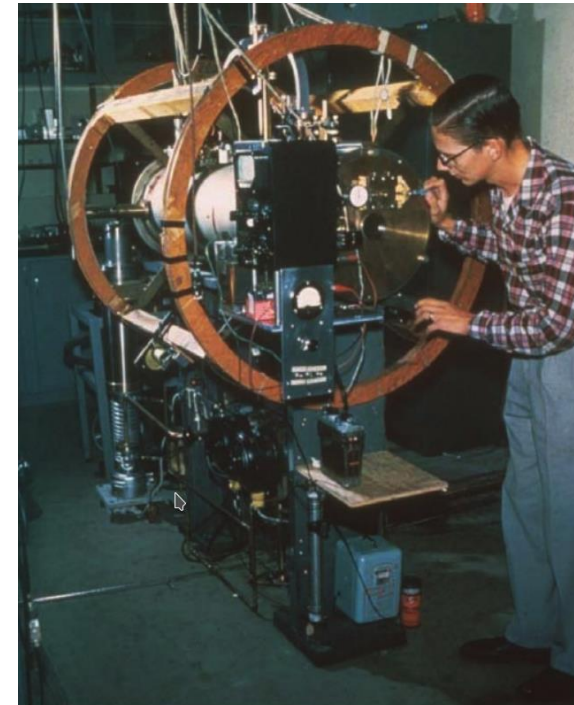
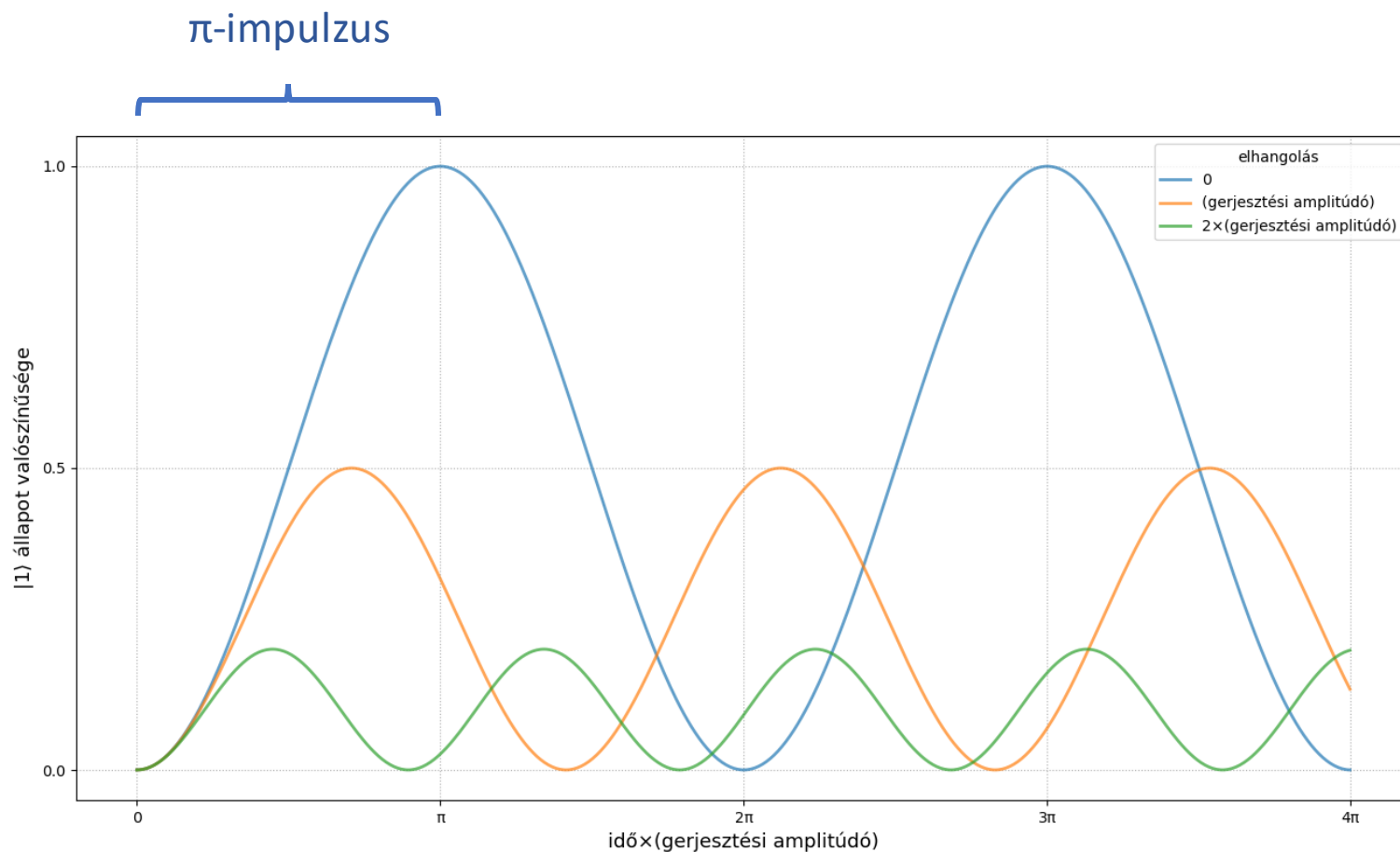
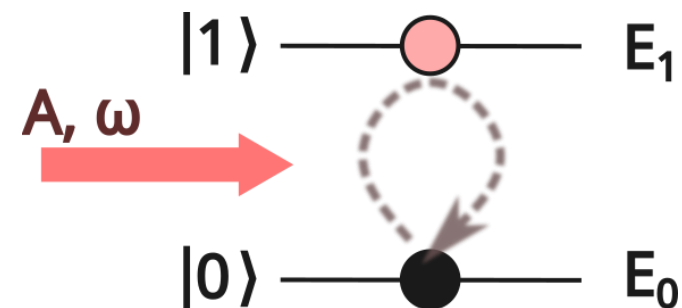


FIG. 1. Comparisons of Ephemeris Time and Atomic Time with Universal Time.



Hibajel – Rabi-oszcilláció

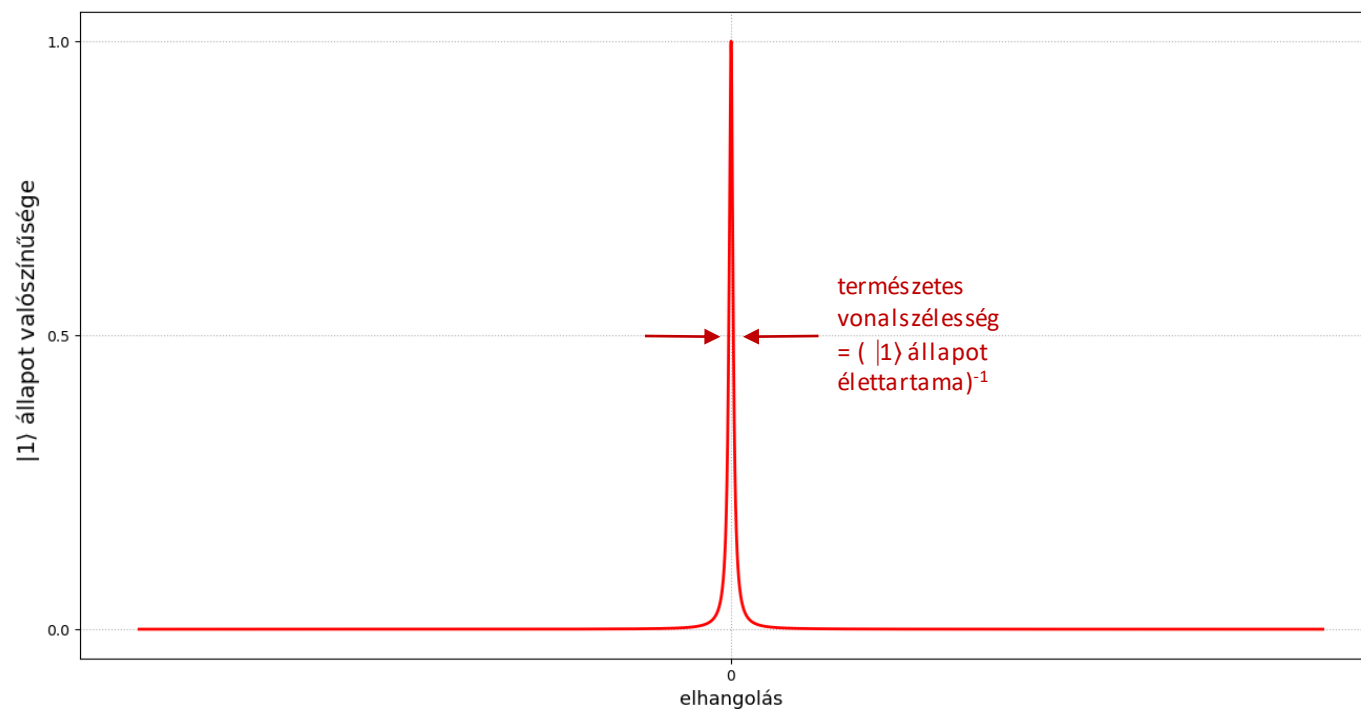


$$\text{elhangolás} = \omega - (E_1 - E_0) / \hbar$$

Hibajel – Rabi-oszcilláció

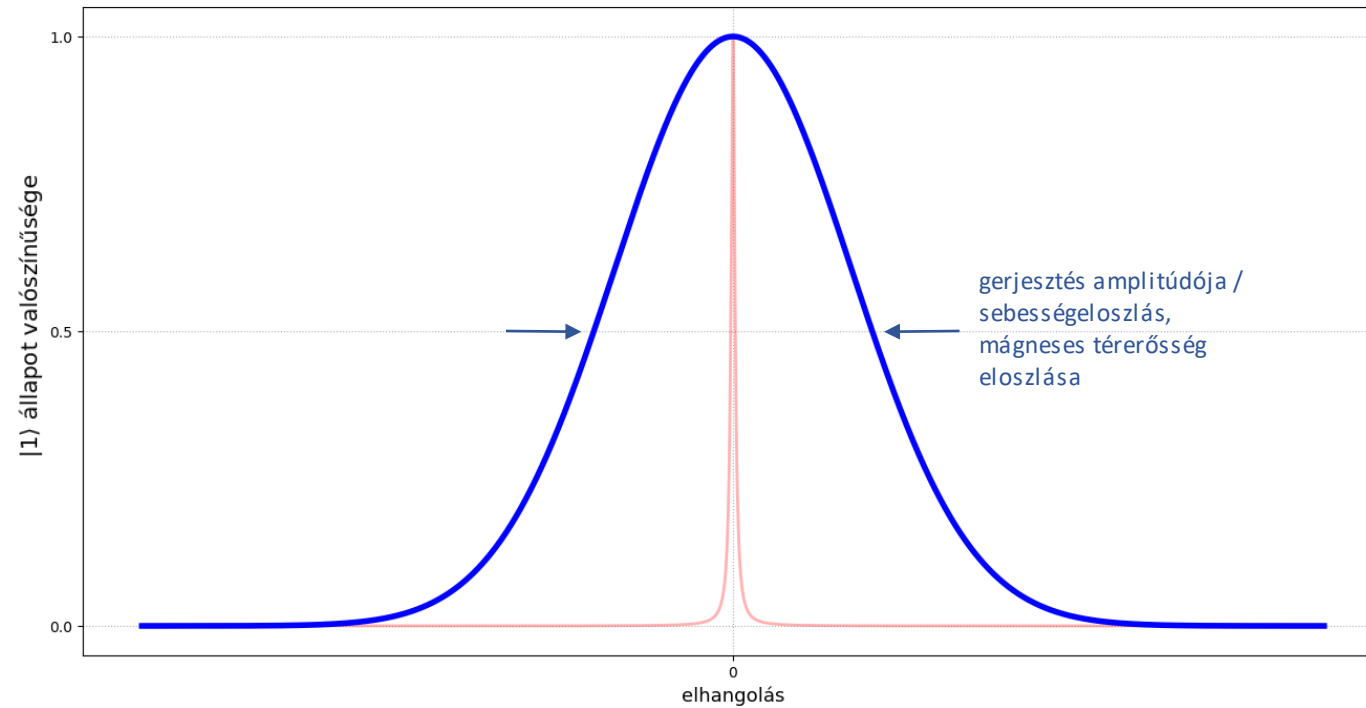


Isidor Isaac Rabi
Nobel-díj 1944

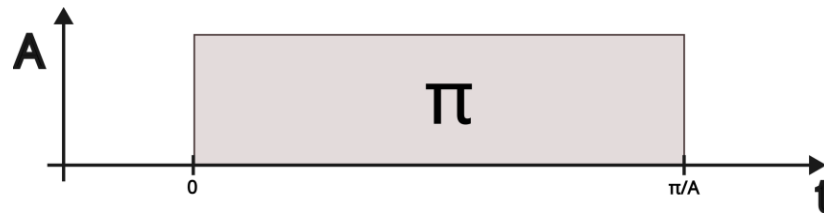


Véges élettartam
 \Rightarrow véges szélességű
rezonancia

Hibajel – Rabi-oszcilláció



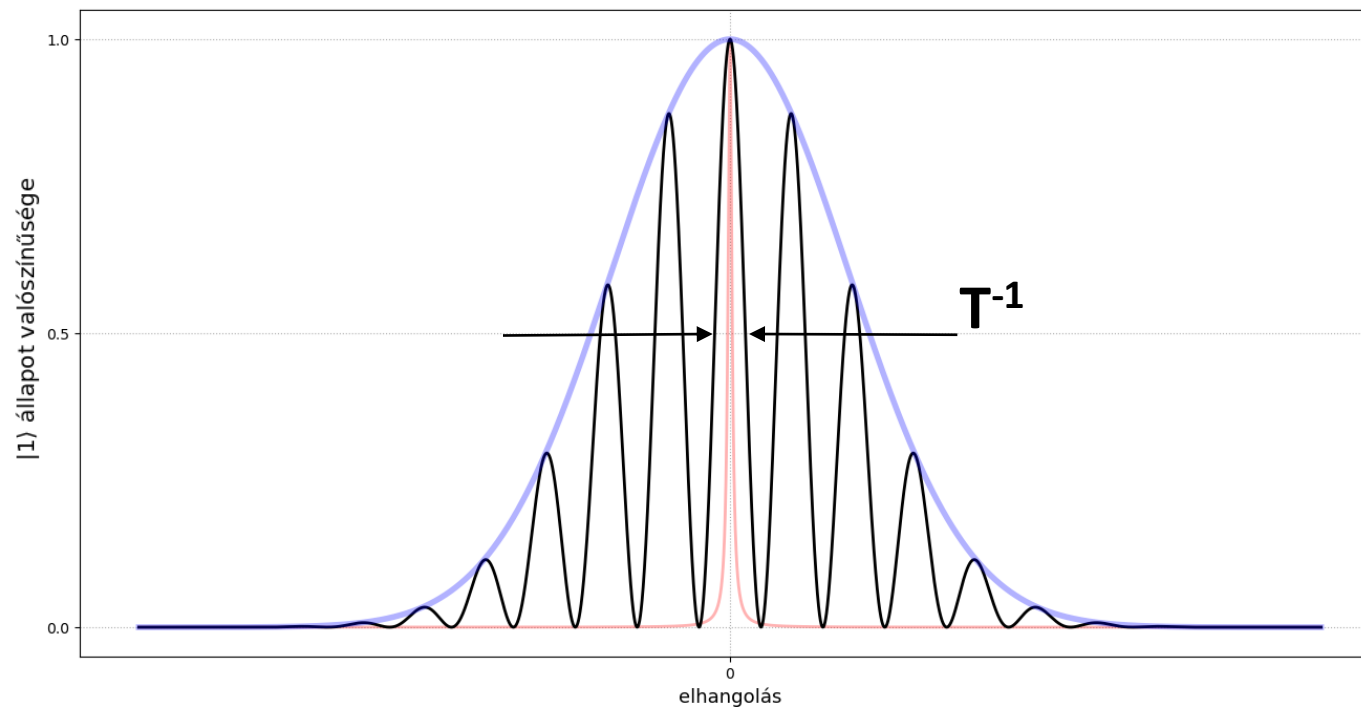
A gerjesztési amplitúdóra és a sebességeloszlásra való érzékenység egymás ellen dolgozik \Rightarrow Nincs értelme növelni a kölcsönhatási zóna hosszát!



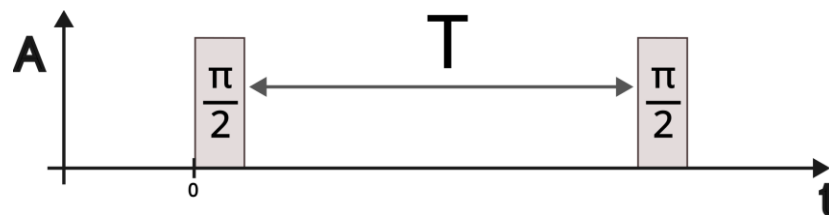
Hibajel – Ramsey fejlesztése



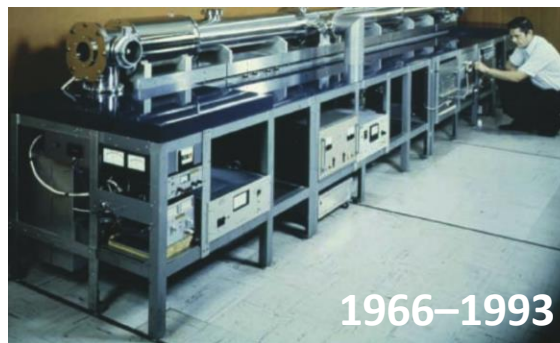
Norman F. Ramsey
Nobel-díj 1989



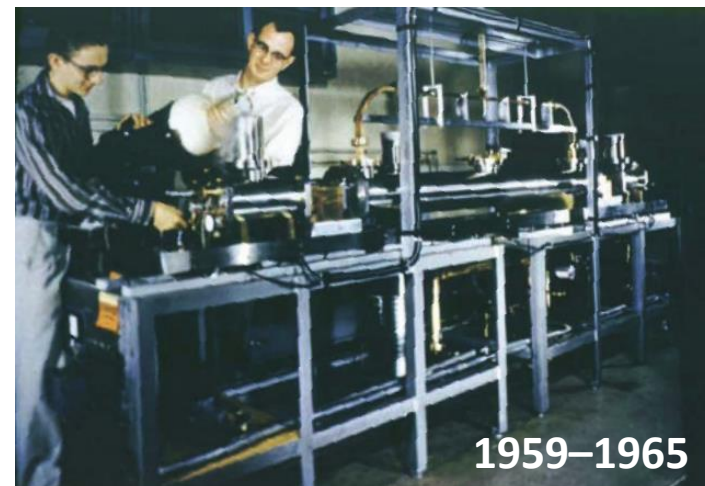
A kölcsönhatási zóna hosszának növelésével élesebbé válik a rezonancia!



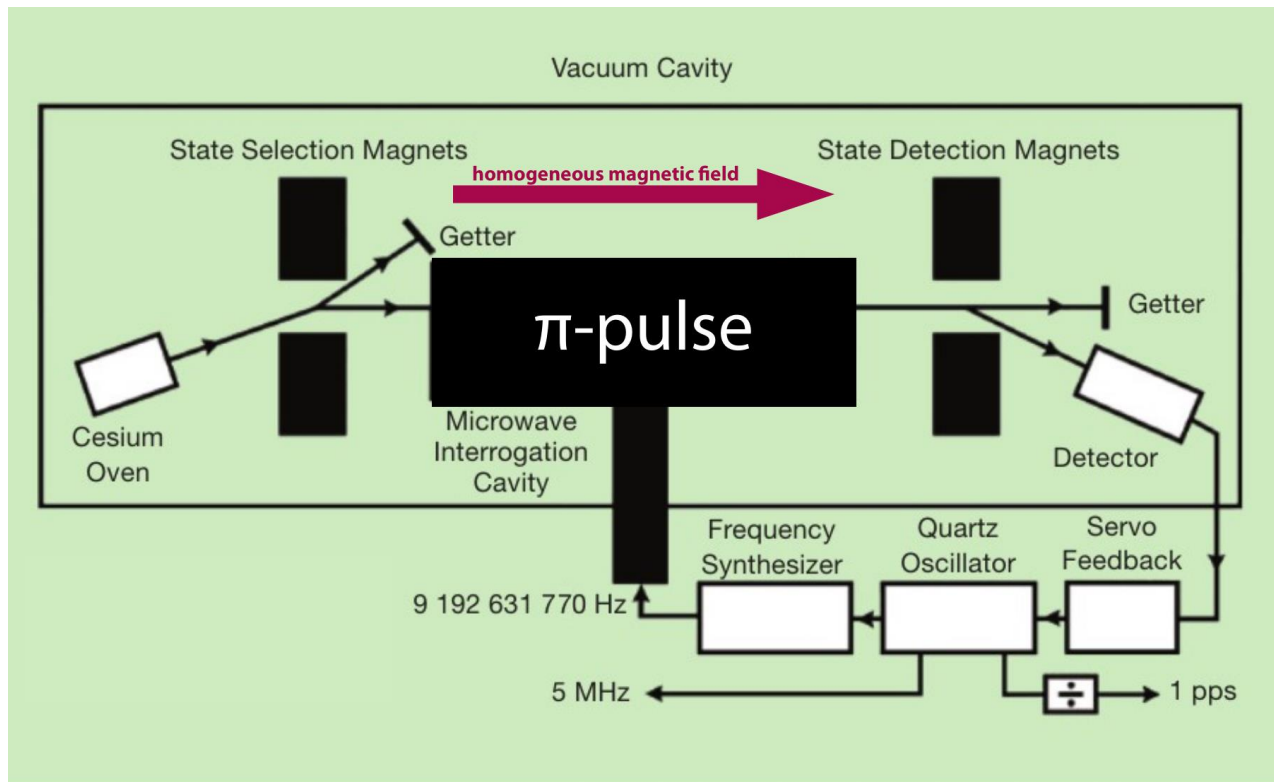
A cézium-nyaláb óra



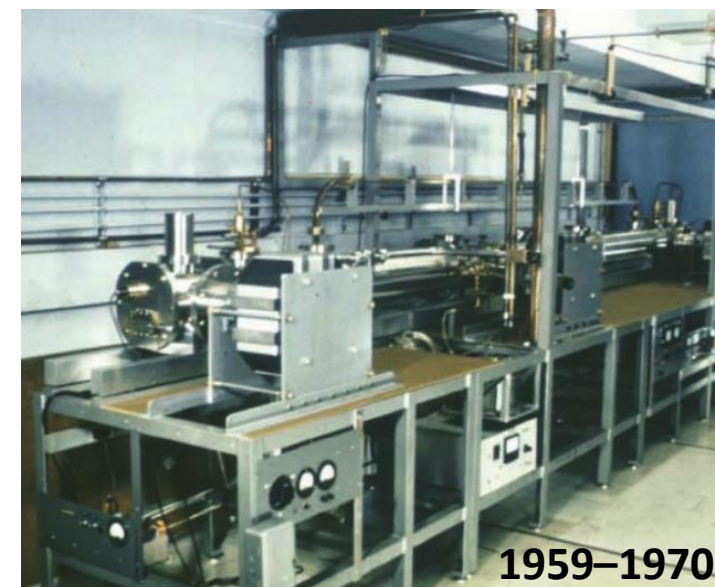
1966–1993



1959–1965

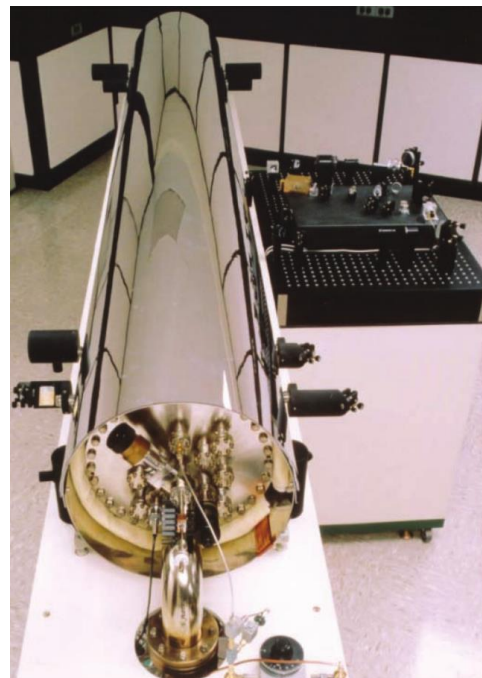


lézeres állapotpreparálás és -detektálás
⇒ több atom, erősebb jel
⇒ pontosság 5×10^{-15}



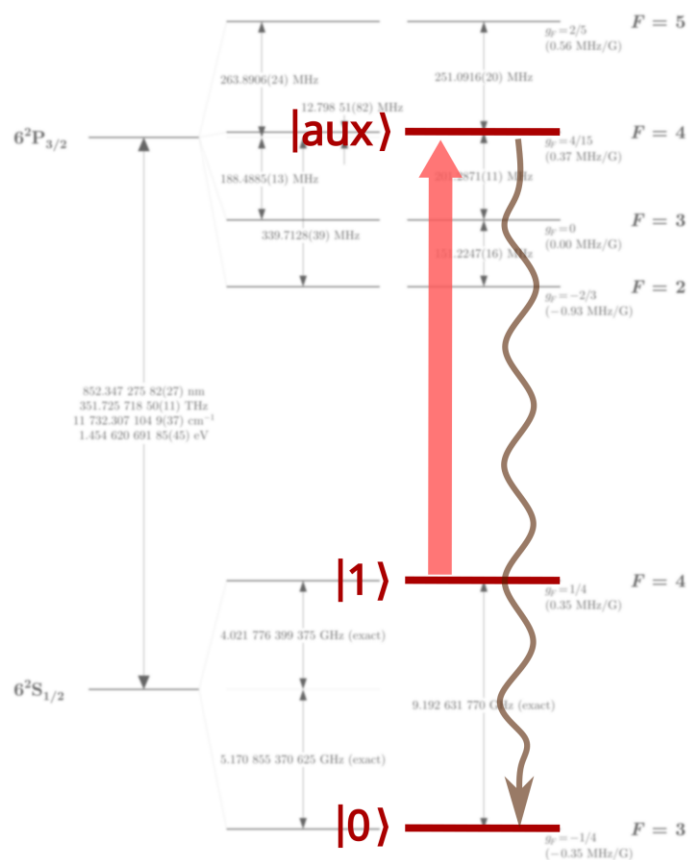
1959–1970

NIST-7: 1988–1998

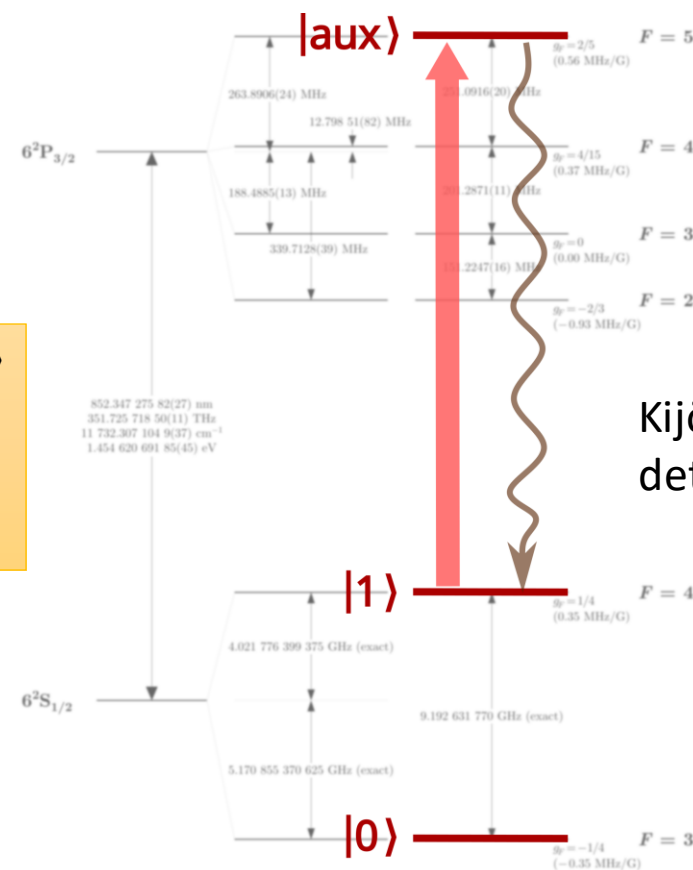


Lézeres állapotpreparálás és -detektálás

Optikai pumpálás



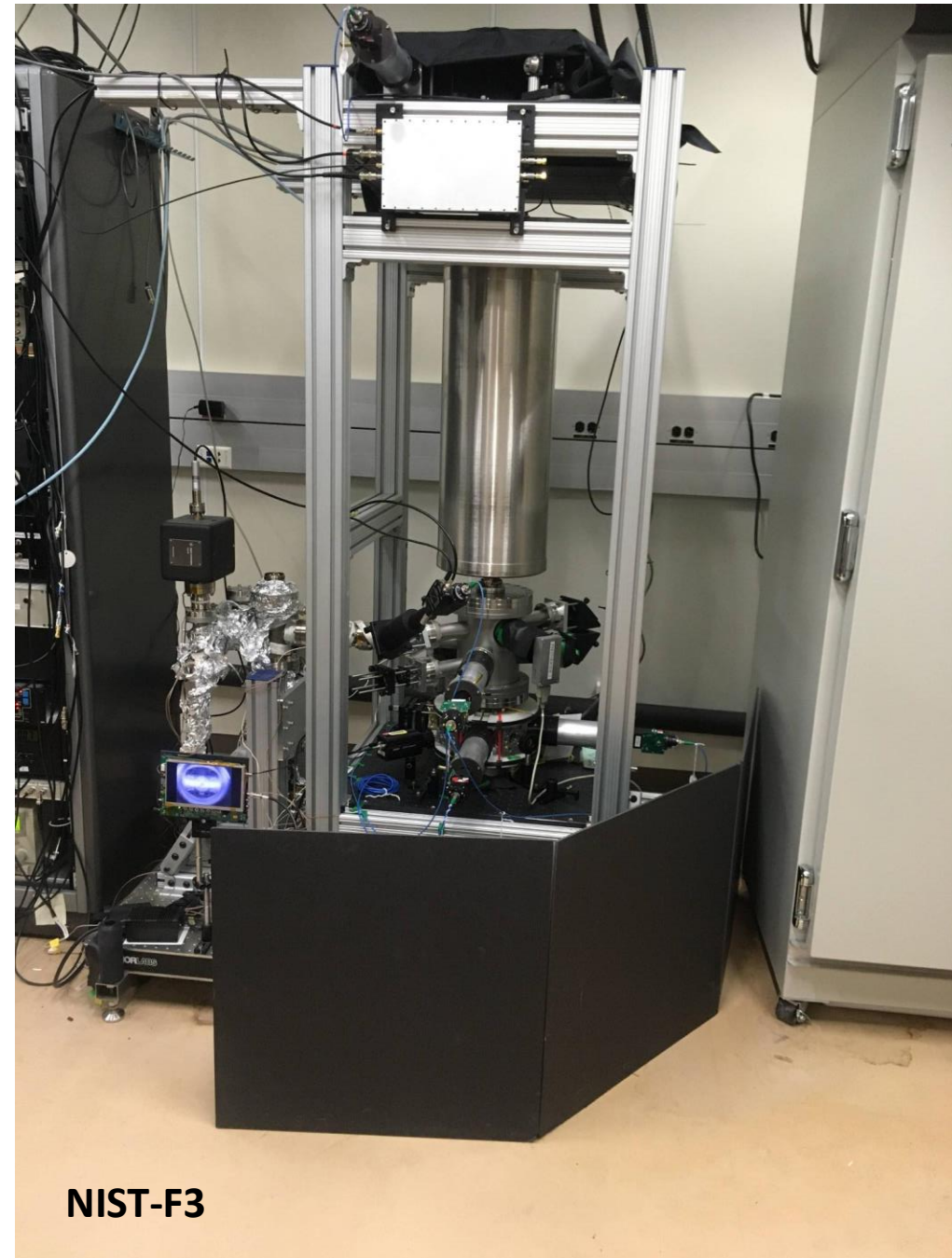
Fluoreszcens kiolvasás



- gerjesztés csak az $|1\rangle$ állapotból
- bomlás „kiválasztási szabályoknak” megfelelően

A cézium-szökőkút óra

- nyaláb-dizájnt limitálja a nagy atomi sebesség
- szökőkút-ötlet az 1950-es évekből
- lézeres hűtés kulcsfontosságú (Steven Chu, Nobel-díj 1997)
- szekvenciális működés \Rightarrow Dick-effektus
 - nagyon jó oszcillátorra van szükség, ami lendkerékként működik két mintázás között



NIST-F3

Hitelesség vs. stabilitás az Allan-variancia

Stabilitás függ a megfigyelés időskálájától \Rightarrow Allan-variancia

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} [\langle y(\tau) \rangle_{i+1} - \langle y(\tau) \rangle_i]^2$$

$$y \equiv \frac{f_c - f_s}{f_0}$$

vizsgált óra referencia (pontosabb óra, vagy óra-csoport)
névleges alapfrekvencia

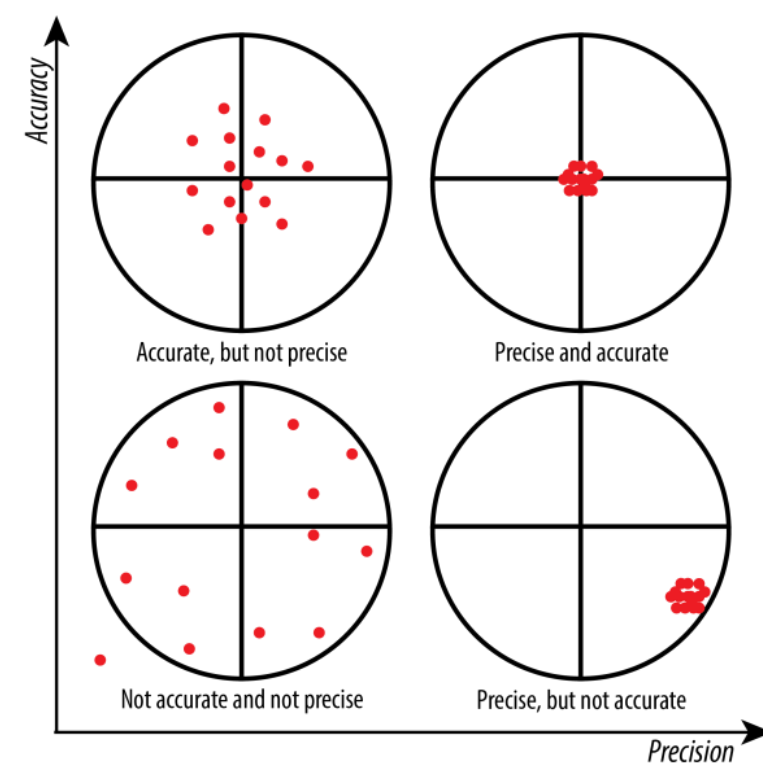
Amit szeretnénk:

$$\sigma_y(\tau) \rightarrow 0 \quad \tau \rightarrow \infty$$

Pl. szökőkút-szerű kísérletben ideálisan:

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{2\pi f_0 \sqrt{NT_m \tau}}$$

- N – atomszám
(állapotdetektálás binomiális folyamat)
- T_m – Ramsey-idő



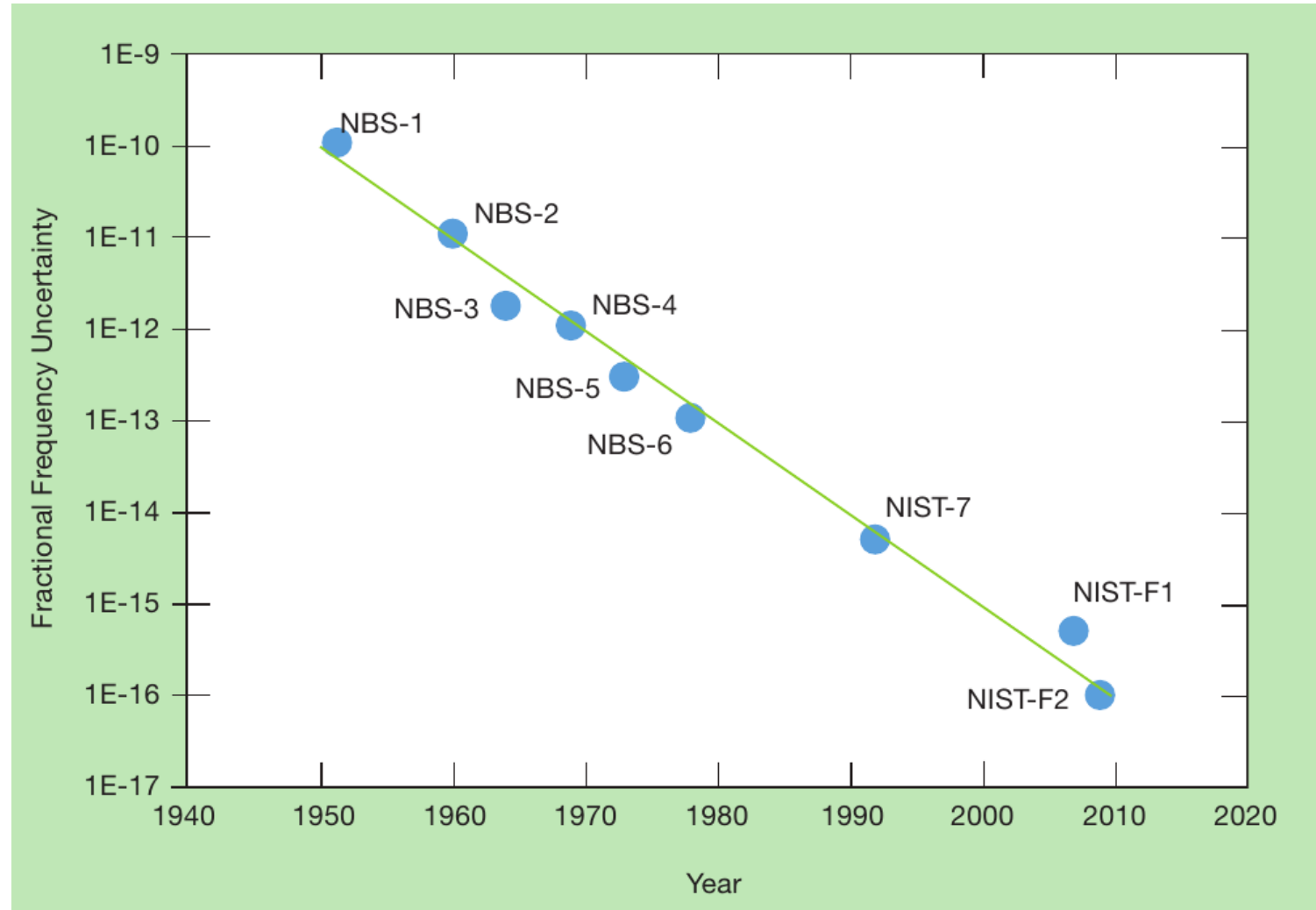
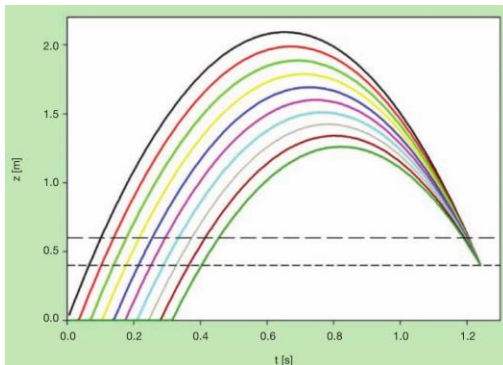
- a cézium inherensen hiteles, és semmi sem lehet nála hitelesebb
- jelenleg az optikai atomórák már nagyságrendekkel *stabilabbak* a céziumnál

Frekvencia-standardok hitelességének fejlődése

A 10^{-16} tartományban megjelenő tényezők:

- feketetest-sugárzás
⇒ kriogenikus környezet
- sűrűség-eltolódás
⇒ többszörös feldobás-séma
- gravitációs vöröseltolódás
⇒ űr-óra

NIST-F2



Asztrofizikai „órák”

Reviews of Modern Physics **83**:1 (2011)

neutroncsillagok „periódusdriftje”

lineáris rendig eltávolítva

ideális $\propto \tau^{-1}$ viselkedés

\Rightarrow fázis-fehérzaj

atomórák

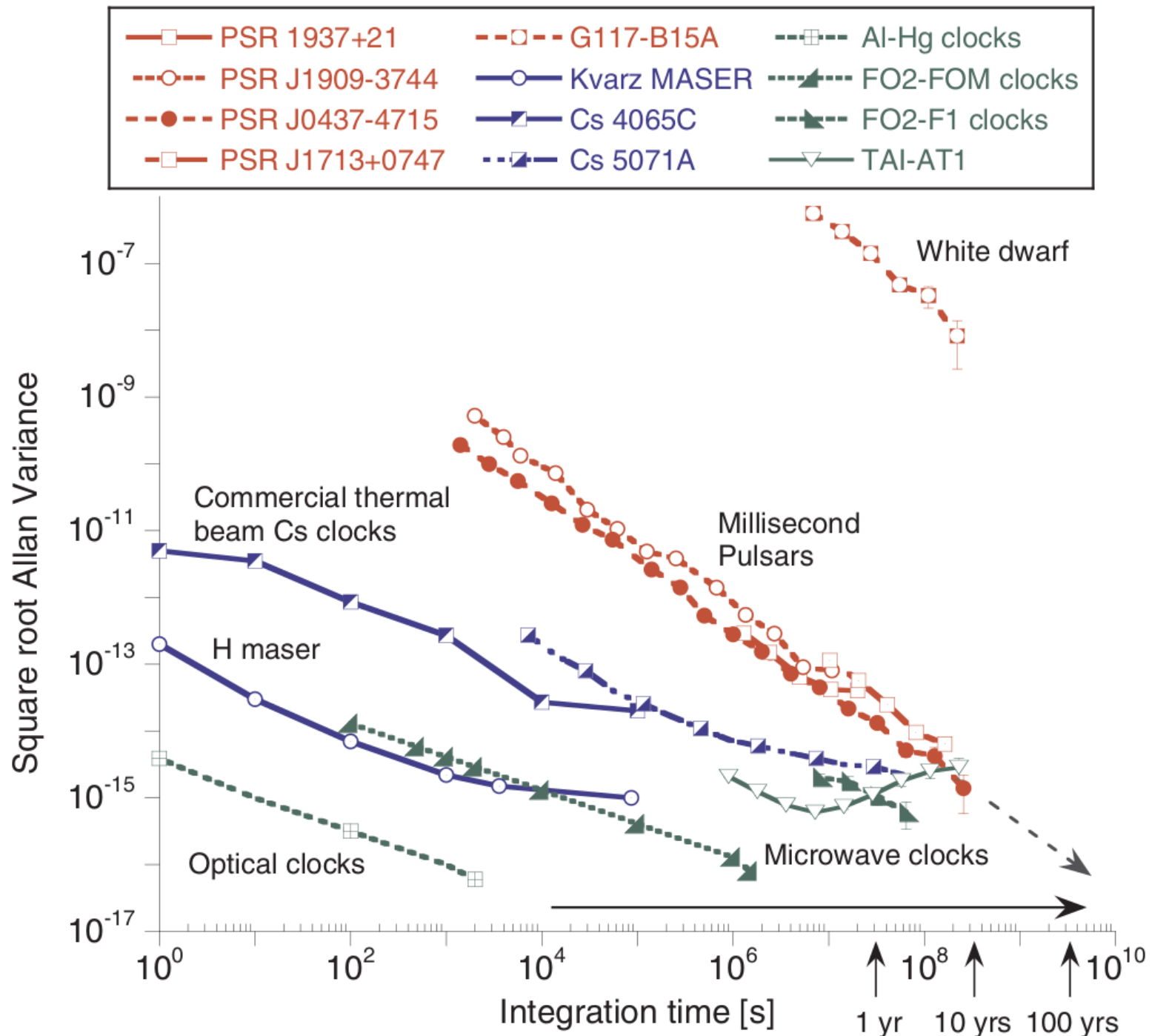
$\propto \tau^{0.5}$ viselkedés

\Rightarrow frekvencia-fehérzaj

+ hosszútávú driftek miatt ellaposodás

atomórák összességében stabilabbak

(azóta még inkább)

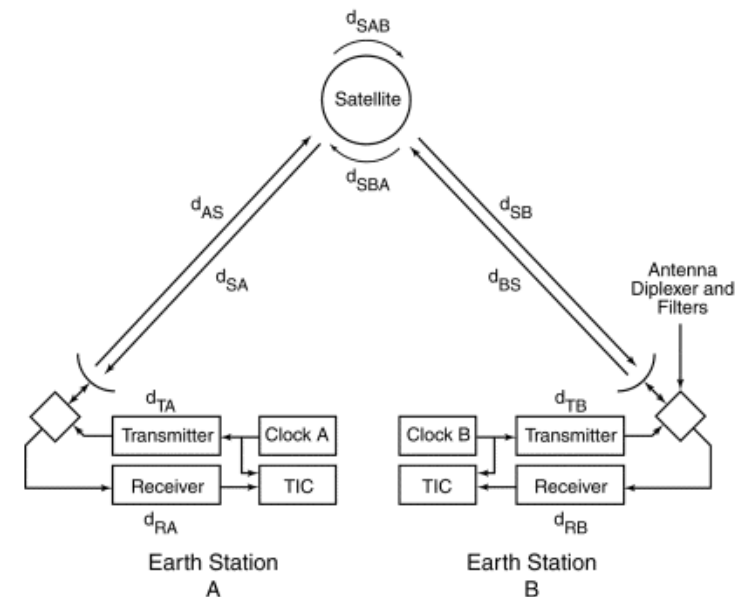
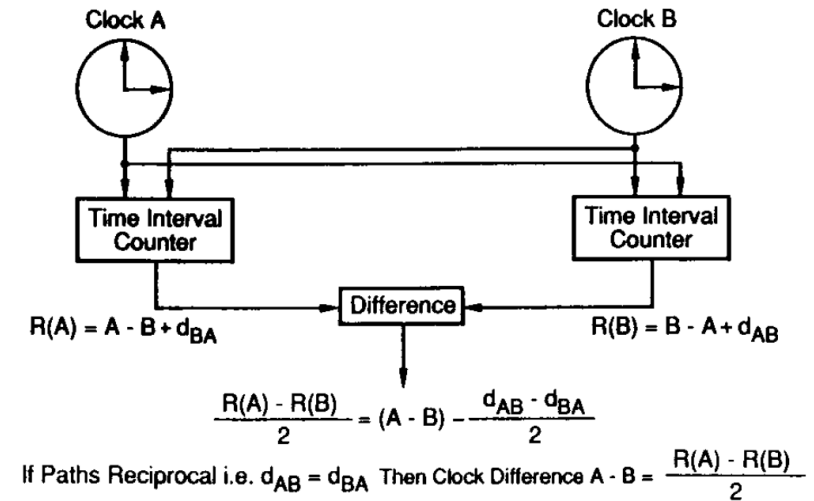


A cézium-óra alkalmazásai

- Műholdas navigációs rendszerek
 - GPS
 - 1983 óta érhető el a nagyközönség számára – számos hierarchikus hozzáférésű csatorna
 - 28 műhold (min. 24 szükséges a globális lefedettséghez)
 - fedélzeti Rb/Cs órák + H-mézer – földi kontroll-állomás (USNO) vezérli
 - 4 szükséges a helymeghatározáshoz, 99%-os valószínűséggel legalább 5 látszik
 - Bizonytalanság főként az ionoszférán való áthaladásból – korrekció titkosított csatornákon
 - Galileo (EU), Glonass (orosz), BeiDou (kínai)
- “Okos” villamosenergia-hálózatok
- Távközlés (szinkron hálózatok)

Szinkronizáció, disszemináció, időskálák

- Kétirányú műholdas transzfer
 - időkésleltetések eliminálhatók
 - Sagnac-effektus lényeges!
- Optikai tartományban optikai szálak használhatók!
 - Teljesen optikai átvitel szükséges
- **Nemzetközi Atomi Idő (TAI)**
 - BIPM hozza létre 400 óra csoportjából súlyozott átlagolással
 - stabilitás hónapos időskálán: $\approx 4 \times 10^{-16}$



Szinkronizáció, disszemináció, időskálák



Egyezményes Koordinált Világidő (UTC)

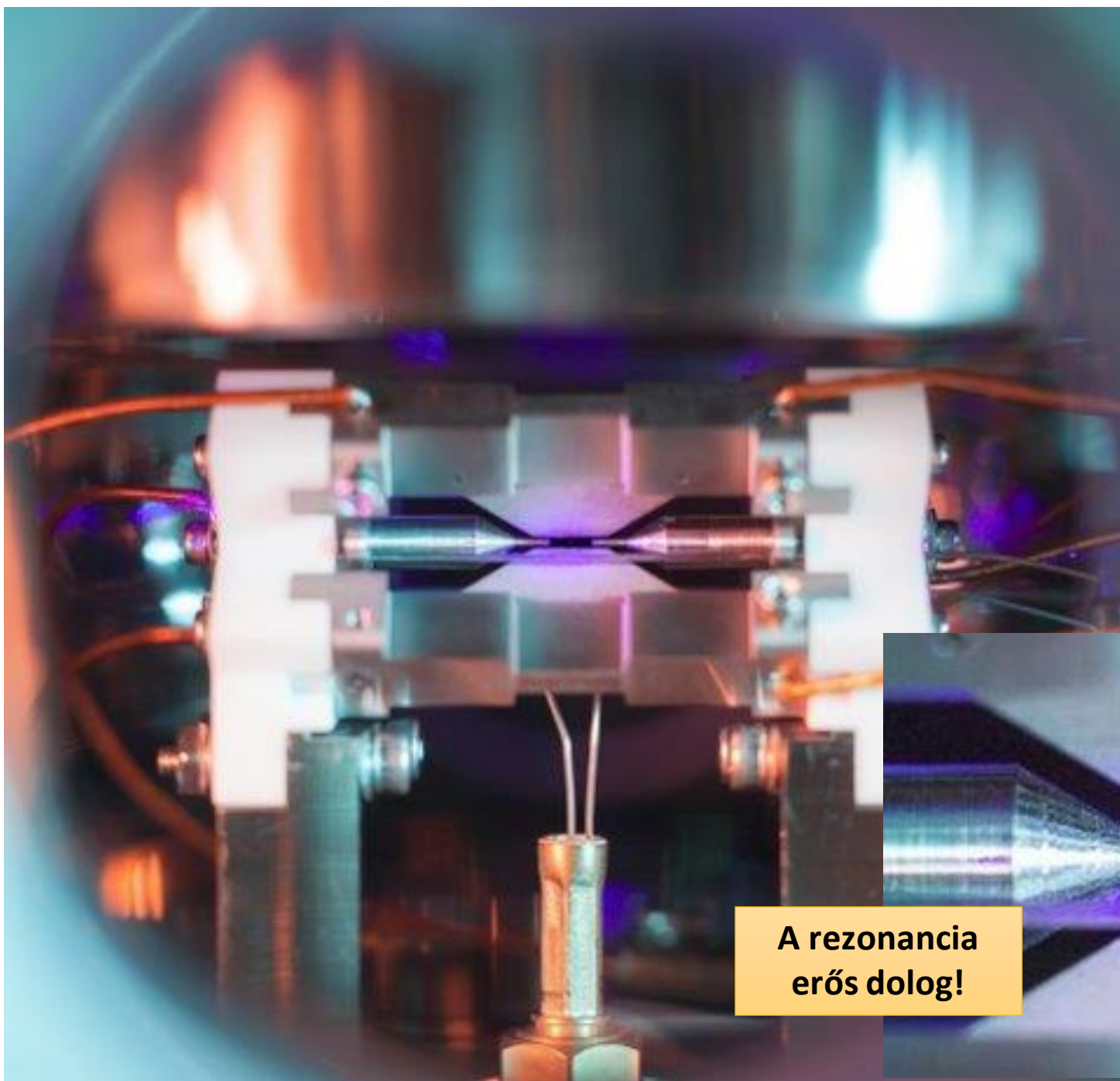
- BIPM hozza létre és disszeminálja
- TAI kezdőpont: 1958.01.01. 00:00:00 UT
- UTC kezdőpont: 1972.01.01. 00:00:00 UT (00:00:10 TAI)
Akkor: $UTC - TAI = -10s$. Ma: $UTC - TAI = -37s$
- Szökőmásodpercekkel igazítják az UT1-hez \Rightarrow UTC
(International Earth Rotation & Reference Systems Service határozza meg 6 hónappal előre)

Year	Jun 30	Dec 31
1972	+1	+1
1973	0	+1
1974	0	+1
1975	0	+1
1976	0	+1
1977	0	+1
1978	0	+1
1979	0	+1
1980	0	0
1981	+1	0
1982	+1	0
1983	+1	0
1984	0	0
1985	+1	0
1986	0	0

1987	0	+1
1988	0	0
1989	0	+1
1990	0	+1
1991	0	0
1992	+1	0
1993	+1	0
1994	+1	0
1995	0	+1
1996	0	0
1997	+1	0
1998	0	+1
1999	0	0
2000	0	0
2001	0	0
2002	0	0

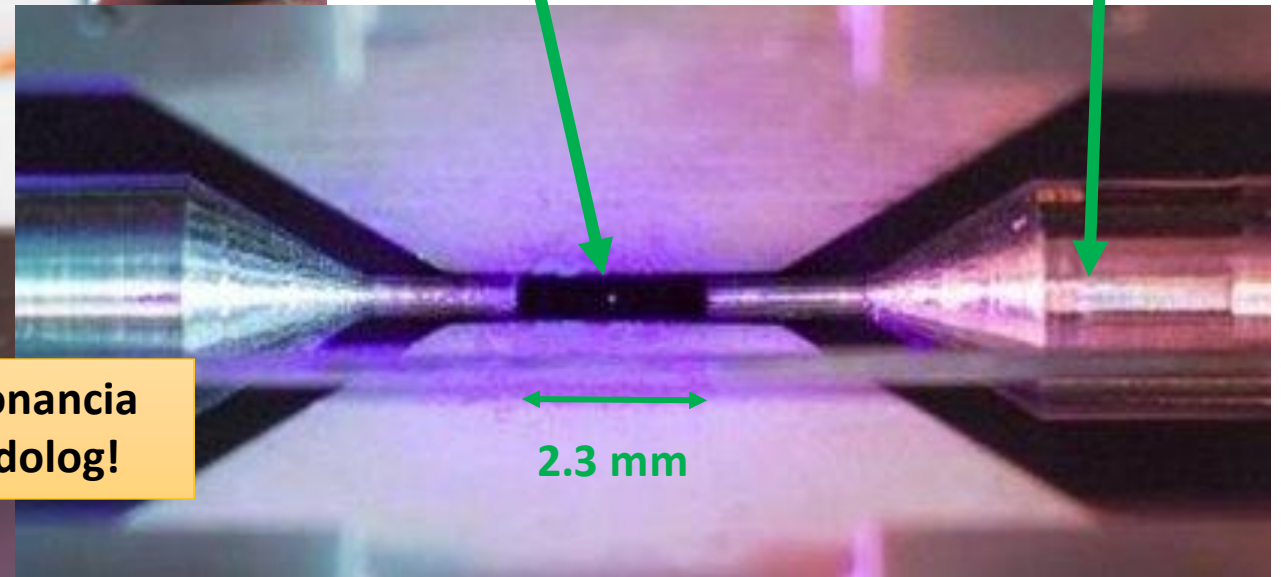
2003	0	0
2004	0	0
2005	0	+1
2006	0	0
2007	0	0
2008	0	+1
2009	0	0
2010	0	0
2011	0	0
2012	+1	0
2013	0	0
2014	0	0
2015	+1	0
2016	0	+1
2017	0	0
2018	0	0
Year	Jun 30	Dec 31
Total	11	16
	27	

A kvantum 2.0 színre lép



1 db atom

10^{23} db atom



A rezonancia
erős dolog!

2.3 mm

Optikai atomórák

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{2\pi f_0 \sqrt{NT_m\tau}}$$

Érdemes növelni az alapfrekvenciát!

- Ioncsapda
 - Előny: hosszú csapdázási idő $\Rightarrow T_m$ nagy lehet; ismételhető detektálás
 - Hátrány: $N=1$ (vagy kevés)
 - Órához és qubithez ugyanazok a műveletek kellene, csak másra kell optimalizálni
- Optikai-rács (sokaság)
 - Előny: sok atom \Rightarrow erősebb jel
 - Hátrány: az atomok kölcsönhatása ill. maga a csapdalézer frekvenciaeltolódást okoz; destruktív detektálás
- Probléma: hogyan mérjük frekvenciát az optikai tartományban?
 - Cs frekvenciája 4.5 nagyságrenddel alacsonyabb

Optikai frekvenciák mérése

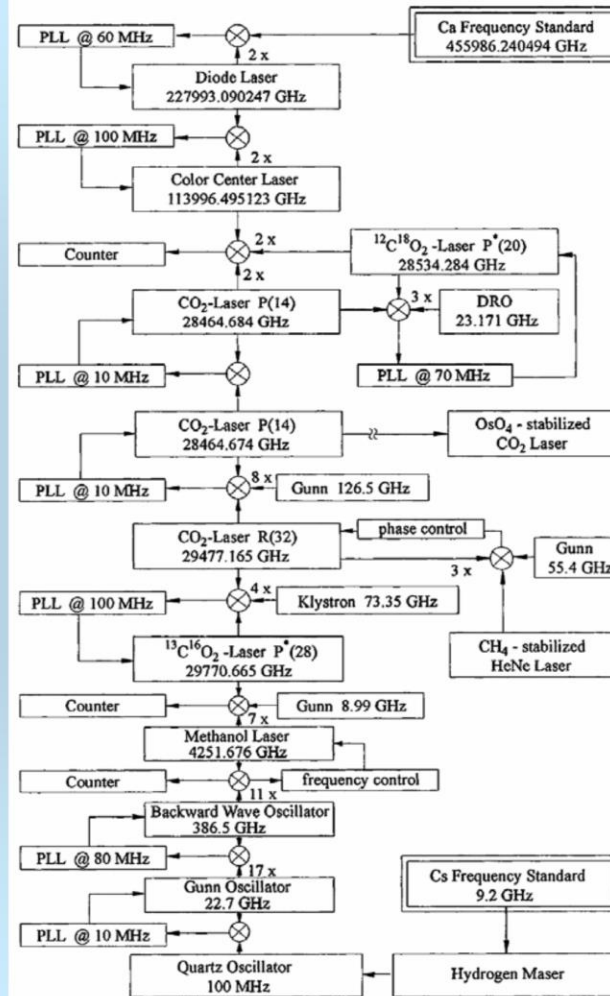
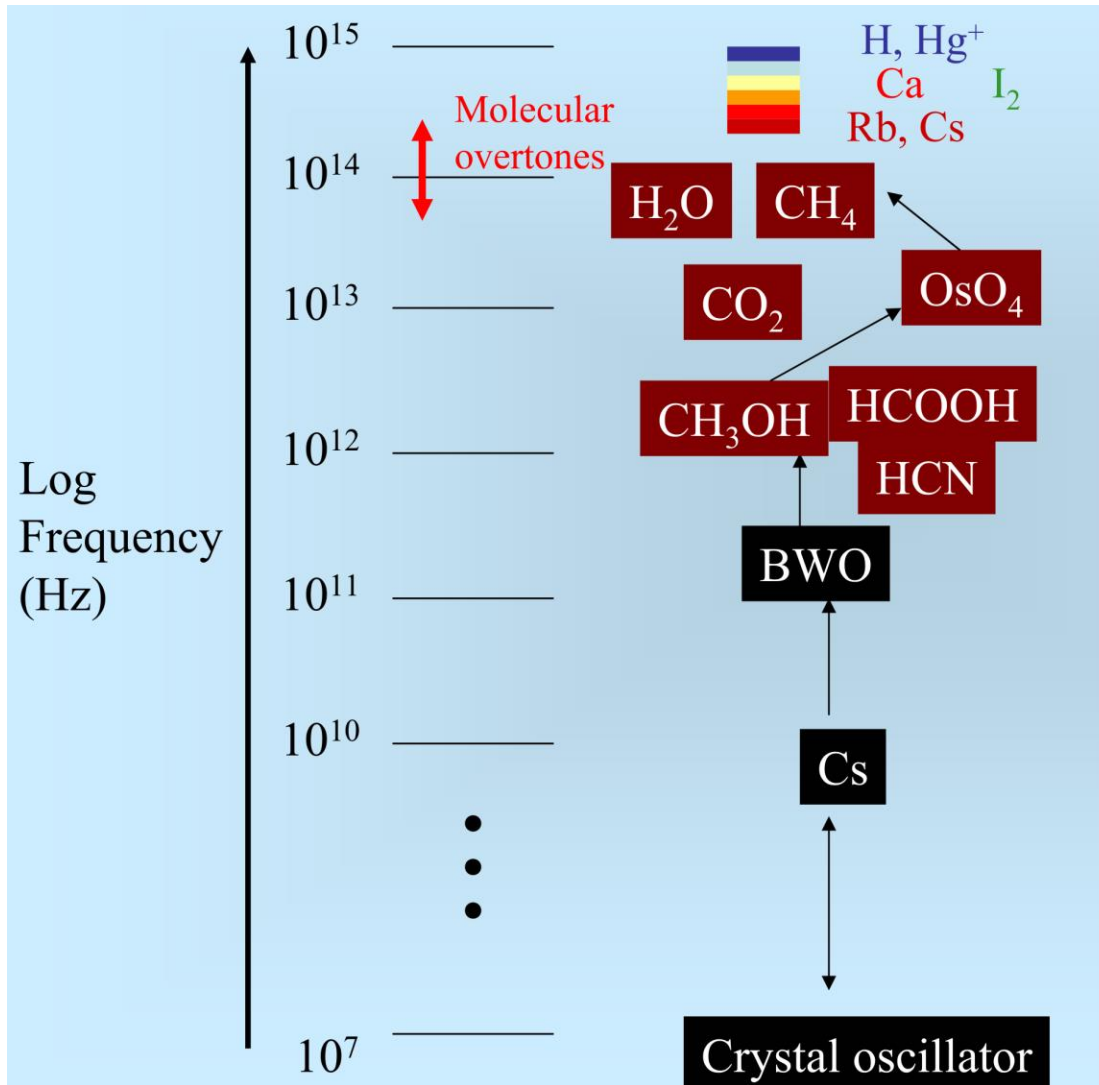


FIG. 1. PTB's frequency chain to the Ca intercombination line (PLL = phase locked loop, details are given in the text).

NIST-1 optikai frekvencialánc

Alapelv:

$$\times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$$

John Hall



Optikai frekvenciák mérése – a frekvenciafésű

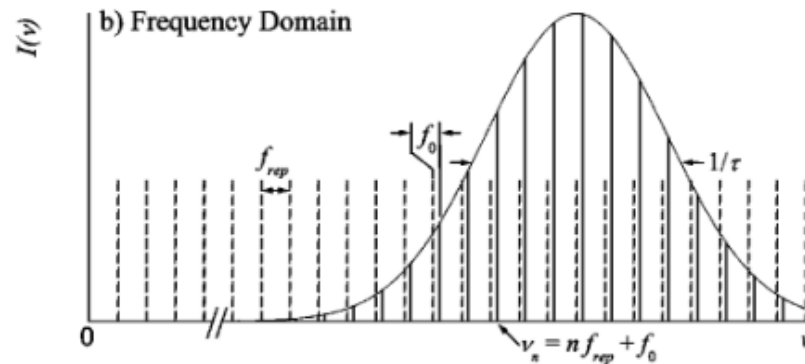
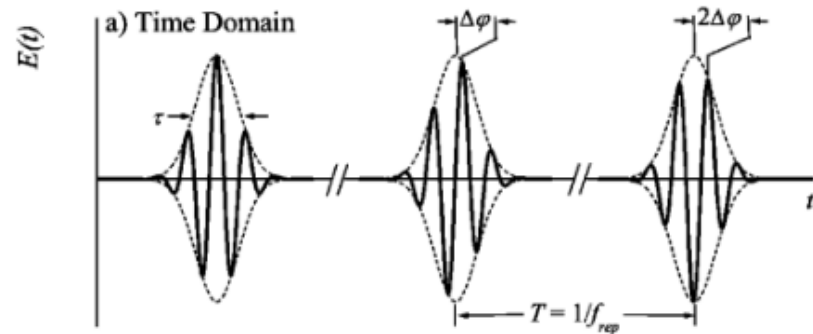
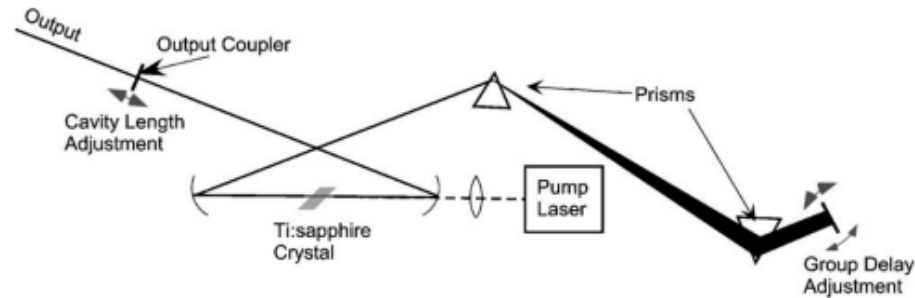
Áttörés: oktávot átfogó fésű ($\tau \sim \text{fs}$)

$$2f_n - f_{2n} = 2(nf_{\text{rep}} + f_0) - (2nf_{\text{rep}} + f_0) = f_0$$

$\Rightarrow f_0$ lebegési jelben \Rightarrow Cs órához rögzíthető
 \Rightarrow optikai frekvenciák lekonvertálhatók
mikrohullámra a fésűvel összelebegtetve

A fizikatörténet egyik legnagyobb sikersztorija!

- 2000: publikáció
- 2005: Nobel-díj
- 2005: kereskedelmi forgalomban kapható termék



Nobel-díj 2005

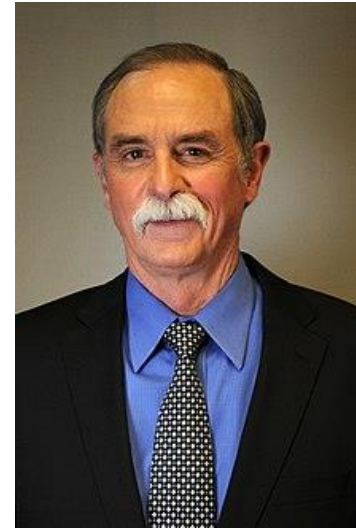
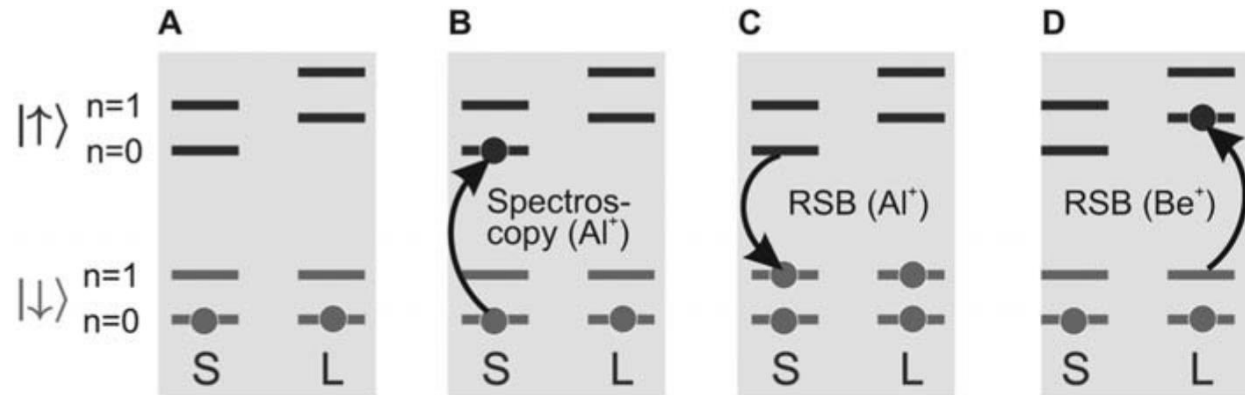
Theodor W. Hänsch



John Hall



Kvantum-logikai óra



David Wineland
Nobel-díj 2012

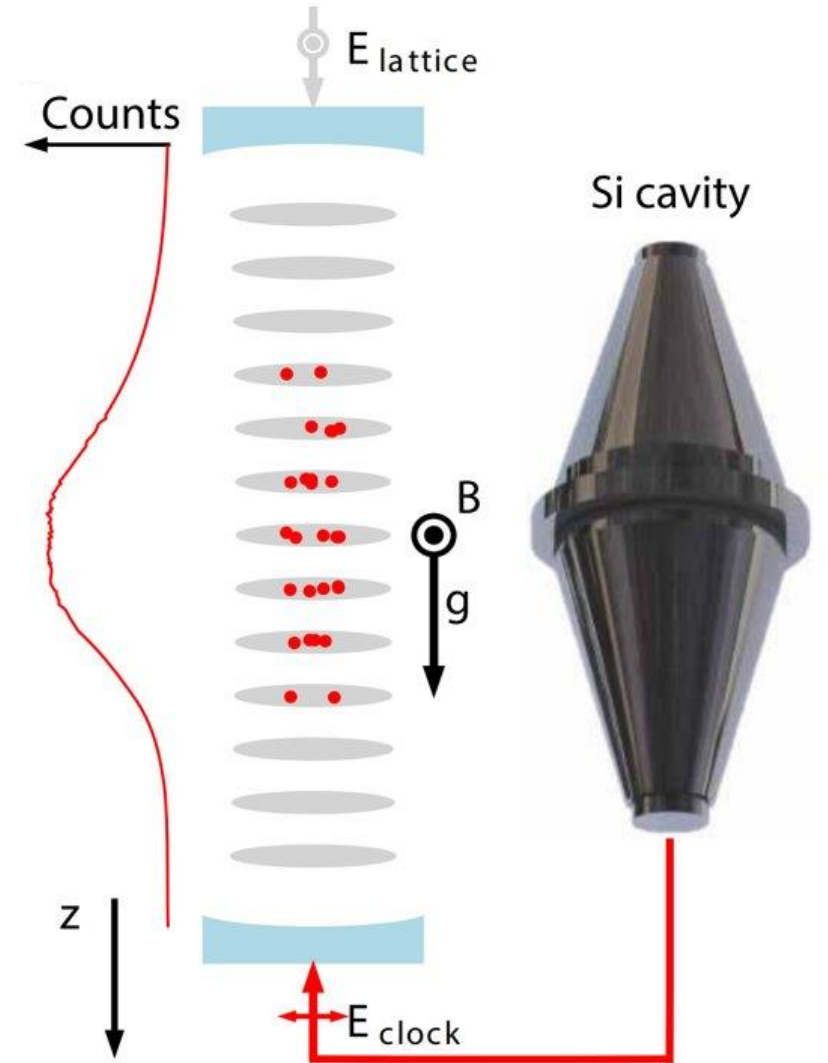
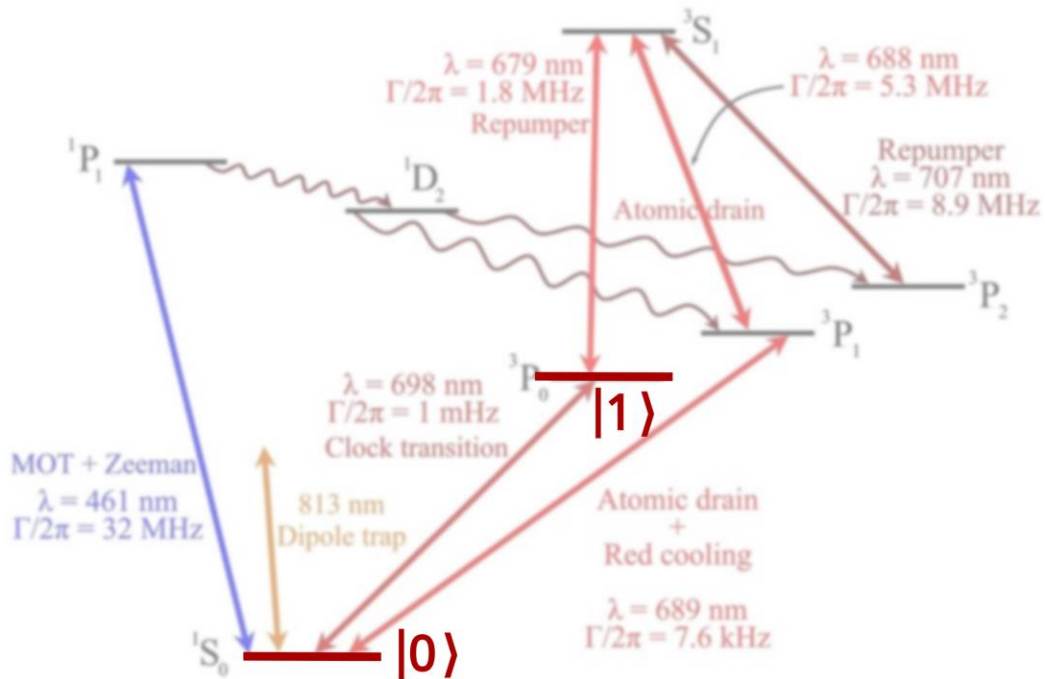
- $^{27}\text{Al}^+$ (óra) és $^9\text{Be}^+$ (segéd) ionok közös csapdában
- Kvantum-szuperpozíció átvitele a közös rezgési móduson keresztül

A stroncium-rács óra



X. Y.
Nobel-díj 20??

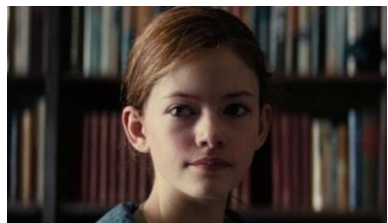
- mágikus hullámhossz
- keskeny vonalú hűtés
- millihertz-es természetes vonalszélesség



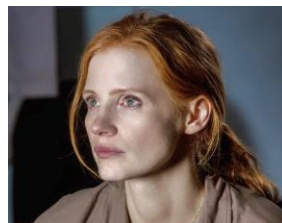
Az optikai óra újszerű alkalmazásai

- Kronometrikus geodézia (10^{-18} stabilitás)
 - szállítható óra
- Gravitációs hullámok detektálása
- Alapvető fizikai állandók időfüggésének vizsgálata
 - finomszerkezeti állandóra és elektron/proton tömegarányra való érzékenység
⇒ sötétanyag-kutatás
- Másodperc-újradefiniálás?

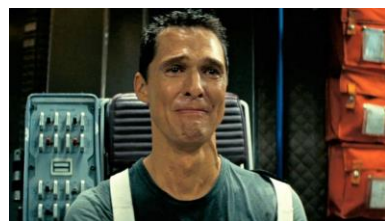
Gravitációs időlelassulás



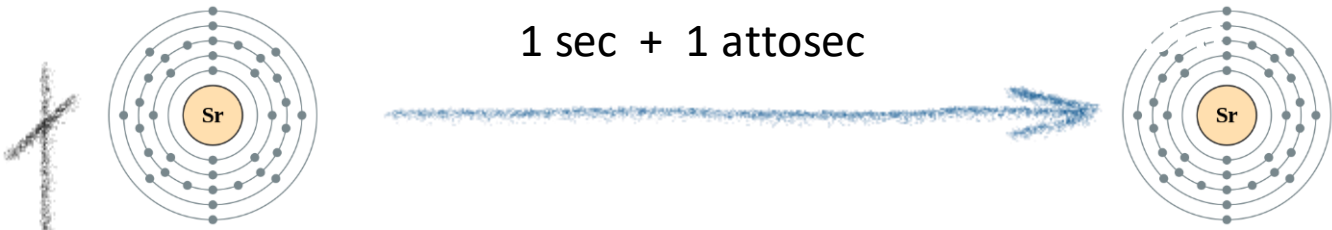
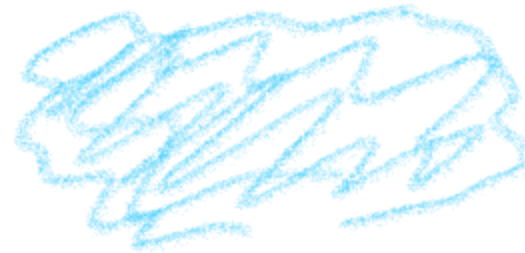
🕒 23 év



🕒 néhány óra



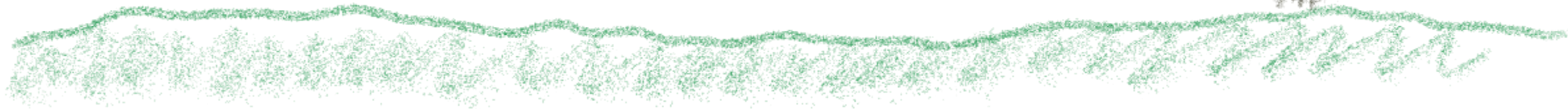
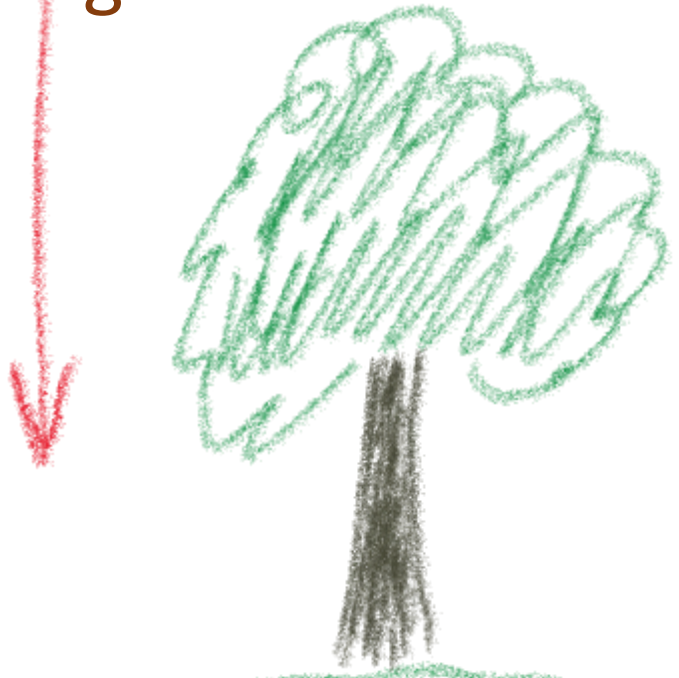
Gravitációs időlelassulás \Rightarrow g mérése



$\Delta h =$ néhány cm

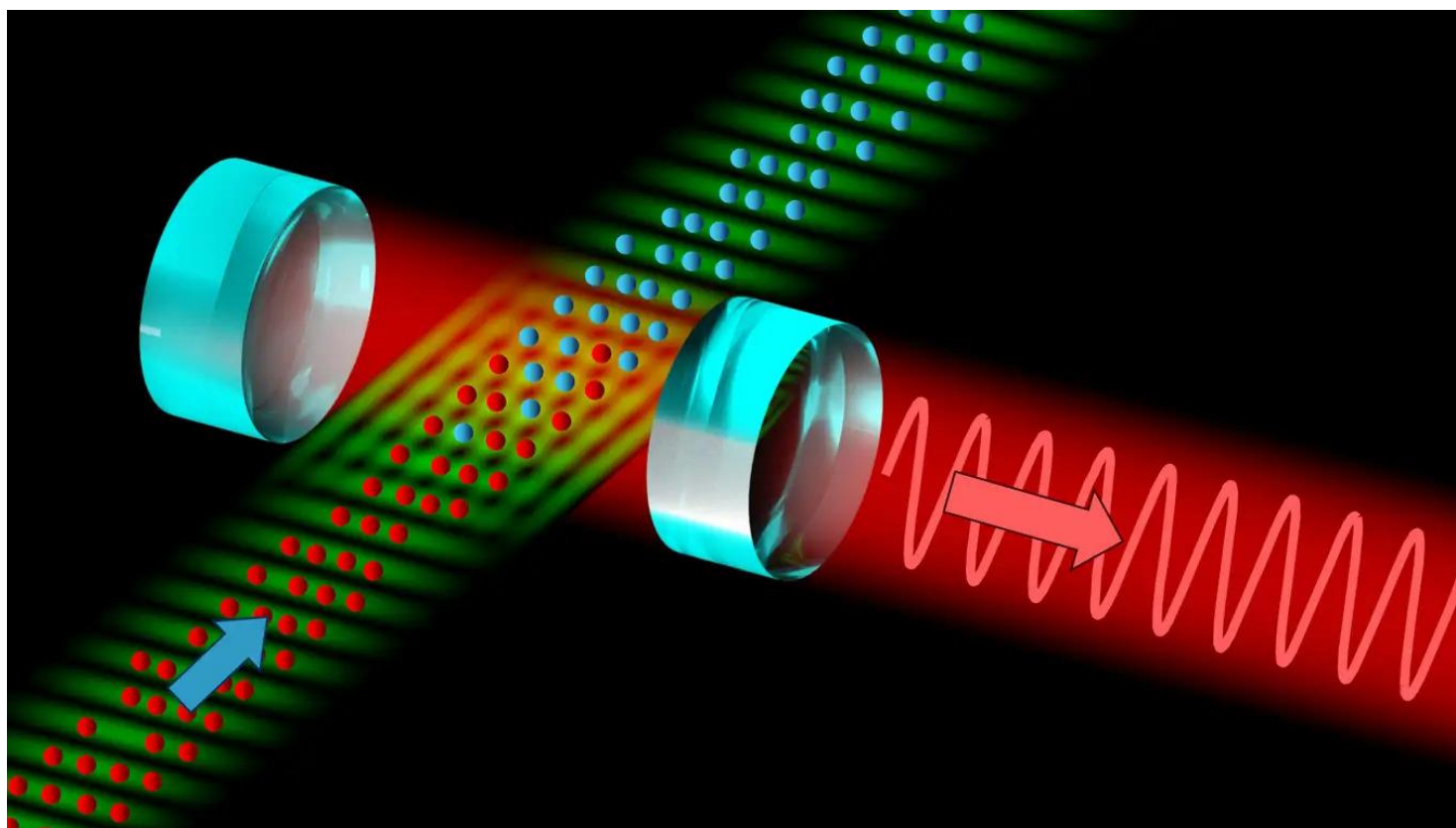
$$10^{-18} = \frac{\delta f}{f_0} = \frac{g \Delta h}{c^2}$$

g



Kitekintés: aktív („szuperradiáns”) optikai órák

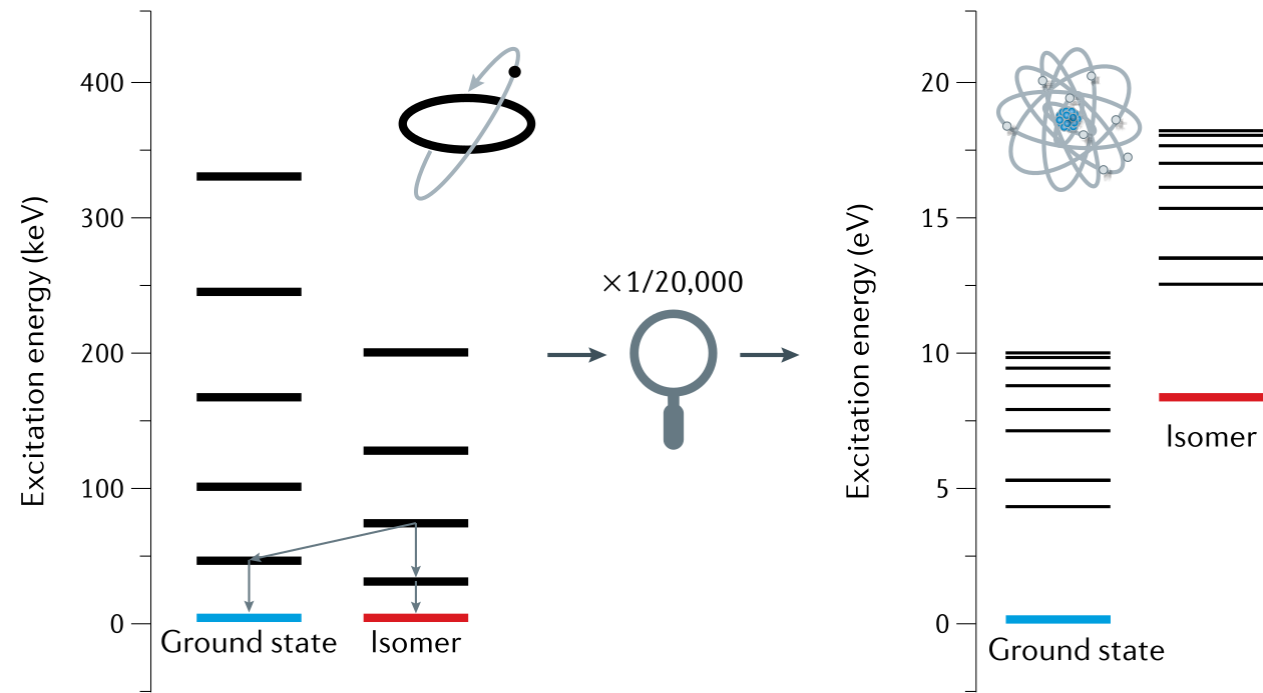
Működési elv a mézer mintájára (≠ lézer !)



rossz vs. jó rezonátor

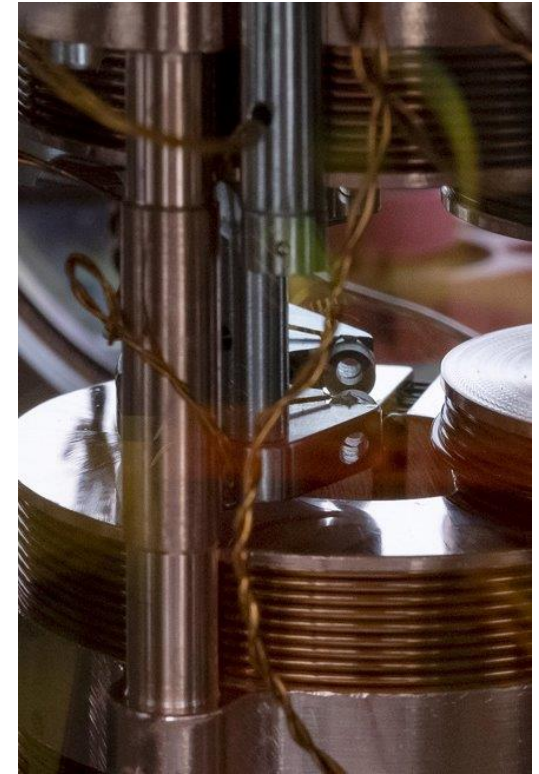
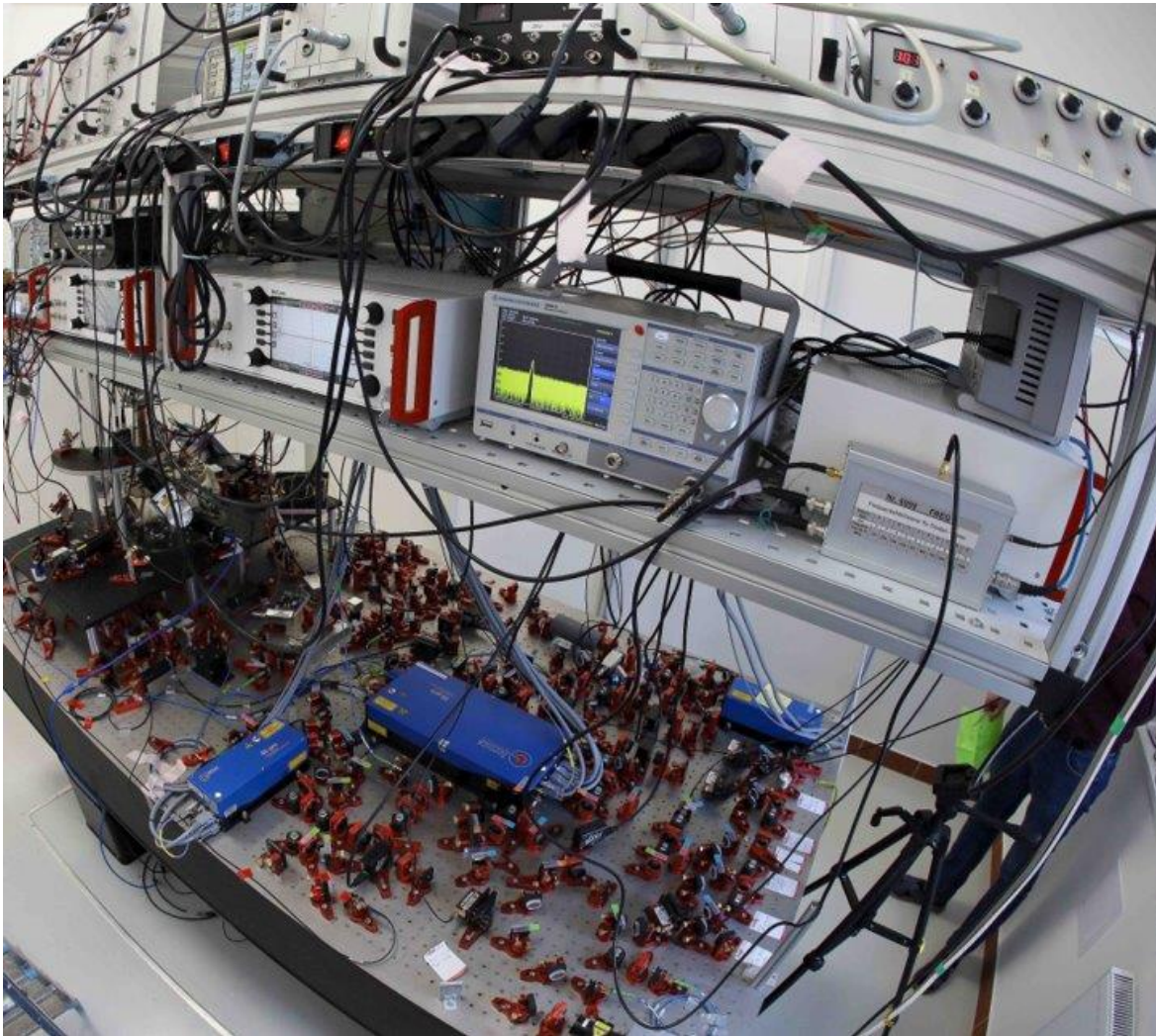
= aktív vs. passzív frekvenciareferencia

Kitekintés: ^{229}Th nukleáris óra



- 8 eV-os nukleáris izomer
- Nagy előny: kémiai kötések nem hatnak a mag-átmenetekre \Rightarrow akár kristályban is lehet.
- Ioncsapda vagy (átlátszó!) adalékolt kristály
- Hátrány: XUV tartományban
- Nagyon ritka izotóp, kb. 40g van belőle

Kvantumoptika a Wigner FK-ban



- $\approx 10 \mu\text{K}$ hőmérsékletű Rb gáz
- erősen csatolt optikai rezonátor
- kvantuminformaticai és kvantummetrológiai alkalmazások előkészítése