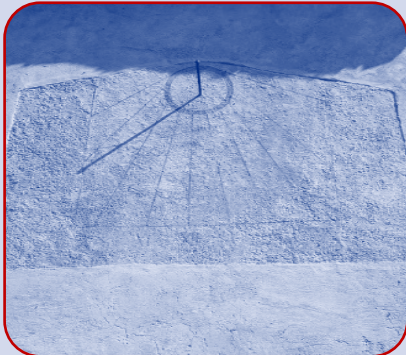


# Koherentní reference a optické kvantové hodiny v Evropě a v České republice (iniciativa FOREST)

Jan Hrabina, ÚPT AV ČR

## Jednotlivé typy hodin



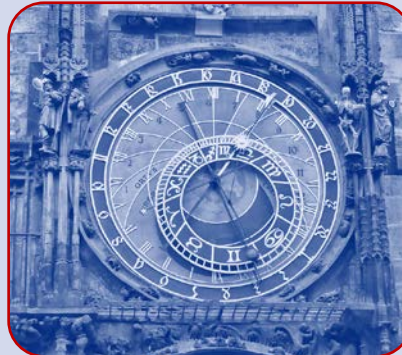
### Sluneční hodiny

Obelisky: ~5000 let  
Stupnice: ~3500 let  
Skloněné: ~700 let



### Vodní hodiny

- Klepsydra
- ~3500-2500 let
- Vytékací vs. natékací



### Mechanické hodiny

Hnané pružinou  
Kyvadlo  
Mořské hodiny (setrvačnick)  
Princip ~13.-14. stol.  
17. stol kyvadlo



### Krystalové hodiny

Princip: 1880  
Laboratorní: 1927  
Náramkové: 1969

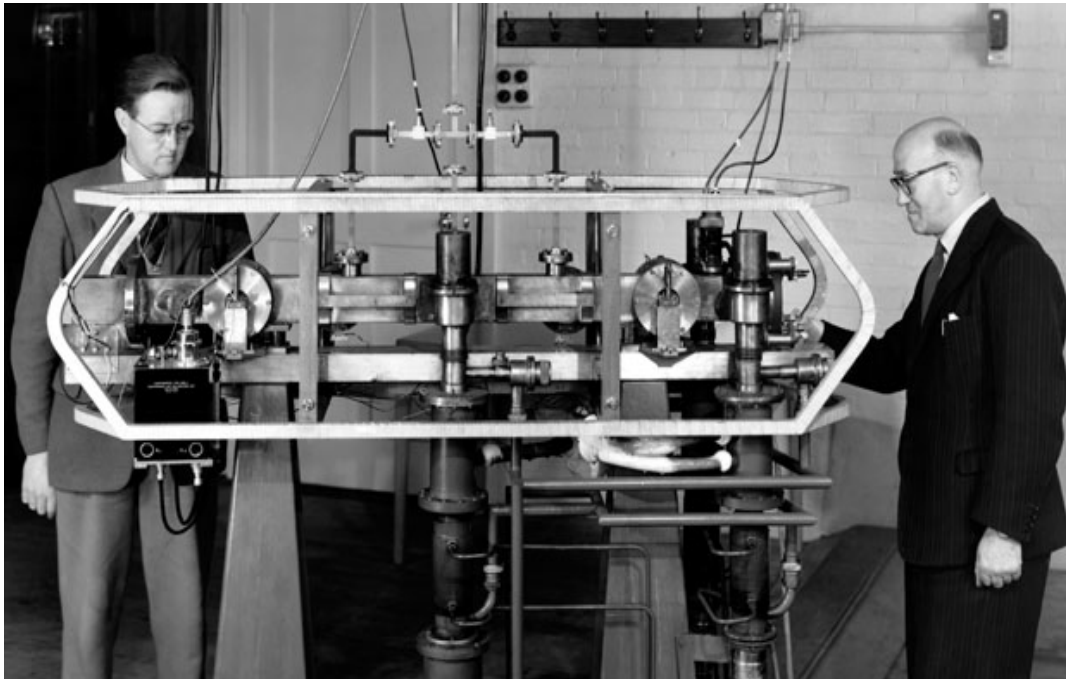


### Atomové hodiny

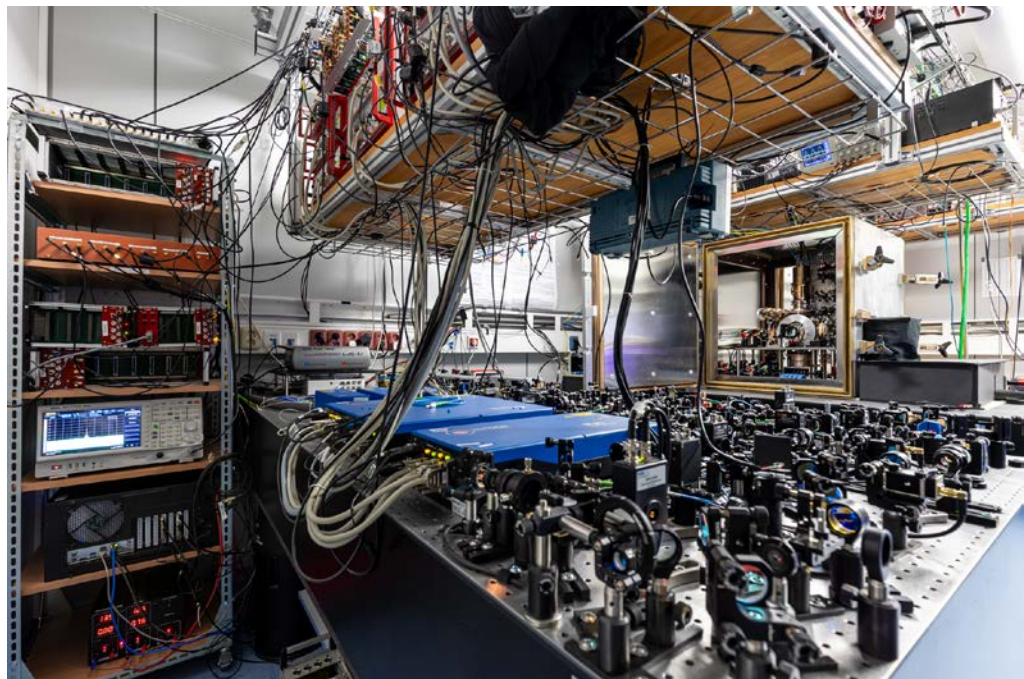
- Cs hodiny
- Rb hodiny
- H-maser
- Cs atomová fontána
- Optické hodiny

## 1 sekunda:

- do roku 1967: definice dle rotace Země (zlomek dne), případně dle oběhu Země kolem Slunce
- **od roku 1967: 1 sekunda je 9 192 631 770 kmitů záření, které odpovídá přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu atomu cesia-133 – Cesiové hodiny**
- budoucnost: optické hodiny?



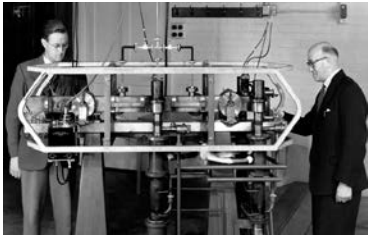
1. Césiové hodiny (NIST USA), 1955



Iontové hodiny s Ca<sup>+</sup> (ÚPT AV ČR), 2025

# Přesný čas

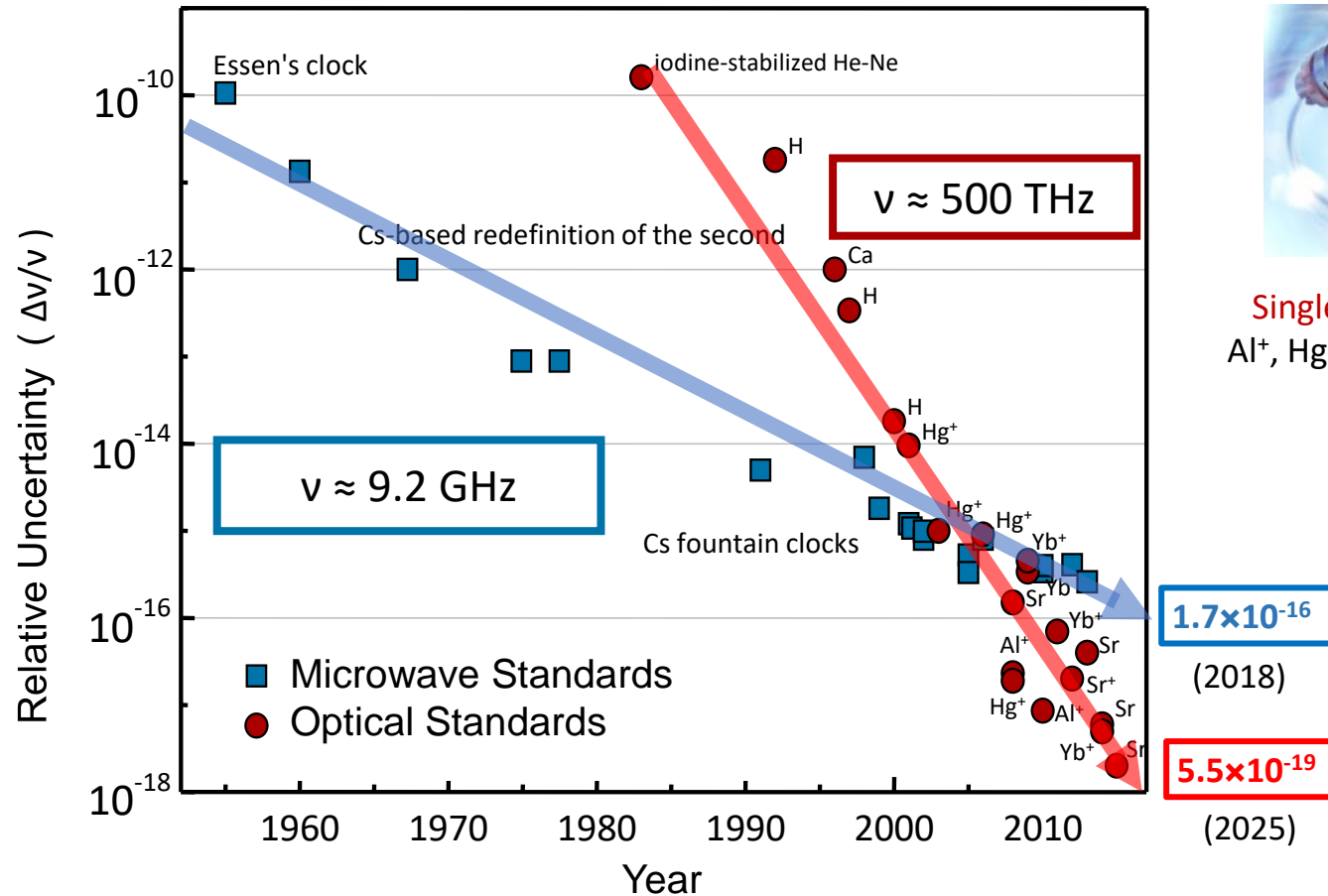
Po desetiletí se metrologické laboratoře vyvíjely, zdokonalovaly své přístroje a udržovaly národní čas



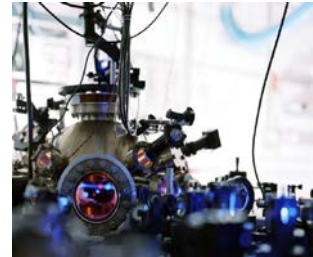
Cs atomic clocks (1955)



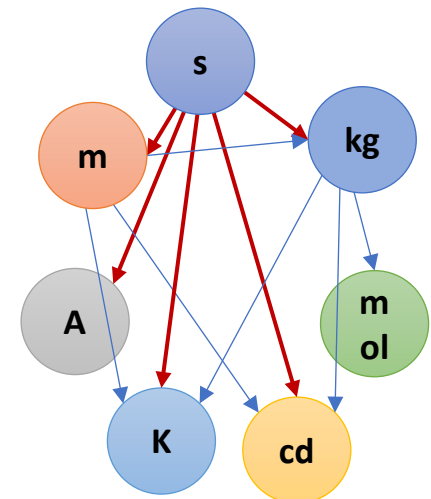
Cs fountain



Single-ion clocks:  
Al<sup>+</sup>, Hg<sup>+</sup>, Yb<sup>+</sup>, Sr<sup>+</sup>, Ca<sup>+</sup>



Neutral atom clocks:  
Sr, Yb, Hg



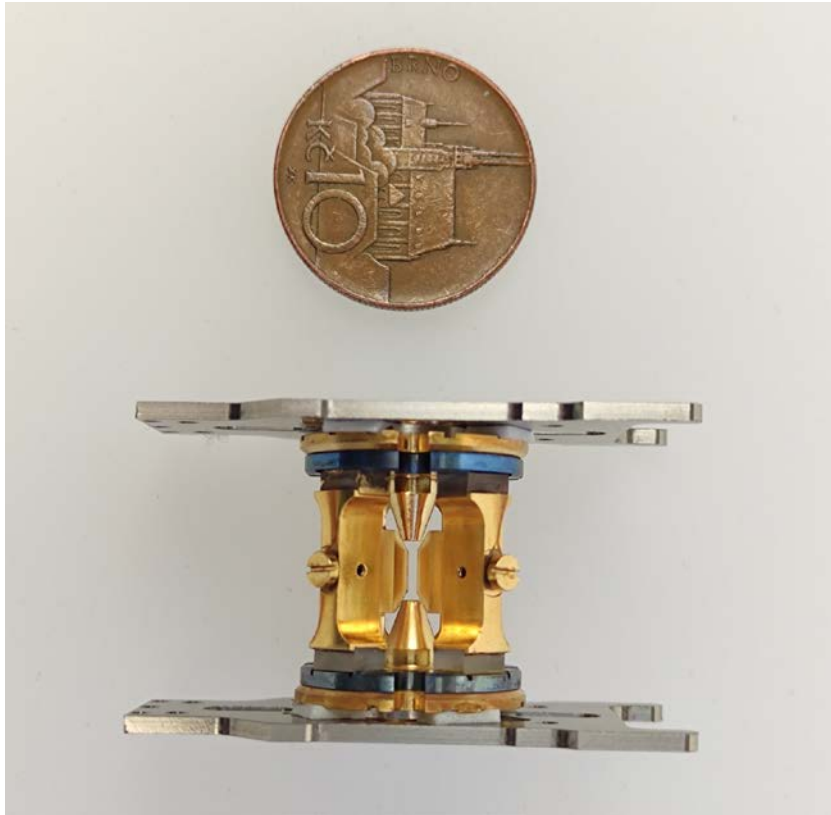
Soustava jednotek SI (2019)

Jednotka času má přednost před definicemi hodnot ostatních jednotek SI, protože se jí podařilo určit s nejvyšší přesností/nejmenší nejistotou, tedy  $<10^{-18}$

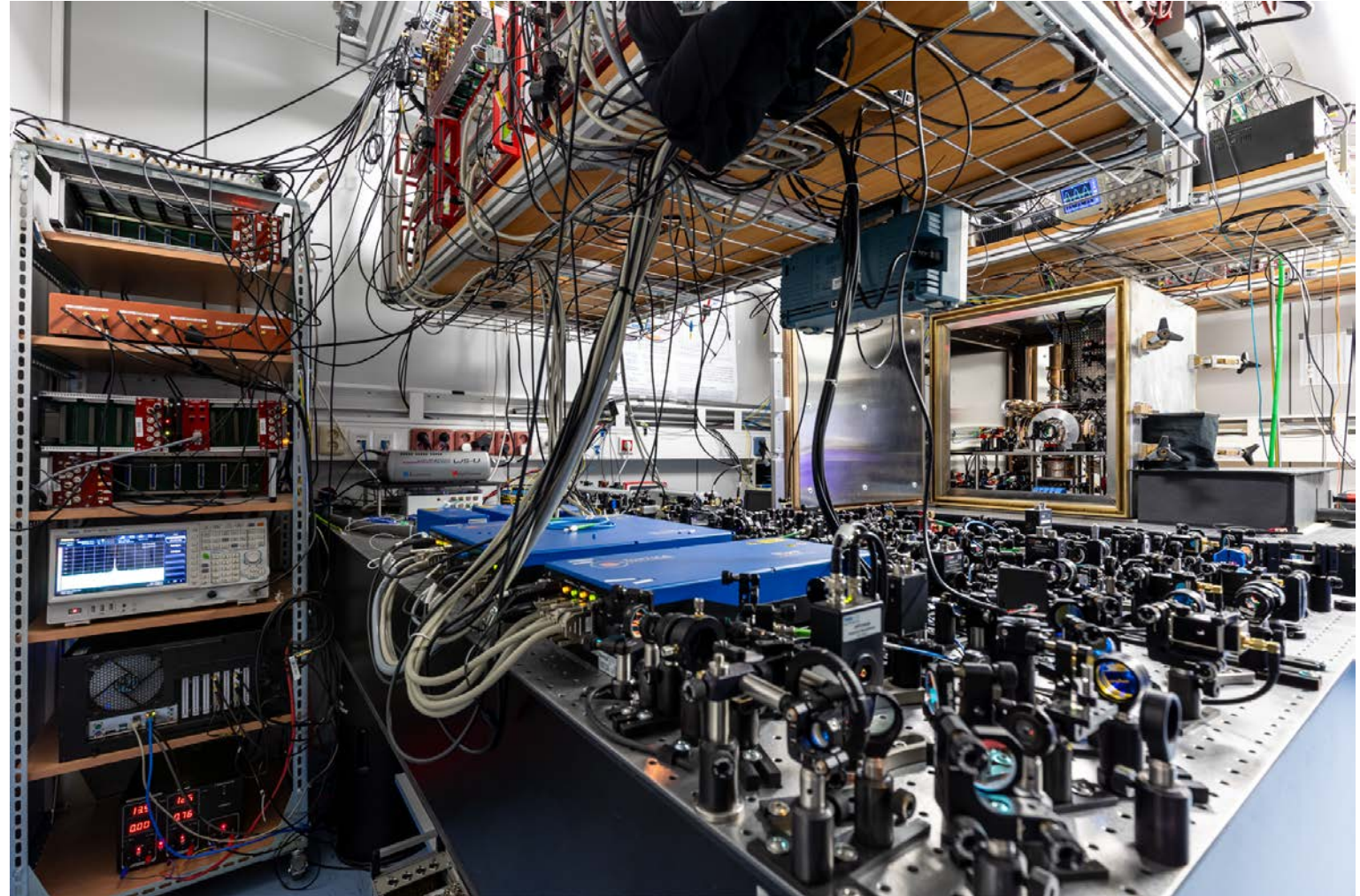
# Iontové optické hodiny na ÚPT AV ČR

## Ca<sup>+</sup> iontové hodiny ÚPT

- 2014: start projektu
- 2015: první zachycené ionty
- 2025: frekvenční stabilita  $\sim 5 \cdot 10^{-17}$



Laboratoř Ca<sup>+</sup> iontových hodin, ÚPT



# Distribuce přesného času a frekvence

## Proč to potřebujeme?

- Synchronizace distribuovaných sítí
- Porovnávání hodin, timescale
- Bezpečnost a výzkum

### Komerční hodiny

Cs clocks, H-maser

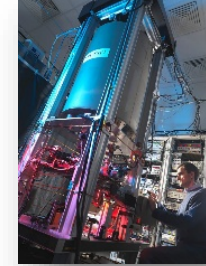
$10^{-14} \approx 1 \text{ ns} / 1 \text{ day}$



### Atomové fontány

eg. Cs fountains

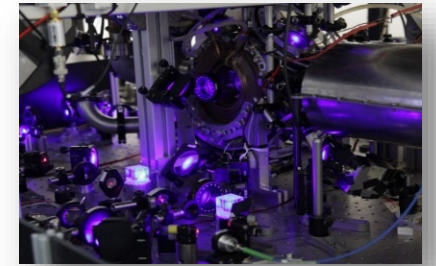
$10^{-16} \approx 100 \text{ ps} / 10 \text{ day}$



### Optické hodiny

Sr clocks

$10^{-18} \approx 1 \text{ ps} / 10 \text{ day}$



Satelitní metody



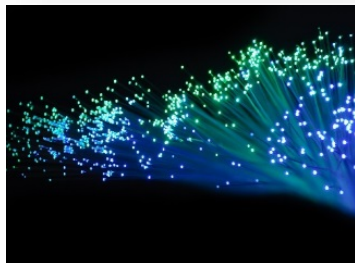
GNSS



TW



Fotonické sítě



Optická  
vlákna



# Distribuce přesného času po optických vláknech

Metoda / protokol	Aplikace	Požadavek
NTP (>10 ms)		
		1 ms
	Synchronizace fázorů v energetice	
	Synchronizace v telekomunikacích	
PTP (1 ms)	Finanční sektor	1 ms
	Distribuované infrastruktury (teleskopy, akcelerátory)	
WR-PTP (1 ns)		1 ns
ELSTAB (<100 ps)	Navigace a vesmírný výzkum, Timescales	

CI $\tau$ AF = “Czech Infrastructure for Time and Frequency”

Webpage: [citaf.org](http://citaf.org)

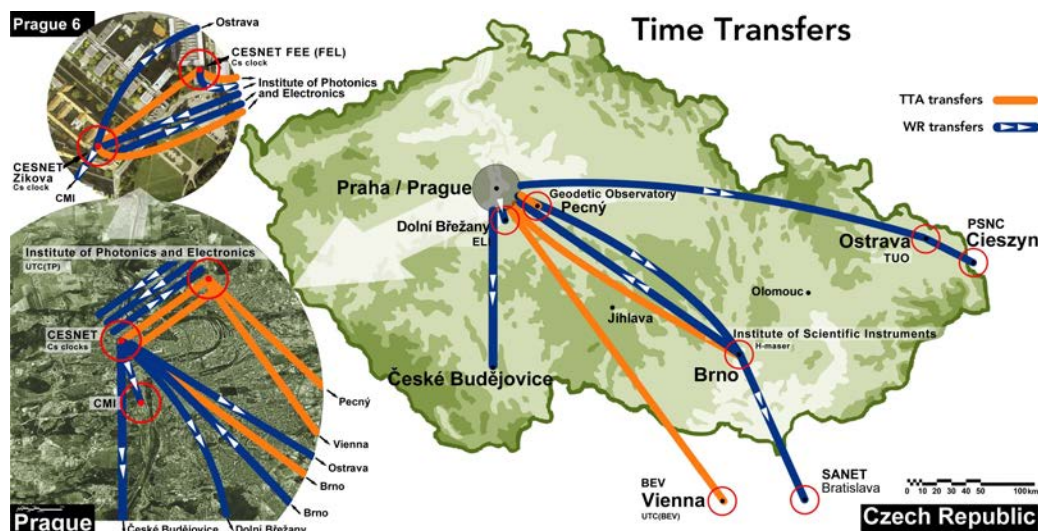
## Hlavní cíle:

- národní platforma pro VaV metod distribuce přesného času a frekvence
- vybudování trvalé národní T&F sítě se “state-of-the-art” parametry, propojení do zahraničí
- podpora národních a mezinárodních projektů a spolupráce
- rozvoj aplikací s využitím distribuovaného přesného času a frekvence

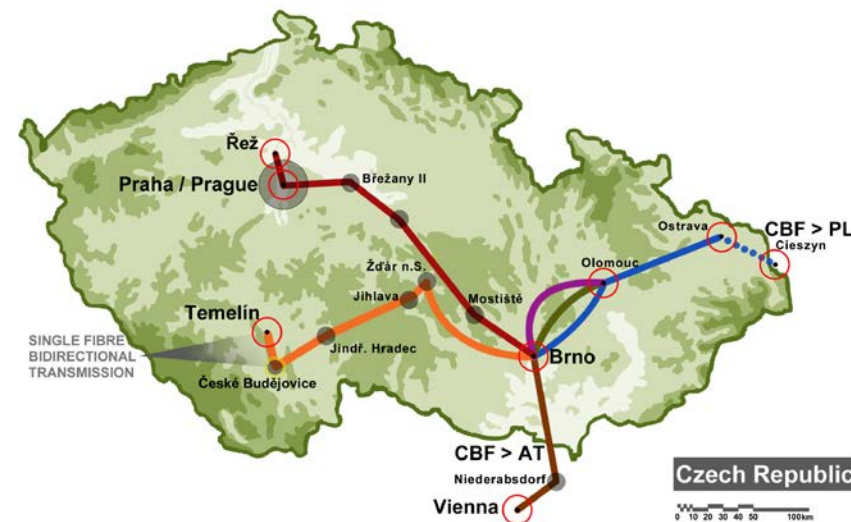
Partneři:



## Přenosy přesného času



## Přenosy koherentní optické frekvence



# Výzkumná infrastruktura ESFRI „FOREST“

FOREST = “Fiber-based Optical netwoRk for European Science and Technology”

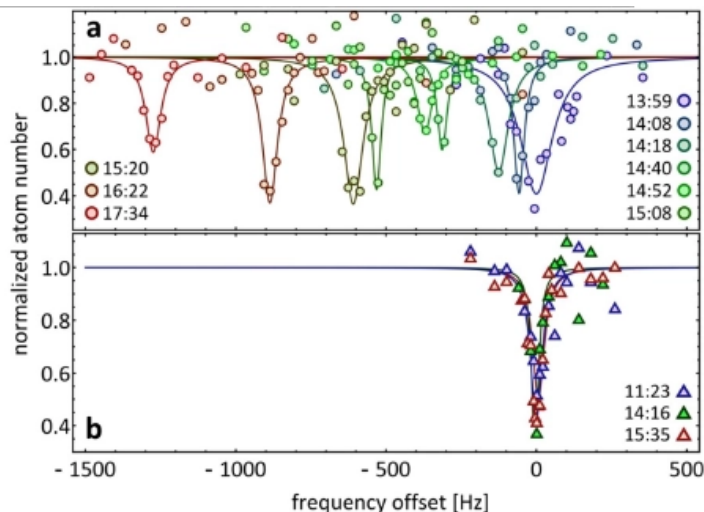
Webpage: [forest-ri.eu](http://forest-ri.eu)

## Hlavní směry:

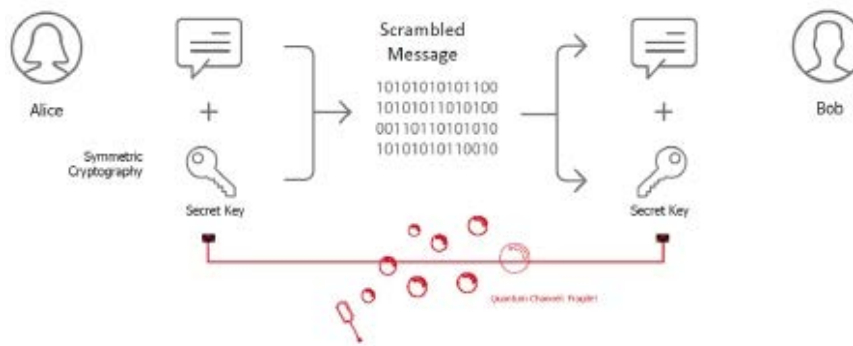
- International metrology and high precision experiments - fundamental and applied physics
- Quantum communication (QKD) - high level of synchronization
- Fibre sensing - geosciences, infrastructures surveillance



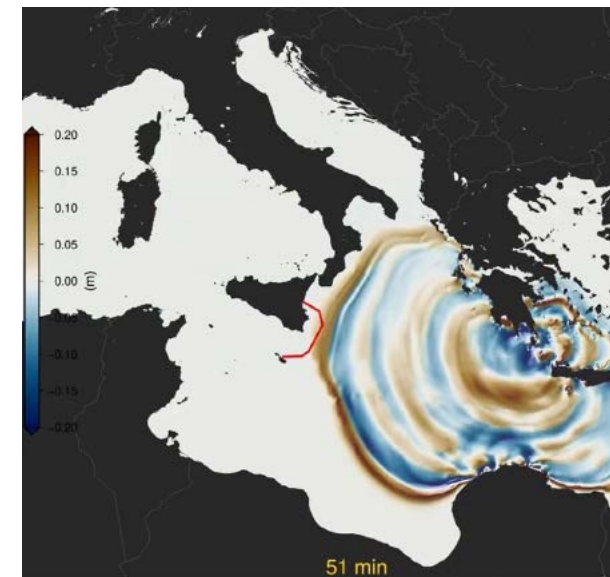
## Experimenty optických hodin



## Šifrovaná komunikace, QKD



## Detekce zemětřesení



# Výzkumná infrastruktura ESFRI „FOREST“



Hlavní koordinátoři:



**Konsorcium 60 institucí ze 17 států EU:**

- 13 národních metrologických institutů
- 13 národních provozovatelů výzkumných a vzdělávacích sítí
- 34 dalších veřejných výzkumných a vzdělávacích institucí

**Podpora:**

- 13 odpovědných ministerstev z 10 států
- Ostatní výzkumné infrastruktury: EPOS, JIVE, LOFAR, ESRF
- Další významné organizace: GEANT, JRC, BIPM, EURAMET, CERN
- 105 podpůrných dopisů od dalších institucí, včetně >20 průmyslových partnerů



[forest-ri.eu](http://forest-ri.eu)

**Optická trasa nesmí znehodnotit stabilitu přenášené optické frekvence.**

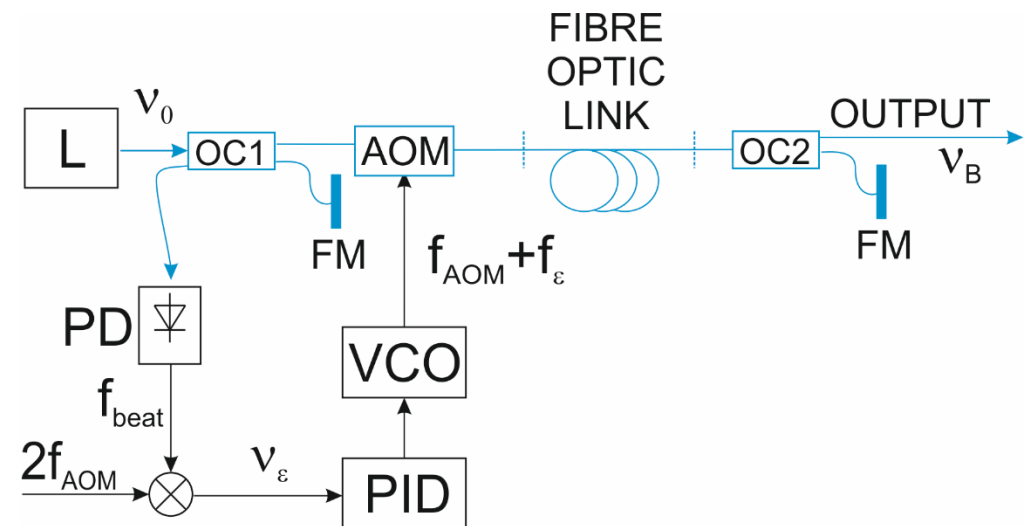
Nestabilizované vlákno vnáší relativní chybu cca v -14. až -13. řádu (ÚPT-CESNET, 90% délky vedeno pod zemí).

Vibrace, teplotní dilatace, změny tlaku aj. se projevují v podobě změn indexu lomu a tím způsobují Dopplerovské posuny optické frekvence a fluktuace transportního zpoždění.

Příklad: Z několik Hz široké spektrální čáry vysoce koherentního laseru se po cestě Brno – Praha a zpět stane čára 5-10 kHz široká. Vibrace od projíždějícího vlaku mohou čáru krátkodobě rozšířit až na 100 kHz.

## Princip kompenzace frekvenčních posunů

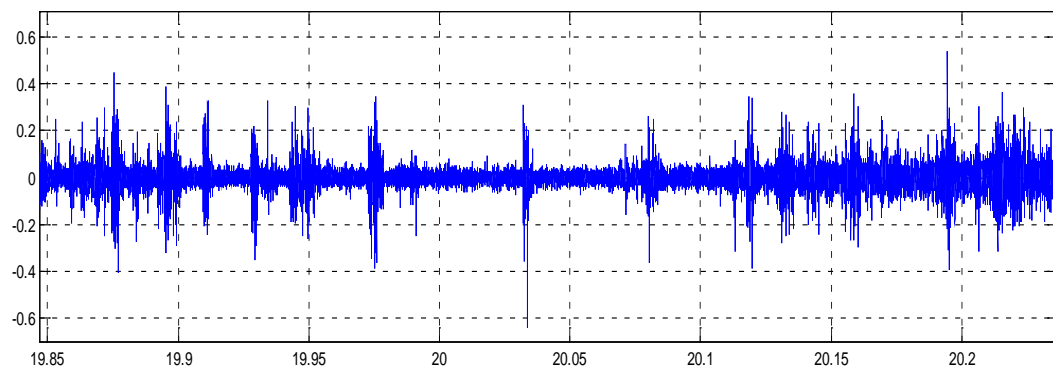
- *Detektor:* Na přijímací straně je měřen rozdíl frekvence mezi vysílaným a odraženým laserovým zářením.
- *Regulátor + akční člen:* Elektronický regulátor generuje FM signál pro AOM. Frekvenci vysílaného světla posouvá tak, aby byl rozdíl mezi frekvencí vysílaného a odraženého světla nulový, čímž dojde ke kompenzaci Dopplerova jevu.



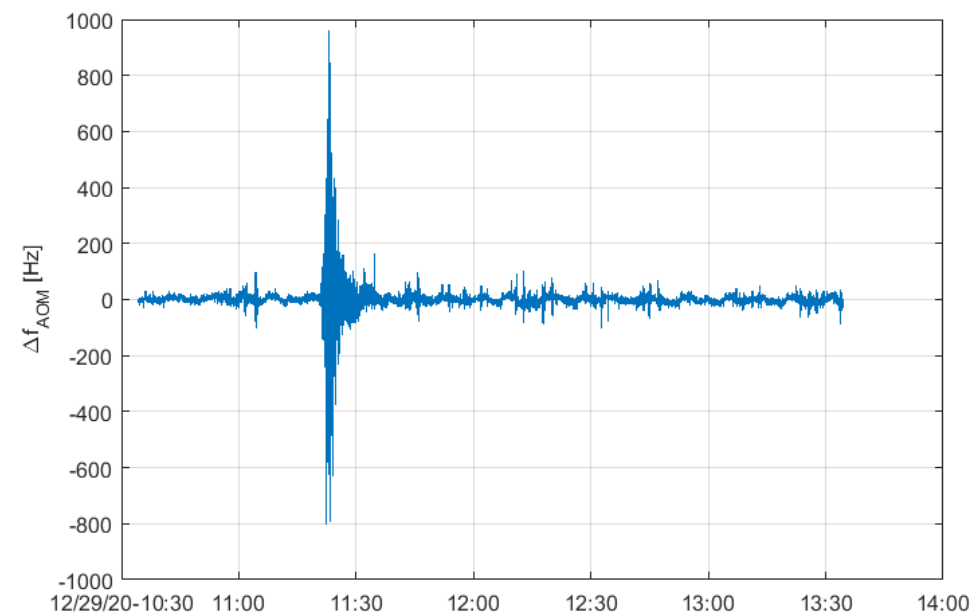
## Indukovaný Dopplerovský šum lze využít k senzorce

- vibrace, teplotní změny, změny tlaku
- s využitím pokročilých korelačních metod lokalizujeme místo události

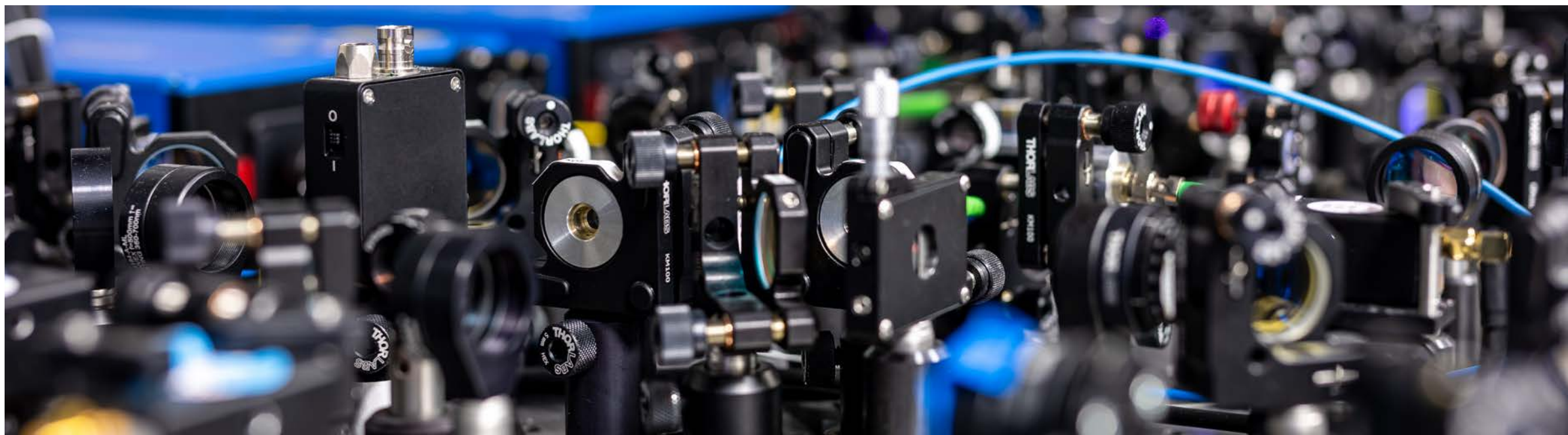
## BRNĚNSKÉ ROZJEZDY



Sensing v JE Temelín



Zemětřesení v Chorvatsku 29.12.2020 na lince ÚPT-CESNET



**Děkuji za vaši pozornost.**

Jan Hrabina, kontakt: [hrabina@isibrno.cz](mailto:hrabina@isibrno.cz)

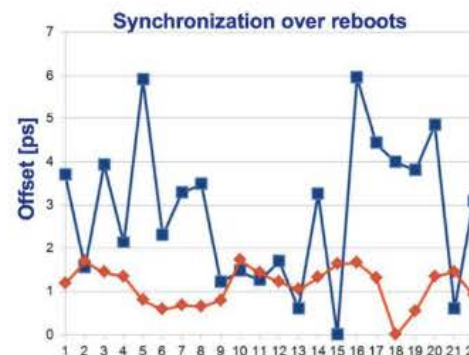
### Why is WR important?

- WR offers a solution that is unmatched by other technologies
- Gaining rapid acceptance among network operators
- IEEE standards support
- But still room for greater adoption

### White Rabbit performance today

#### Time transfer performance

- Network-level: < 1ns accuracy
- A single link (<10km): < 20ps accuracy
- Long-distance support: ~1000km



Time (1 PPS)  
Clock (62.5MHz)

#### Frequency transfer performance

- Standard: 11ps RMS
- Low jitter: 2ps RMS
- Best jitter: 100fs RMS

