



Synchronizacja fazy systemów w.cz w akceleratorach cząstek elementarnych

Krzysztof Czuba

Hardware Design Masterclasses #5

28.11.2025

Akceleratory cząstek elementarnych

- Czarna dziura?
- Badania struktury materii oraz zjawisk w skali subatomowej
- Produkcja radioizotopów
- Produkcja półprzewodników (implantacja jonów)
- Radioterapia i obrazowanie w medycynie
- Sterylizacja sprzętu medycznego oraz żywności
- Na świecie działa ponad 30 000 akceleratorów cząstek elementarnych*

* wg. International Atomic Energy Agency (IAEA)

Particle Accelerators Around the World

Please note that this list does not include accelerators which are used for medical or industrial purposes only.

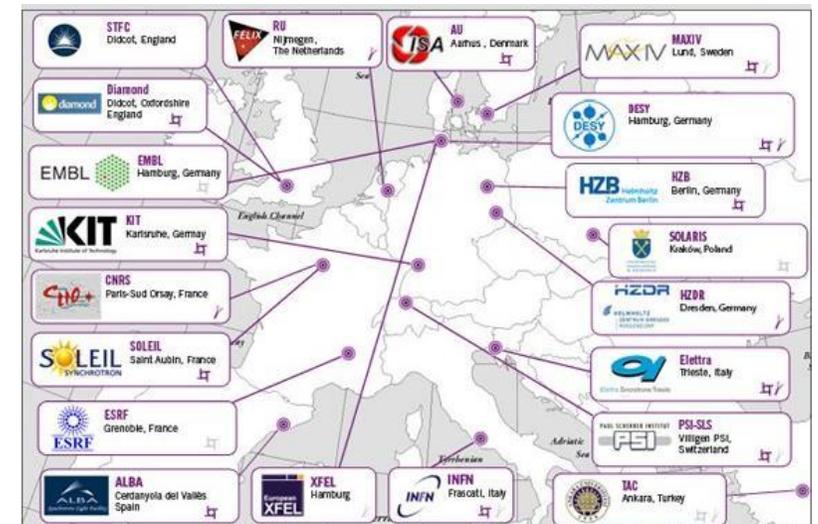
Please visit also the [WWW Virtual library of Beam Physics and Accelerator Technology](#), the [Division of Physics of Beams of the American Physical Society](#), and the [Los Alamos Accelerator Code Group](#).

Sorted by Location

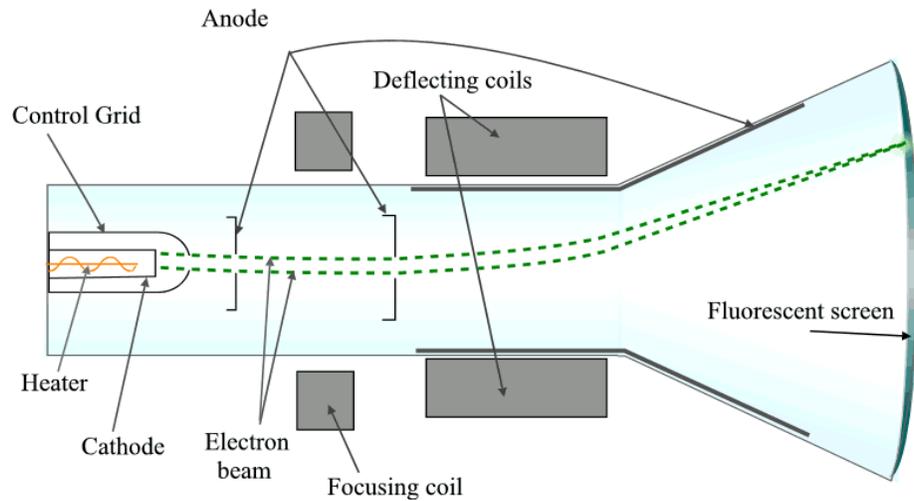
Europe

AGOR Accelerateur Groningen-ORsay, KVI Groningen, Netherlands
ALBA Synchrotron Light Facility, Barcelona, Spain
ANKA Angströmquelle Karlsruhe, Karlsruhe, Germany
ARRONAX Accelerator for Research in Radiochemistry and Oncology in Nantes Atlantique, Saint Herblain, France
BERLinPro Berlin Energy Recovery Linac Project, Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH, Germany
BESSY II Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH, Germany
CeBeTeRad Institute of Nuclear Chemistry and Technology, Warszawa, Poland
CEMHTI Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation, Orléans, France
CERN Centre Européen de Recherche Nucléaire, Geneva, Suisse (LHC, PS-Division, SL-Division)
CMAM Centro de Microanálisis de Materiales, Universidad Autónoma de Madrid, Spain
CNA Centro Nacional de Aceleradores, Seville, Spain
COSY Cooler Synchrotron, IKP, FZ Jülich, Germany (COSY Status)
CYCLONE Cyclotron of Louvain la Neuve, Louvain-la-Neuve, Belgium
DELTA Dortmunder ElekTronenSpeicherring-Anlage, Zentrum für Synchrotronstrahlung der Technischen Universität Dortmund, Germany
DESY Deutsches Elektronen Synchrotron, Hamburg, Germany (XFEL, PETRA III, FLASH, ILC, PITZ)
ELBE ELeCTron source with high Brilliance and low Emittance, Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf e.V. (HZDR), Germany
ELETTRA AREA Science Park, Trieste, Italy
ELSA Electron Stretcher Accelerator, Bonn University, Germany (ELSA status)
ELI Institute of Applied Radiation Chemistry, Technical University of Lodz, Poland

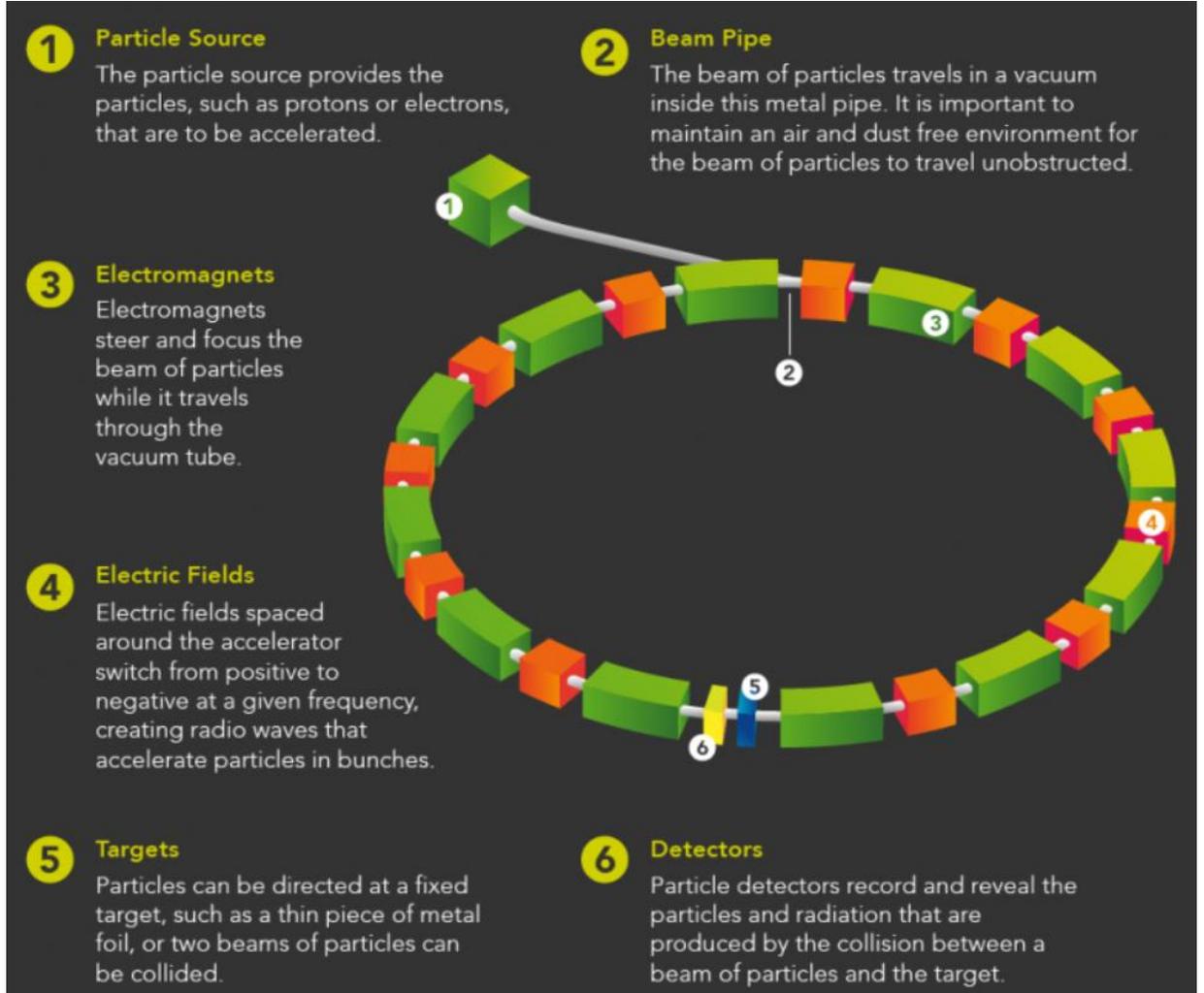
http://www-elsa.physik.uni-bonn.de/accelerator_list.html



Jak działa akcelerator?

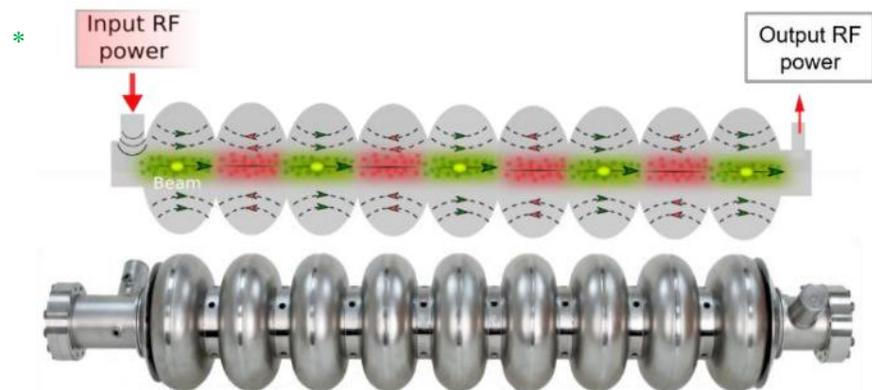


www.forbot.pl

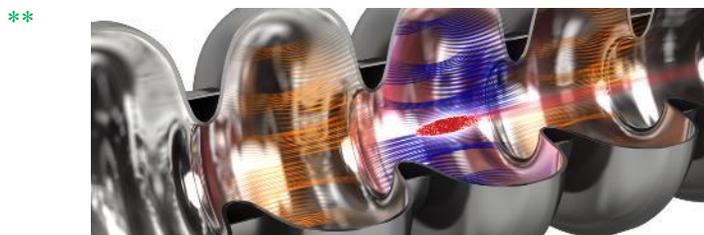


www.energy.gov

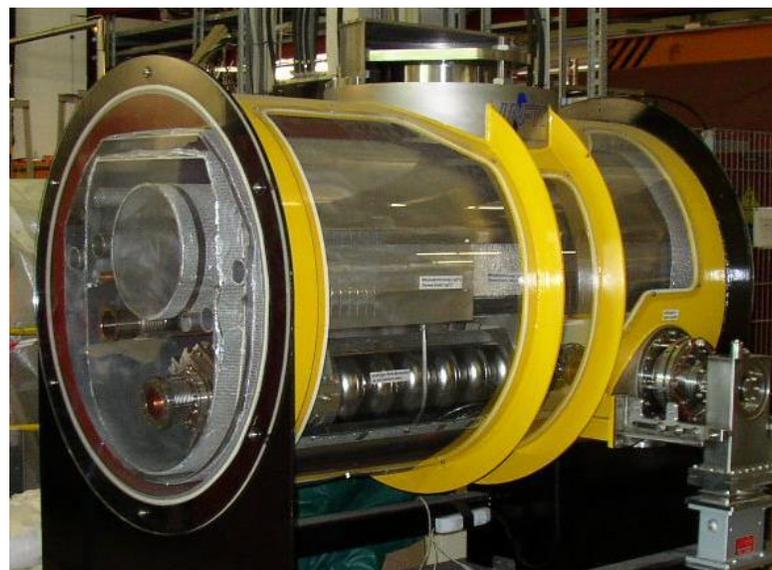
Technologia nadprzewodzących rezonatorów TESLA



- Wykonane z czystego niobu
- Częstotliwość rezonansowa $f_0 = 1,3$ GHz
- Próżnia
- Temperatura 2 K (-271 °C!)
- Dobroć nieobciążona $\sim 10^{10}$
- Gradient pola EM ~ 23 MV/m



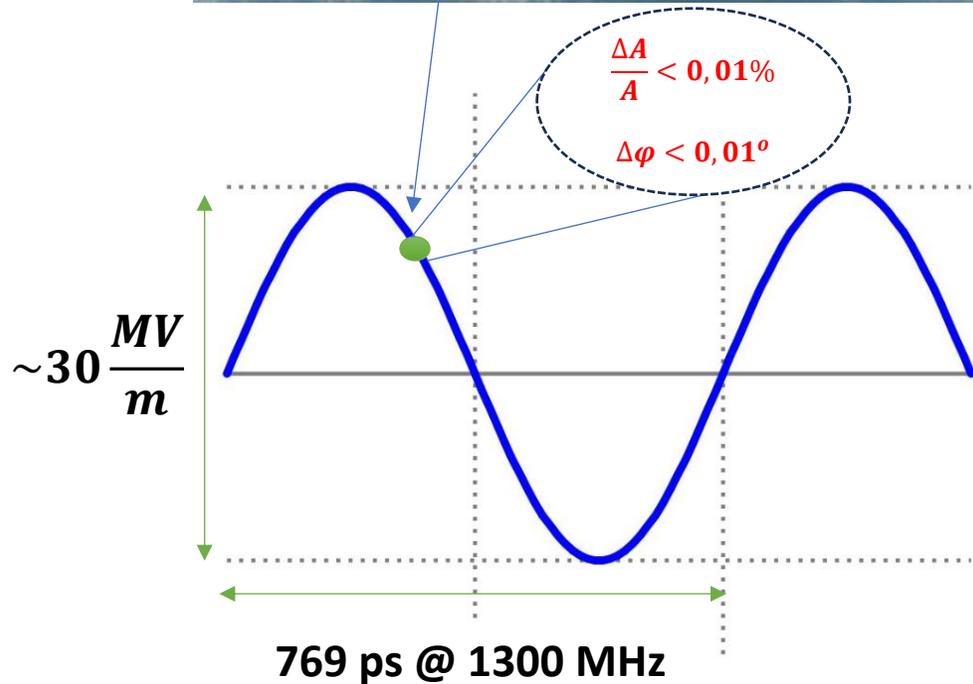
Model kriomodulu



* Oleksandr Hryhorenko et al. „An Innovative Approach ...”, J. Manuf. Mater. Process. 2023

** www.xfel.eu

Przyspieszanie cząsteczek

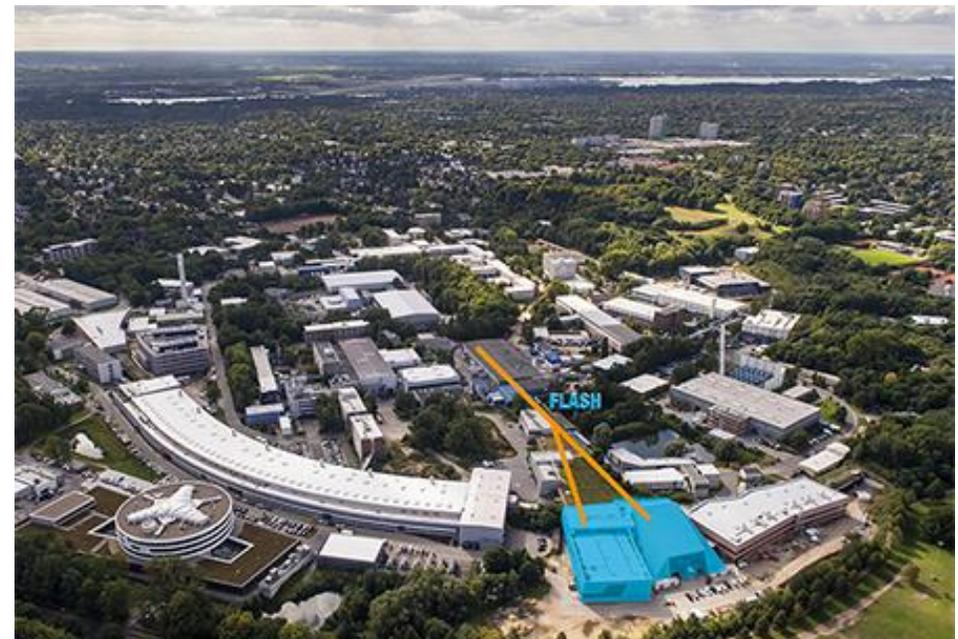


- Cząstki muszą precyzyjnie trafić „na falę”
- Olbrzymie gradienty pola
- Ultrakrótkie czasy

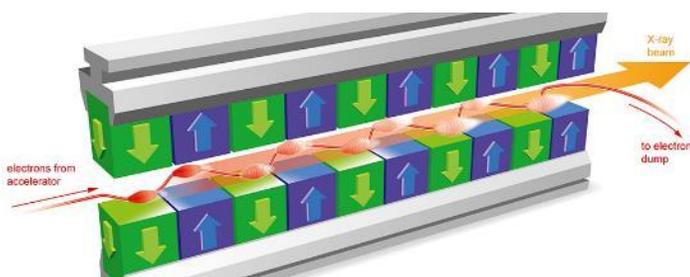
TESLA, TTF2 - FLASH



- Tera-Electronvolt Superconducting Linear Accelerator (33 km) – International Linear Collider
- Tesla Test Facility
- Free-Electron LASer (FLASH) in Hamburg (300m)



Europejski Laser Rentgenowski (European XFEL)



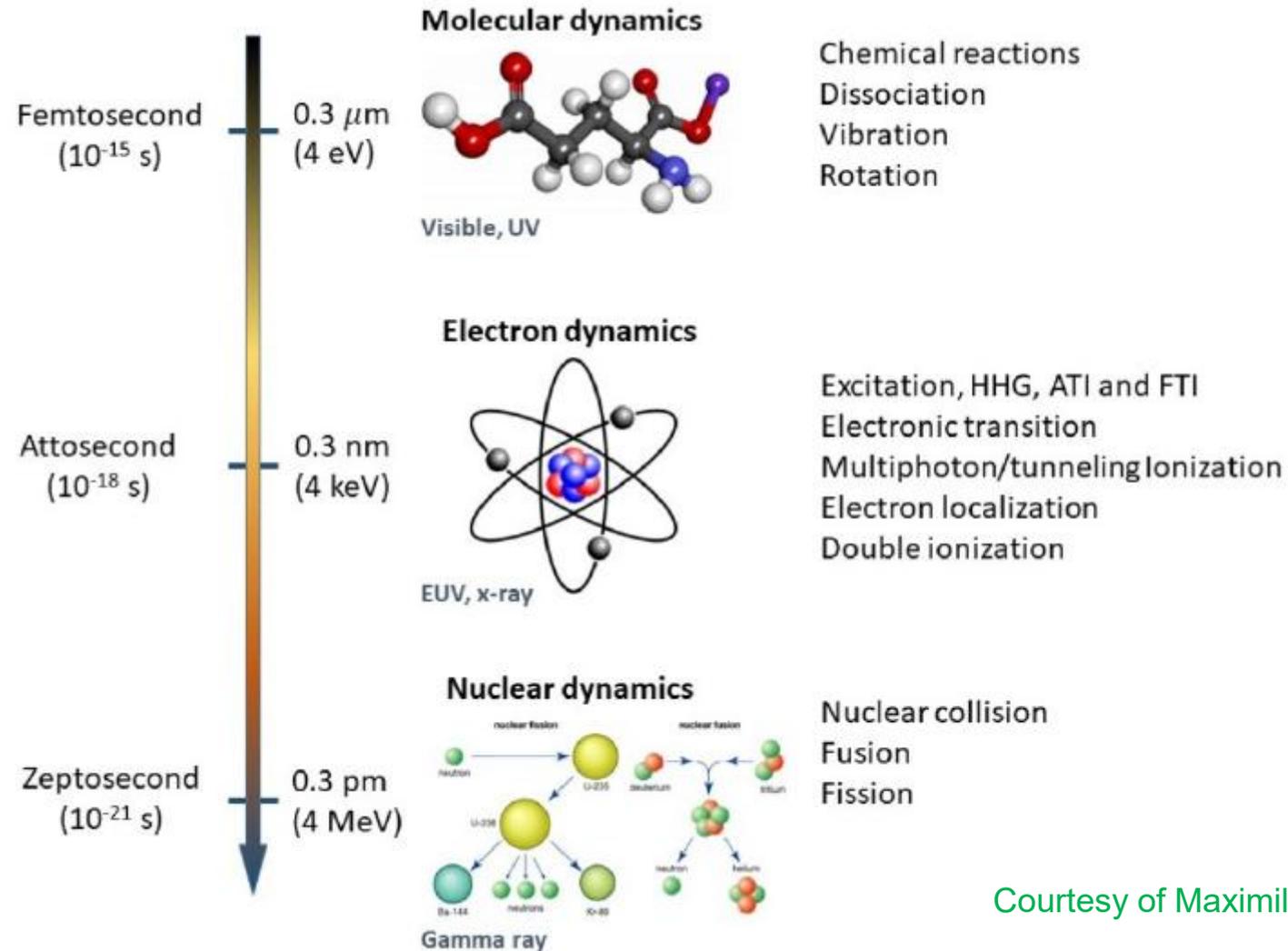
- Pod Hamburgiem
- Długość 3,4 km
- Akcelerator liniowy o długości 1,9 km
- Energia do 17,5 GeV
- łącznie około 7 km tuneli, głębokość do 38 m
- **768 rezonatorów TESLA**
- Do 27 000 koherentnych „błysków” rentgenowskich w czasie 1 sekundy
- **Ponad 10^9 razy większa intensywność** niż w najlepszych klasycznych źródłach rentgenowskich
- Femtosekundowa rozdzielczość czasowa błysków
- **Efekt: mikroskop/kamera o „atomowej” rozdzielczości**

www.xfel.eu

FILM?

HDM #5, Wrocław

Panie, a po co im te femtosekundy?

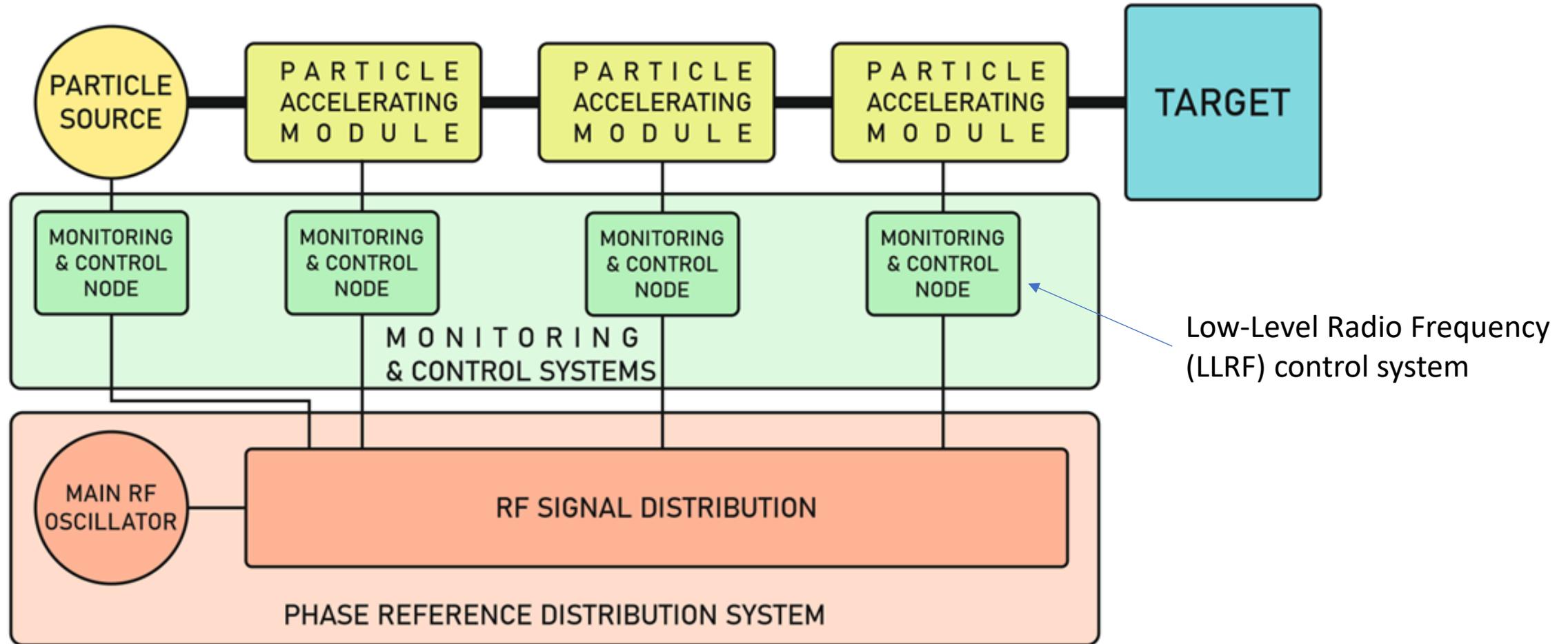


Courtesy of Maximilian Schütte, DESY

Zastosowania elektroniki w akceleratorach liniowych

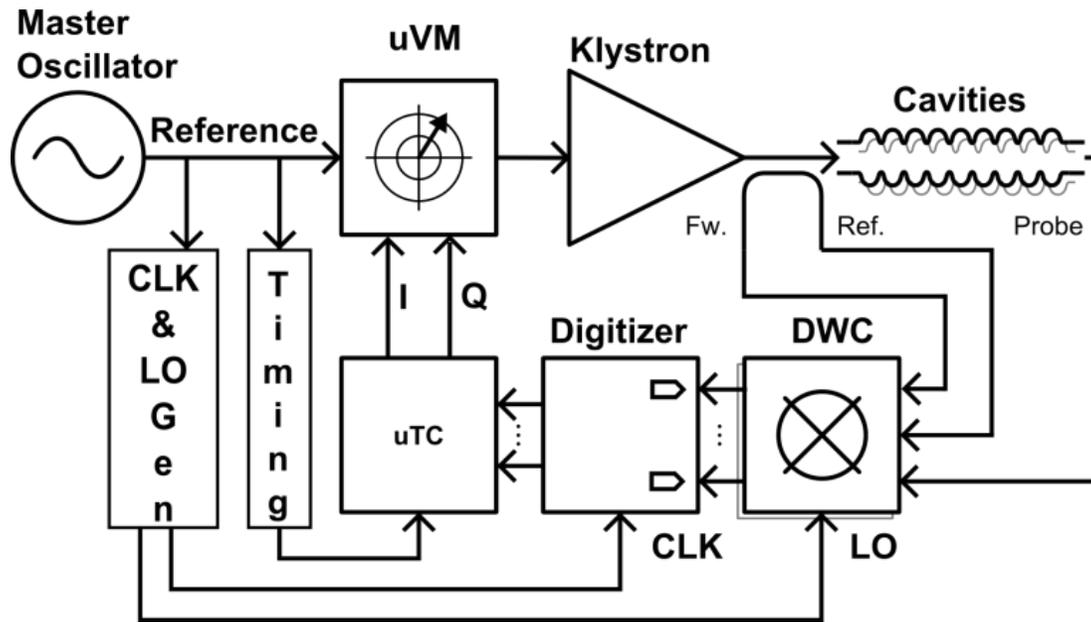
- Sterowanie działem elektronowym
- **Sterowanie polem przyspieszającym w czasie rzeczywistym (LLRF)**, w tym:
 - detekcja „małych” sygnałów w obecności MV gradientów pola
 - kompensacja efektów fizycznych (np. siła Lorenza, pasożytnicze mody rezonansowe, mikrofonowanie)
 - **automatyczne strojenie**
 - zabezpieczenie rezonatorów przed lokalnym przegrzaniem (*quench*)
 - regulacja energii oraz położenia zgęstek cząsteczek
- **Synchronizacja tysięcy systemów z femtosekundową precyzją**
- **Pomiar położenia i parametrów zgęstek** (*beam diagnostics*)
- Synchronizacja oraz zbieranie danych z eksperymentów - timing
- Ochrona maszyny oraz personelu

Liniowy akcelerator cząstek elementarnych



Bardzo uproszczony schemat blokowy (rys. M. Urbański)

System Low-Level Radio Frequency (LLRF)

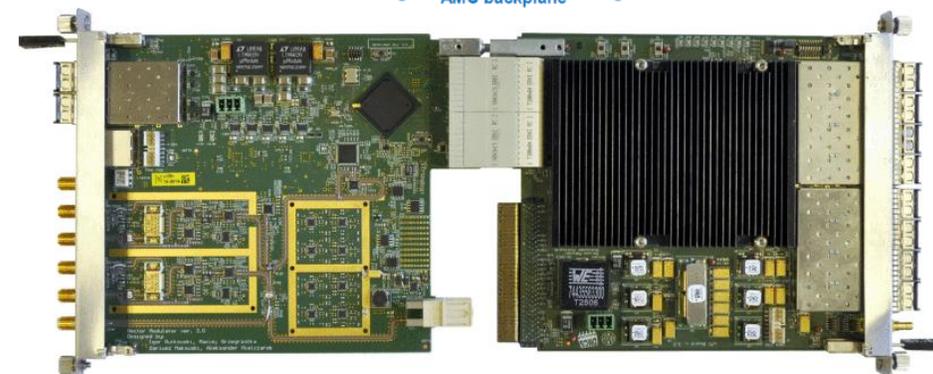
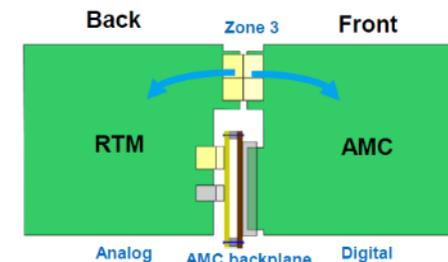


- System czasu rzeczywistego
- Od 1 do 32 kanałów (rezonatorów)
- **Dokładność regulacji (E-XFEL):**
 - amplitudy $dA/A = 0,01\%$
 - fazy do $0,01^\circ$
- Dodatkowo wymagane:
 - wysoka niezawodność
 - modułowość / łatwość serwisowania

Konferencja LLRF Workshop w Warszawie – wrzesień/październik 2027!

MTCA.4 – standard sprzętowy dla urządzeń badawczych

- **AMC:** Advanced Mezzanine Card
- **RTM:** Rear Transition Module
- 12 par AMC-RTM
- 4 moduły eRTM
- 2 zasilacze
- Pełna redundancja
- „Hot swap”



Modulator wektorowy

Kontroler (FGPA + DSP)



Downconverter, 10-kanalów

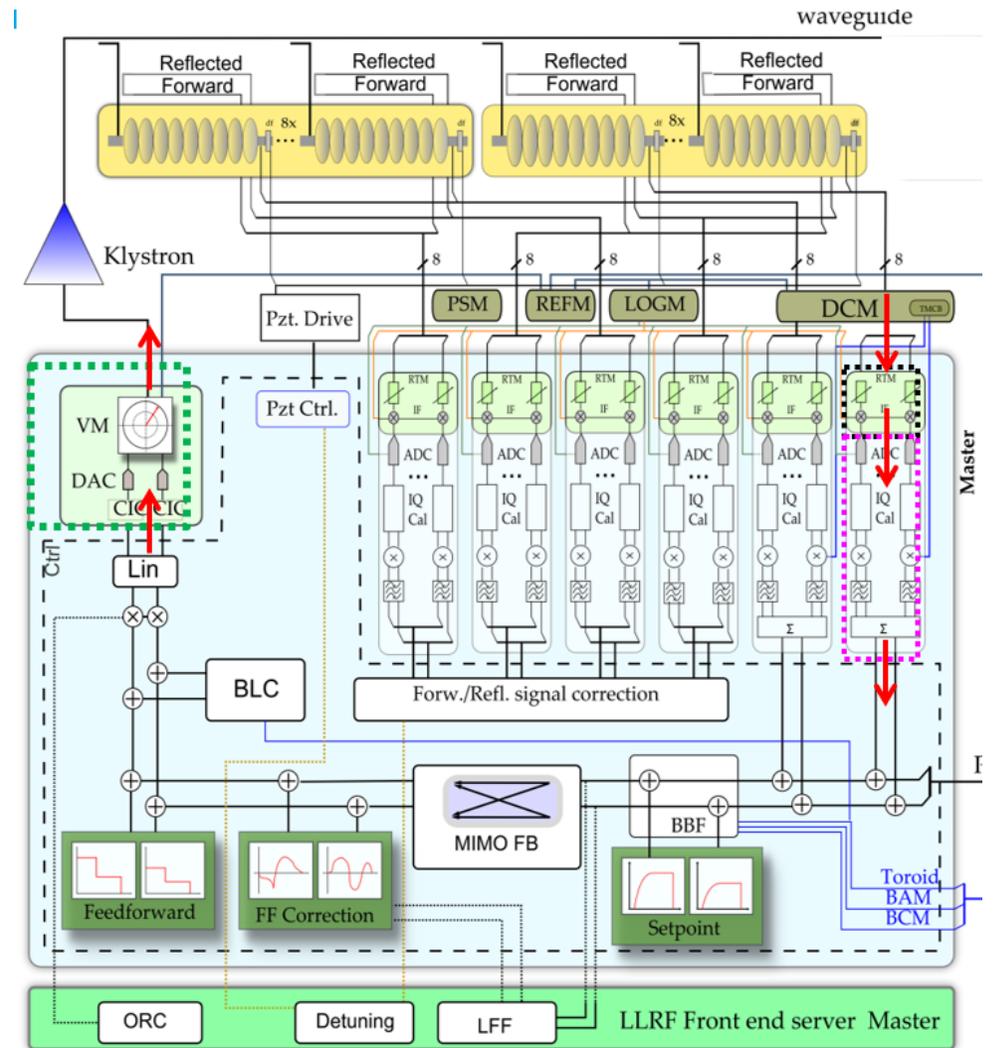
Digitizer, 10 x 125 MS/s 16-bit

Instalacja Systemów LLRF w E-XFEL



- Instalacja w tunelu pod kriomodułami
- Osłony radiacyjne
- 50 komponentów (kasety, płyty, zasilacze) w jednej szafie
- Łącznie instalacja ponad 2000 komponentów

Uproszczony schemat oprogramowania (firmware) jednej stacji



Timing System (a bit off topic)

- Provides **triggers** initiating specified **events**
 - There is a specified trigger sequence for given event
 - Eg. Initiating filling cavities with RF field, starting RF Gun to produce bunch, running beam diagnostics, ... – entire process of passing beam through accelerator
- Provides **coded event name and time** information
 - Allows to correlate data gathered from various subsystems during selected event
- Generates and distributes clock signals

Timing System Example

- Fiducial trigger synchronized with AC mains and a common subharmonic
- Synchronized event triggers with user programmable delays
- Master timing clock, triggers and event codes combined and sent usually by optical fibers
- There are well established solutions available like the White Rabbit

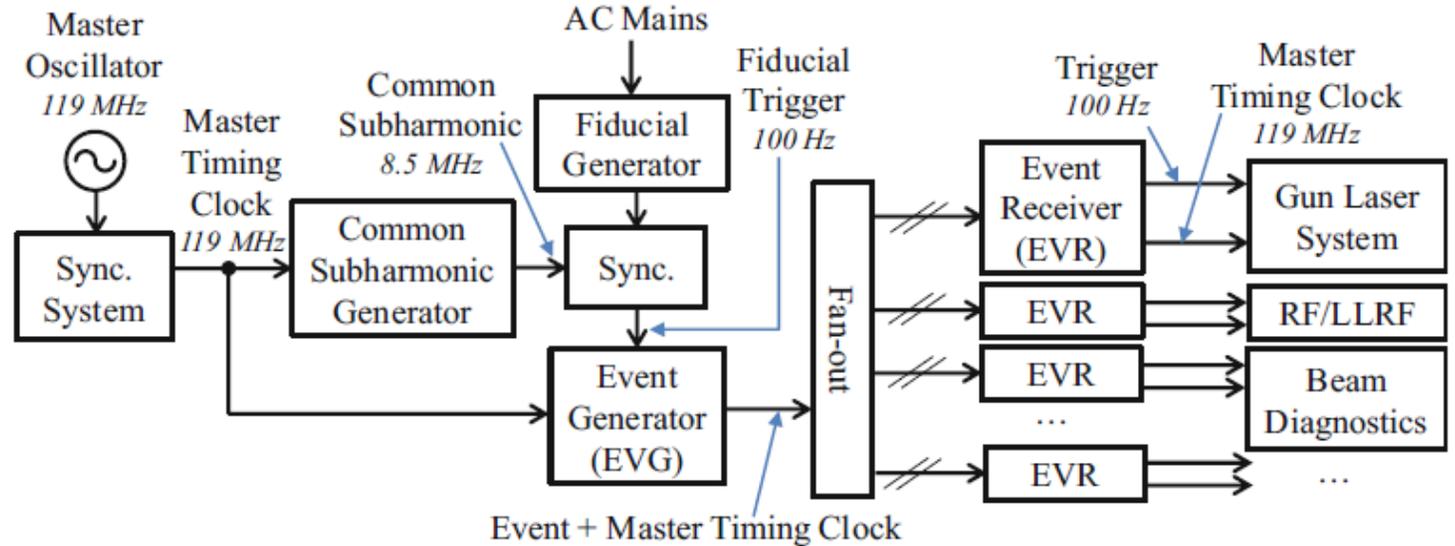


Figure source: S. Simrock and Z. Geng, Low-Level Radio Frequency Systems, 2022

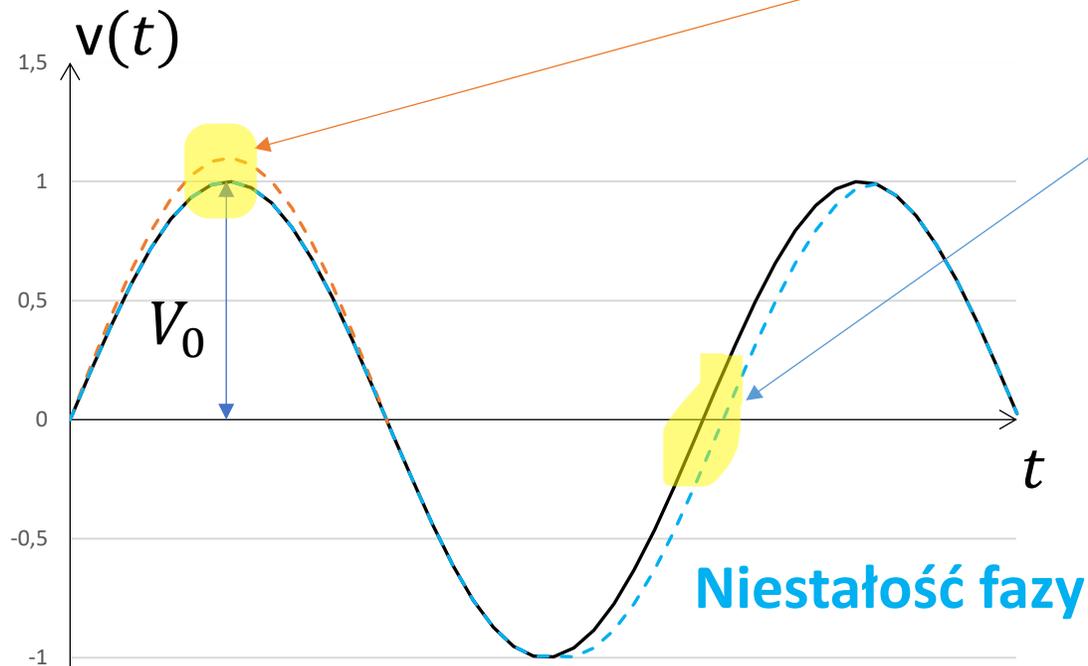


Synchronizacja fazy - sygnał harmoniczny

Dla systemów LLRF oraz diagnostyki wiązki

Często mylona z timing'iem

$$v(t) = V_0(1 + a(t))\sin(2\pi\nu_0 t + \varphi(t))$$



Idealny sygnał harmoniczny

$$v(t) = V_0 \sin(2\pi\nu_0 t)$$

Stałość fazy określamy przez niestałości

Podział ze względu na:

- **Charakter:**

- losowy (szumy)
- deterministyczny (wpływ zmian temperatury, harmoniczne sieci AC)

- **Odniesienie:**

- bezwzględne (szumy fazowe/jitter mierzone na danym wyjściu)
- względne (dryfty fazy lub szumy resztkowe - residual noise, - zmiana pomiędzy różnymi punktami systemu)

- **Czas obserwacji:**

- krótkoterminowe
- długoterminowe

Niestąłości krótko i długoterminowe

Niestąłość krótkoterminowa dotyczy zmian fazy/częstotliwości w czasie krótszym niż 1 sekunda

- “szybkie” składowe szumów ($f > 1 \text{ Hz}$)
- wyrażana w postaci gęstości widmowej szumów lub jitteru

Niestąłość długoterminowa dotyczy zmian fazy/częstotliwości w czasie dłuższym niż 1 sekunda

- **dryfty** - wywodzi się z procesów długoterminowych, starzenie elementów lub wpływ czynników środowiskowych
- Wyrażana w stopniach, sekundach, ppm na jednostkę czasu
- **Mierzona w czasie $>1\text{s}$, a czasem $>10\text{s}$** szczególnie gdy chodzi o pomiary szumów w pasmie $<10\text{Hz}$

Phase Noise and Jitter

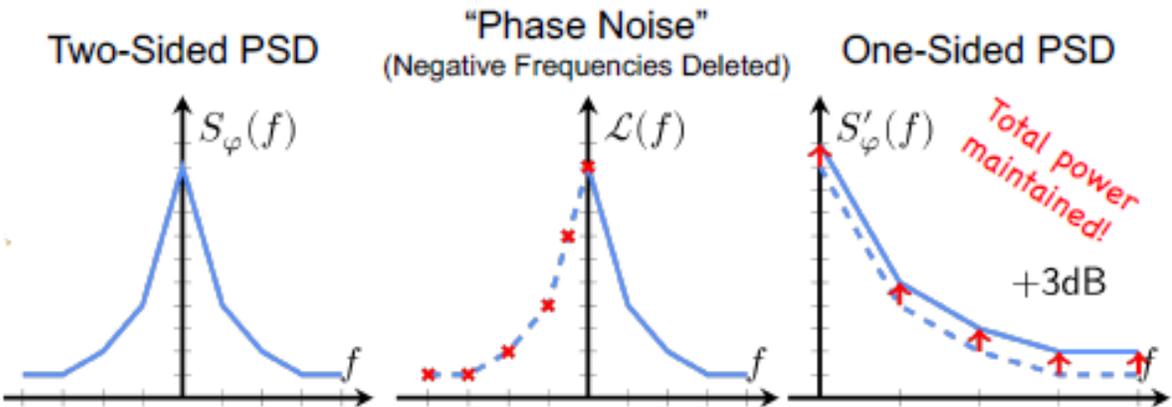
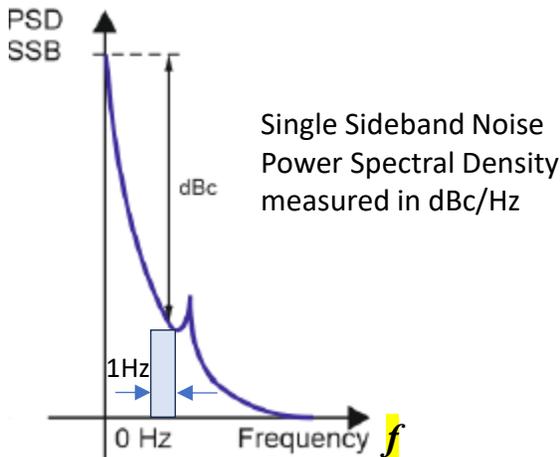


Fig. Courtesy of Maximilian Schütte

Klasyczna definicja szumów fazy



$$\phi_{jitter}^2 = \int_{f_1}^{f_2} S'_\varphi(f) df \quad \text{Jitter fazy}$$

Jitter fazy
wyrażony w
sekundach

Uwaga $1/\nu_0$ – im większa częstotliwość nośna, tym mniejszy jitter czasu dla takich samych poziomów szumów fazy!

$$\Delta t_{rms} = \left(\frac{1}{2\pi\nu_0} \right) \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} S'_\varphi(f) df}$$

Jitter fazy w sekundach?

Wygodne jest przedstawienie jitteru fazy Φ w jednostkach czasu jako Δt

- Fizycy zazwyczaj podają czasy przelotu cząsteczek przez maszynę / dotarcia do eksperymentu
- Łatwiej jest porównać błędy związane z niestałością synchronizacji

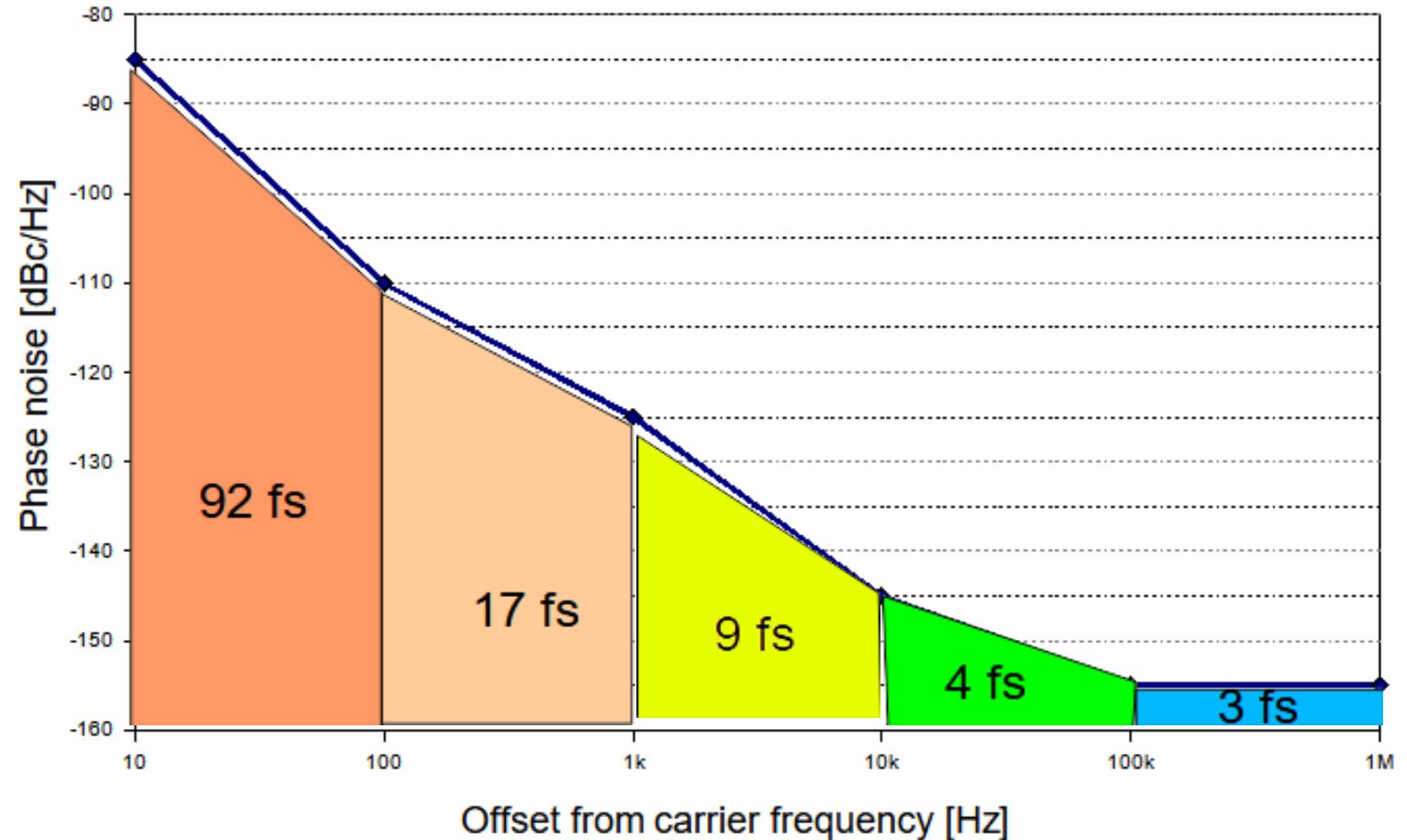
$$\Delta t = \frac{\phi T}{360^\circ}$$

Przykład: $\nu_0 = 1300 \text{ MHz} \rightarrow T \approx 0,769 \text{ ps}$,

$$\Phi = 1^\circ \rightarrow \Delta t \approx 2,13 \text{ ps}$$

Phase Noise and Integrated Jitter Example

1300 MHz oscillator signal



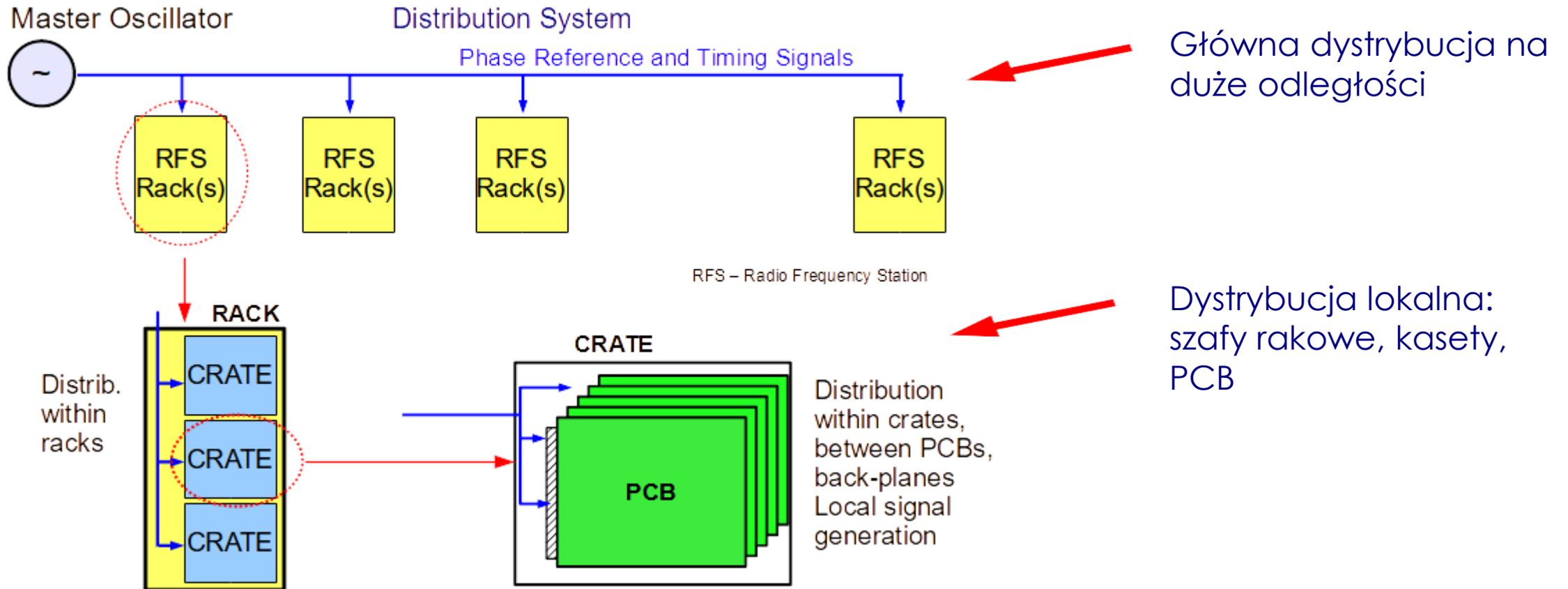
The closer to the carrier, the bigger the phase noise contribution to jitter!

Główne zadania twórców systemu synchronizacji fazy

- Wygenerować sygnał o odpowiedniej czystości
- Wzmocnić i rozdzielić ten sygnał
- Rozprowadzić do kilkuset urządzeń nie psując parametrów
- Zapewnić wysoką dostępność (99,999%)
- Zabezpieczyć się przed telefonami od operatorów w środku nocy/wakacji...

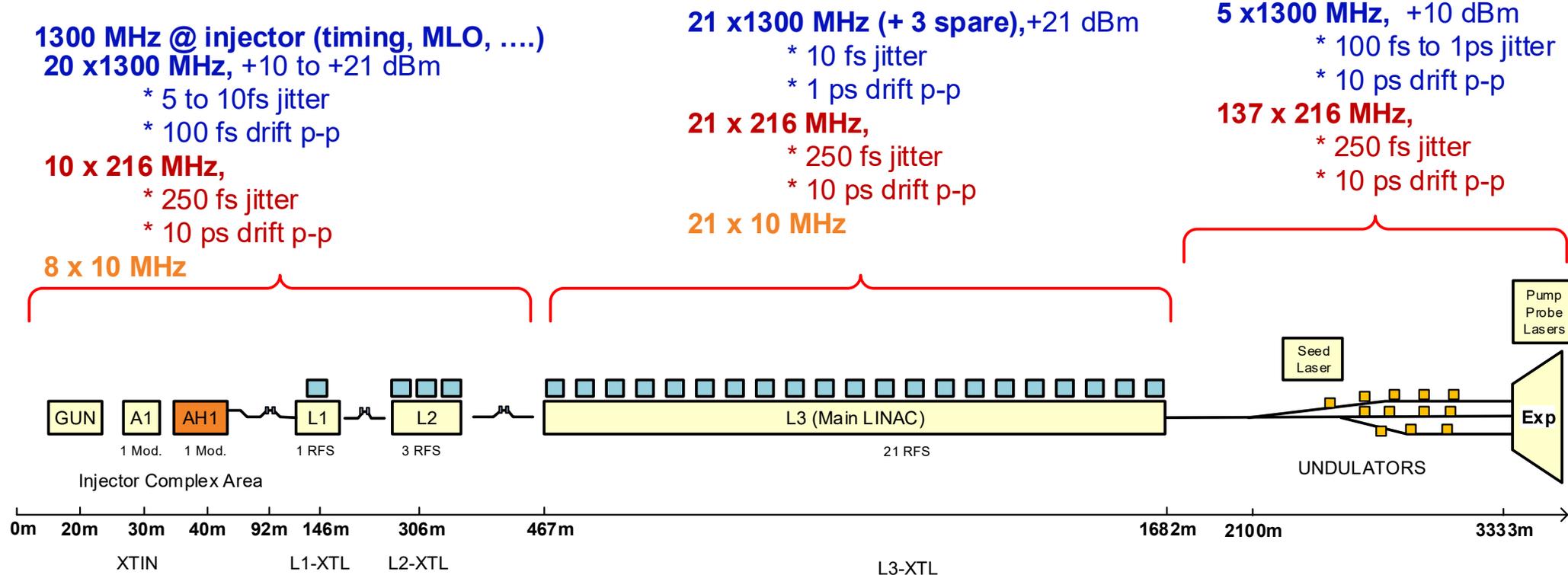


System synchronizacji fazy w uproszczeniu



Bardzo często nie docenia się znaczenia lokalnej dystrybucji sygnałów (wewnątrz kaset, na PCB)

Wymagania dla systemu synchronizacji E-XFEL



- **Ponad 220 wyjść**
- Wymagana dostępność sygnałów na poziomie 99,9%

Co oznacza 10 fs lub 1ps w praktyce?

- W czasie 10 fs światło pokonuje w próżni drogę $\sim 3\mu\text{m}$!
- W typowym przewodzie \sim połowę mniej...
- Dla częstotliwości $f = 1,3 \text{ GHz}$
 - $\Delta t = 10 \text{ fs} \rightarrow \Phi \approx 0,0045^\circ$
 - $\Delta t = 1 \text{ ps} \rightarrow \Phi \approx 0,45^\circ$
- A akcelerator E-XFEL ma prawie 2 km długości + 1,5 km *beamlines*...



shutterstock · 484458925

Zaczniemy od generacji sygnału referencyjnego

Generator Wzorcowy

Main/Master Oscillator

Typowe wymagania dla generatora wzorcowego

- Niskie szумы fazowe -> np. jitter <10 fs w zakresie od 1Hz do 10 MHz
- Od 1 do kilkunastu częstotliwości wyjściowych
- Od 1 do kilkadziesiątu wyjść
- Moc wyjściowa od 10mW do 50W
- Wysoka dostępność (redundancja)
- Zintegrowana diagnostyka



Z takimi się spotkałem

The Very Master Oscillator

- W większości przypadków jest to (OCXO)
- Typowa długoterminowa stałość częstotliwości OCXO $\sim 10^{-10}$
- Jeśli trzeba lepszej stałości, to OCXO może zostać zsynchronizowany z:
 - Źródłem atomowym (zegar rubidowy) $\sim 10^{-12}$
 - GPS (lub odpowiedniki) $\sim 10^{-14}$
- Częstotliwości OCXO rzadko przekraczają 200 MHz
- Konieczność syntezy większych częstotliwości



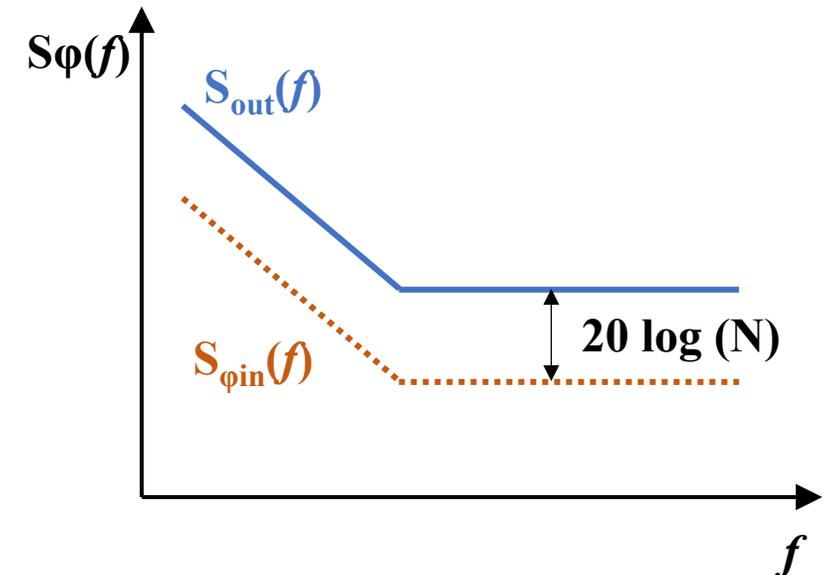
„Simplest” MO Solution

- **Off the shelf** signal synthesizer
- There are some devices offering high-performance signals
- Phase jitter in range of tens of fs
- Relatively high noise floor (-155 to -160 dBc)
- But still sufficient for many machines
- For higher performance and non typical requirements a custom design is necessary

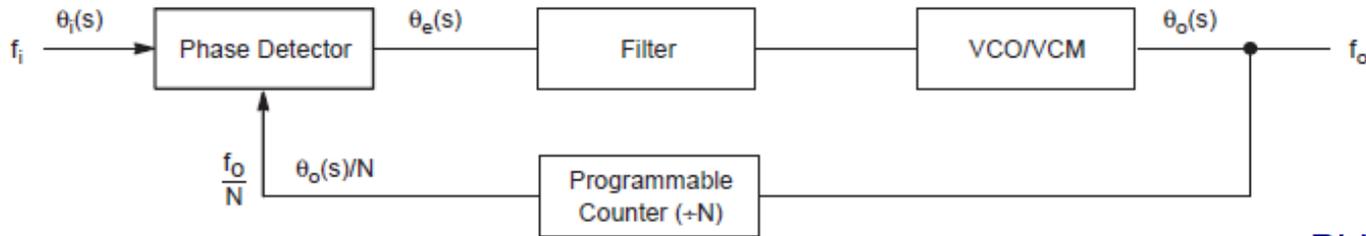


Frequency Synthesis with a Multiplier

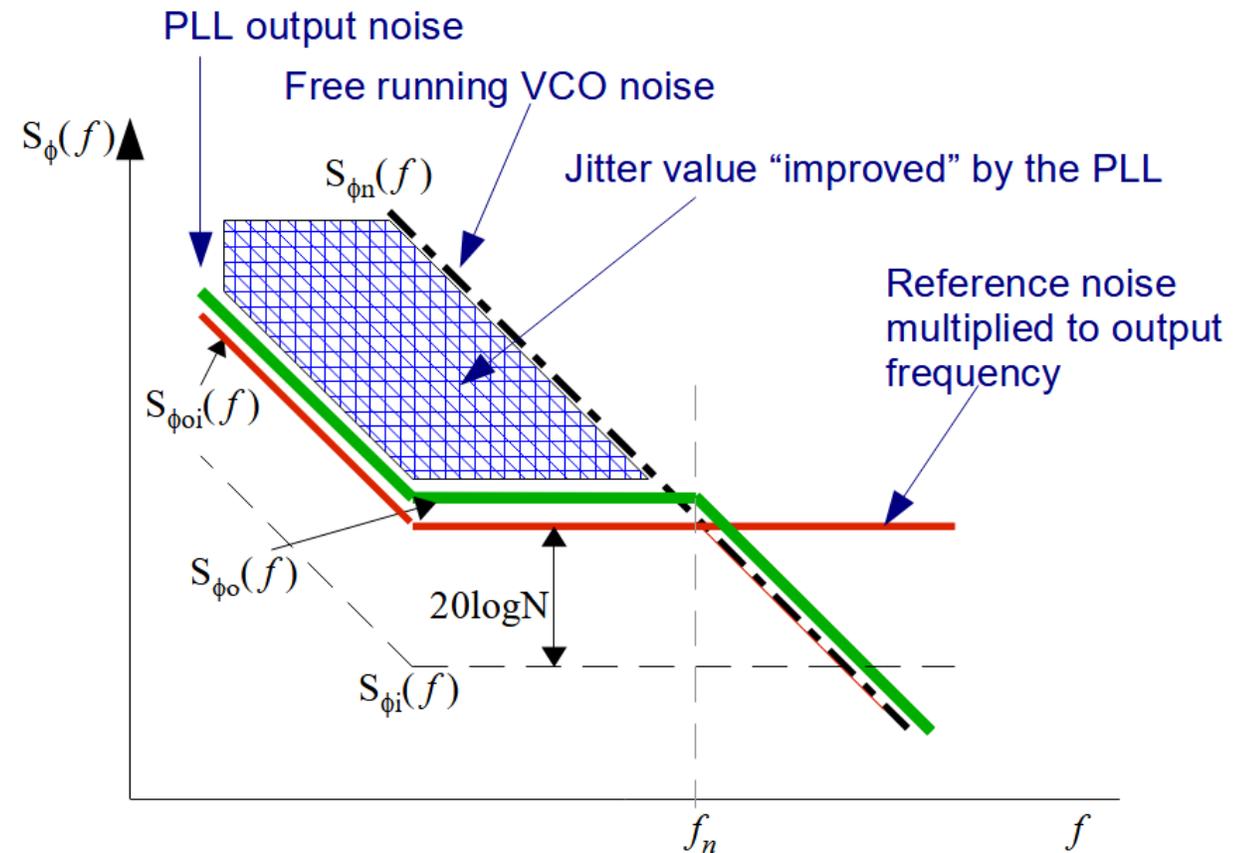
- Usually, the multiplication factor $N = 2$ or 3
- Rather narrow frequency range
- Limited choice of high-performance devices
- Limited flexibility but still possible to make a good design
- **Phase noise floor rarely below -155 dBc!**
- May drift significantly with temperature



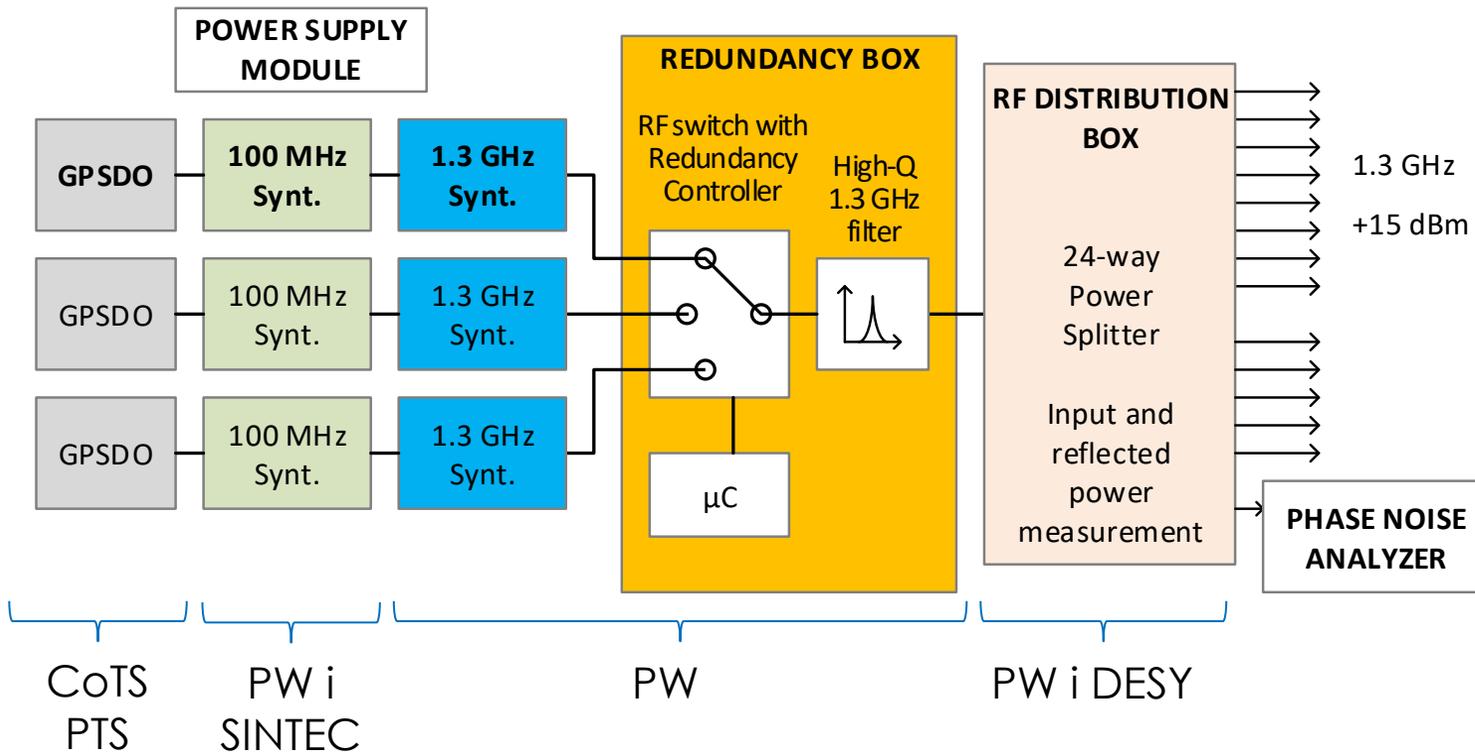
Phase-Locked Loop Synthesizer



- Phase – locking of a VCO to a reference signal
- Flexibility in selecting output frequency
- Proper selection of PLL components allow for phase noise (jitter) reduction comparing to a standard multiplier



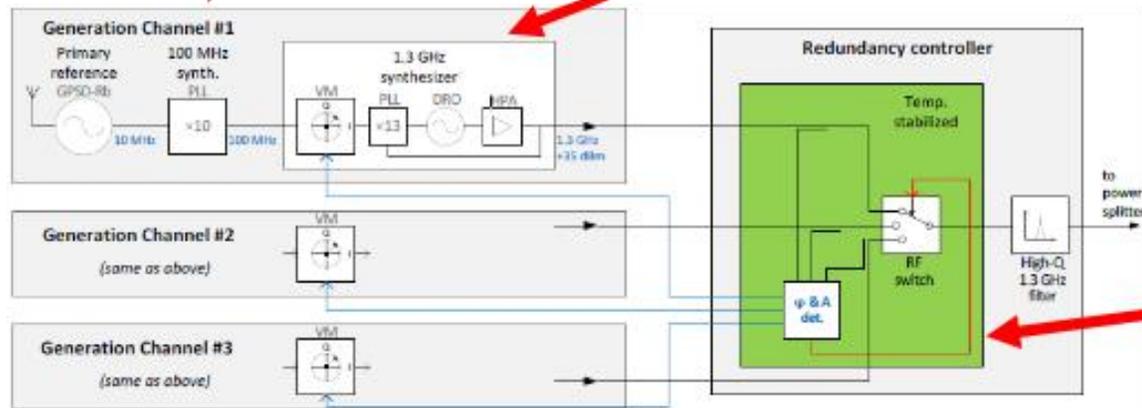
Projekt XFEL Master Oscillator*



*ostatnio Main Oscillator

- Ultraniskoszumny syntezer częstotliwości 1300 MHz
- System 3-kanalowy z kontrolerem redundancji i przełącznikiem
 - **Detekcja błędu, decyzja oraz przełączenie w czasie 300 ns!**
 - Podtrzymywanie sygnału wyjściowego przez filtr o dużej dobroci
- 7 z 10 modułów składowych zbudowano na PW

XFEL Master Oscillator



Instalacja generatora wzorcowego w E-XFEL

Instalacja systemu generatora wzorcowego



- System działa w E-XFEL od roku 2017
- Wbudowana zaawansowana diagnostyka

Moduł syntezy 1,3 GHz



Filtr o dużej dobroci



Przełącznik z detektorami



Moduł syntezy 100 MHz

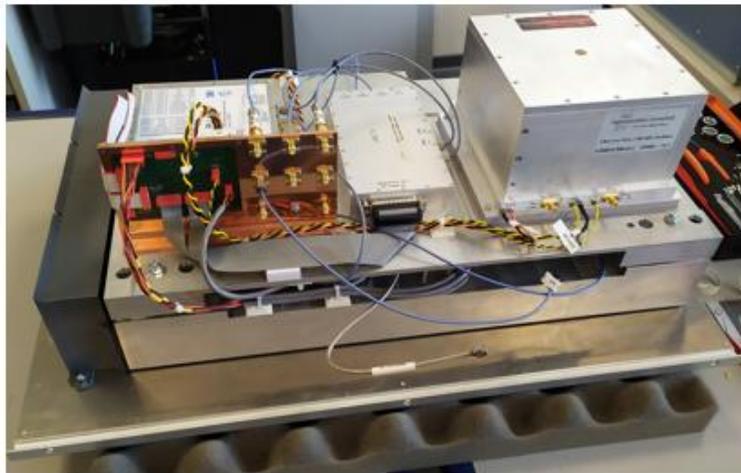


Optymalizacja konstrukcji MO upgrade

- Stosowanie jak najmniejszej liczby kabli połączeniowych w obudowie
- Projektowanie pod kątem łatwości montażu i późniejszego serwisowania urządzenia:
 - Redukcja kosztów związanych z przestojem w pracy akceleratora,
 - Redukcja kosztów napraw i serwisu modułów.



+



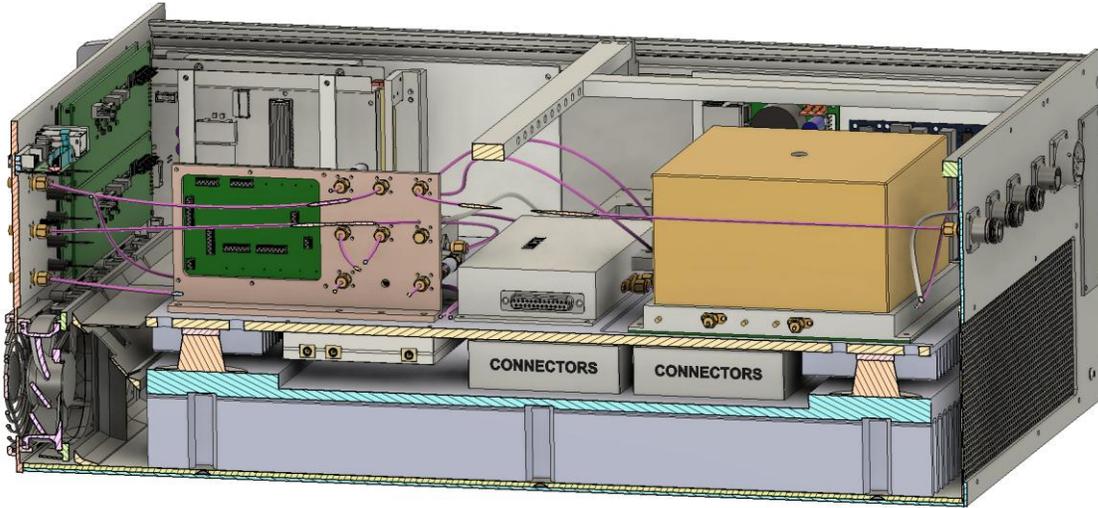
=



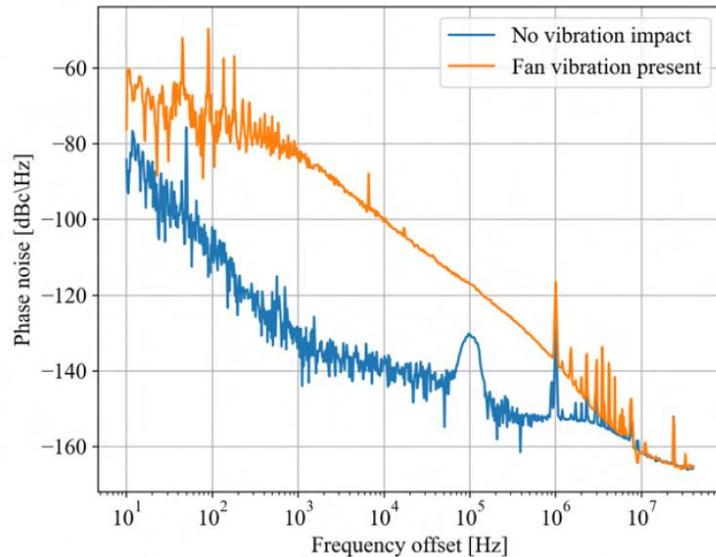
Uproszczona instrukcja montażu (i serwisu) syntezeru FLASH-MO

(rys. M. Urbański)

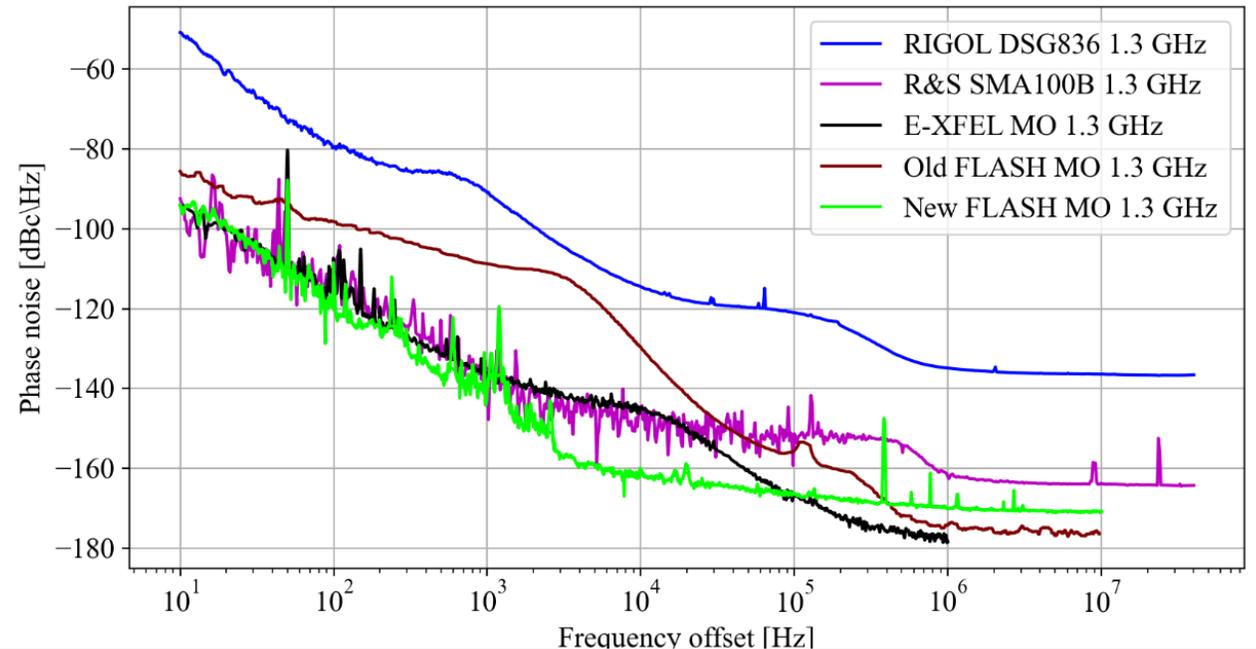
Redukcja wpływu wibracji + Performance



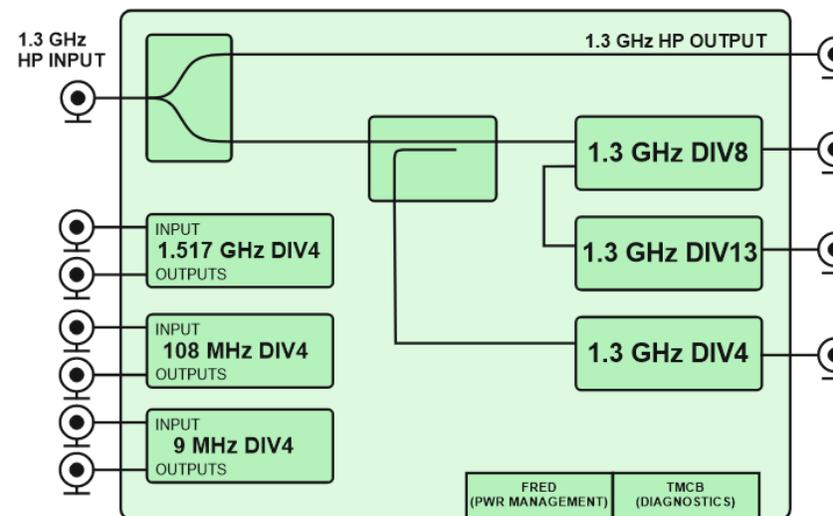
OCXO phase noise optimization



| | Phase Jitter (10 Hz do 1 MHz) | | |
|----------|-------------------------------|-----------|------------------|
| | Old FLASH MO | E-XFEL MO | NewFLASH2020+ MO |
| 108 MHz | 86.1 fs | - | 27.8 fs |
| 1300 MHz | 55.9 fs | 19.5 fs | 10.7 fs |
| 1517 MHz | 1390 fs | - | 45.8 fs |



Moduł dzielników mocy sygnałów



Schemat blokowy modułu dystrybucji sygnału

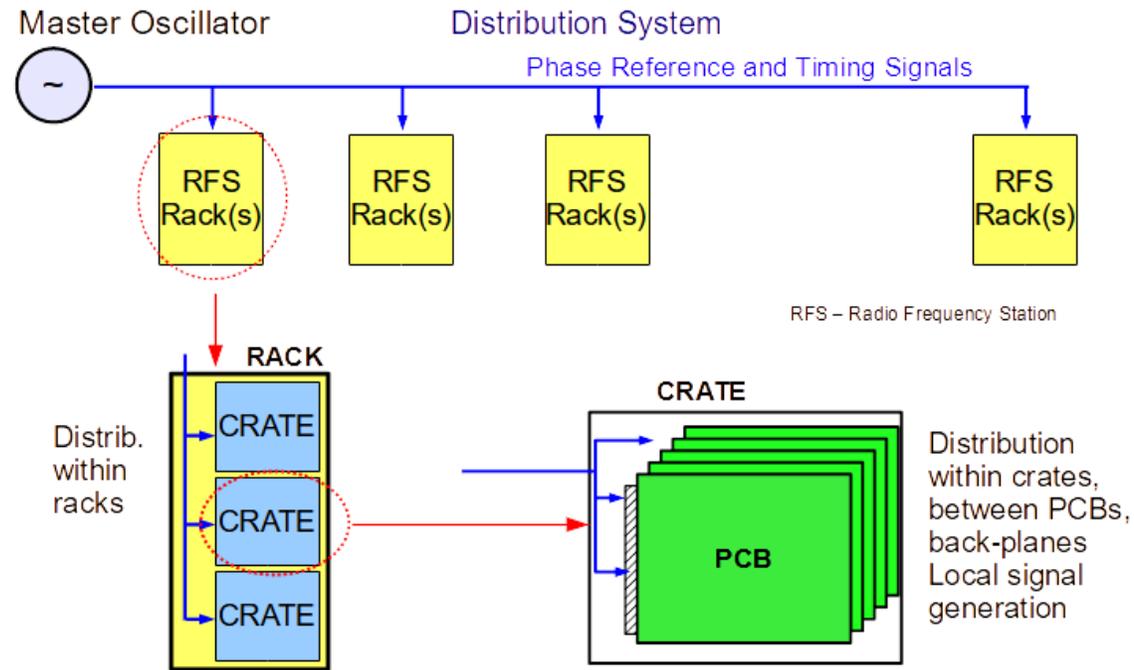


Moduł dystrybucji sygnału wzorcowego w.cz FLASH-DISM w trakcie testów.
Widoczny moduł dedykowanego dzielnika mocy DIV13.

(rys. M. Urbański)

Mamy już sygnał

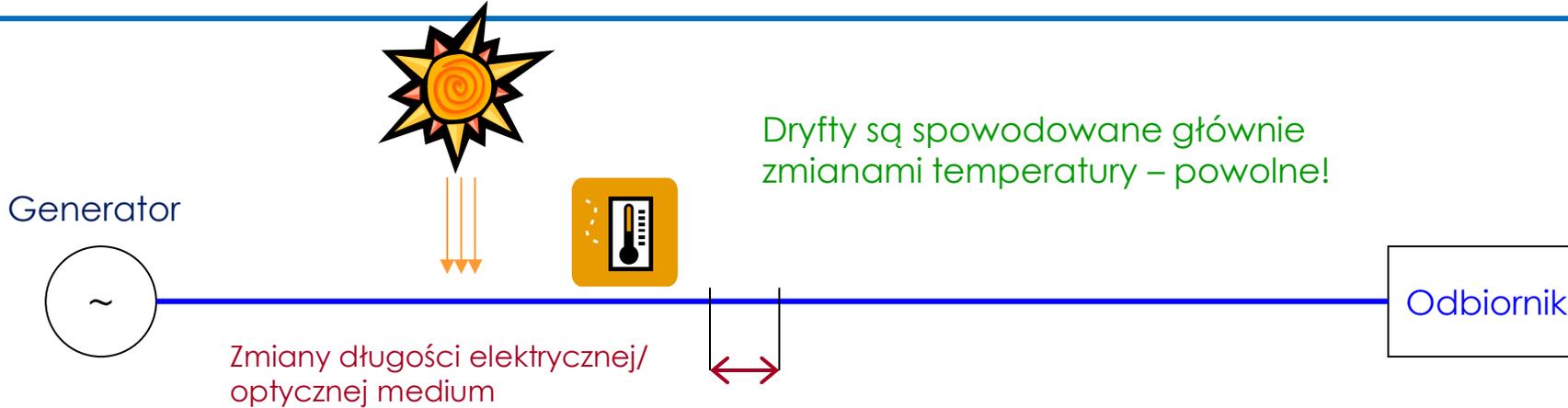
Bierzemy się za jego dystrybucję ...



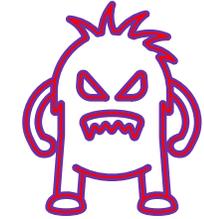
Jeszcze parę słów o niestałościach fazy w systemach referencyjnych

- Stałość bezwzględna zależy głównie od szumów fazowych MO
- Elementy pasywne nie dodają jitter'u (*well... EMC, low power*)
- Można zbudować wzmacniacze w.cz. o pomijalnych szumach addytywnych
- **Dobrze zaprojektowana linia referencyjna „transportuje” jitter fazy z MO i nie dodaje nic od siebie**
- Systemy timing'owe wymagają niestałości w zakresie od ps do ns
- Niskoszumne sygnały zegarowe dla ADC syntezuje się z sygnałów referencyjnych
- Każde medium dystrybucji wprowadza dryfty fazy

Problem długich (choć nie tylko) połączeń



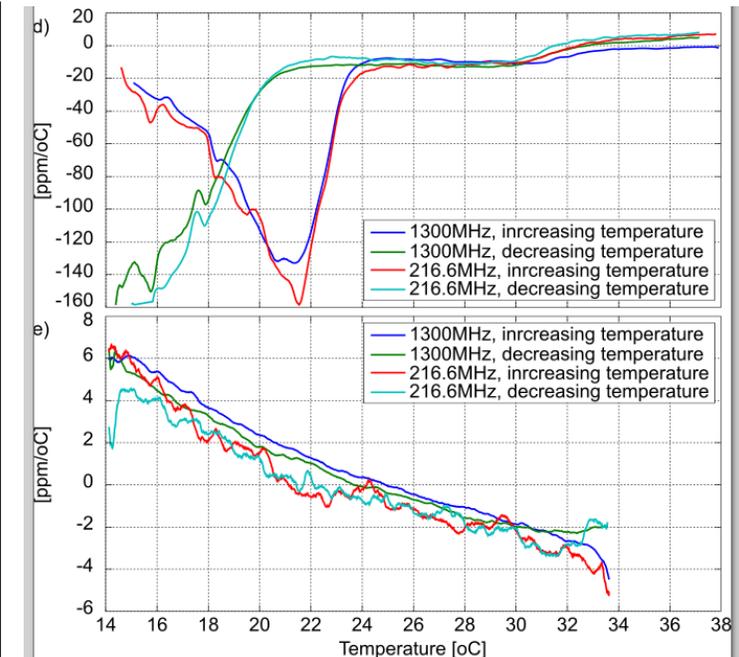
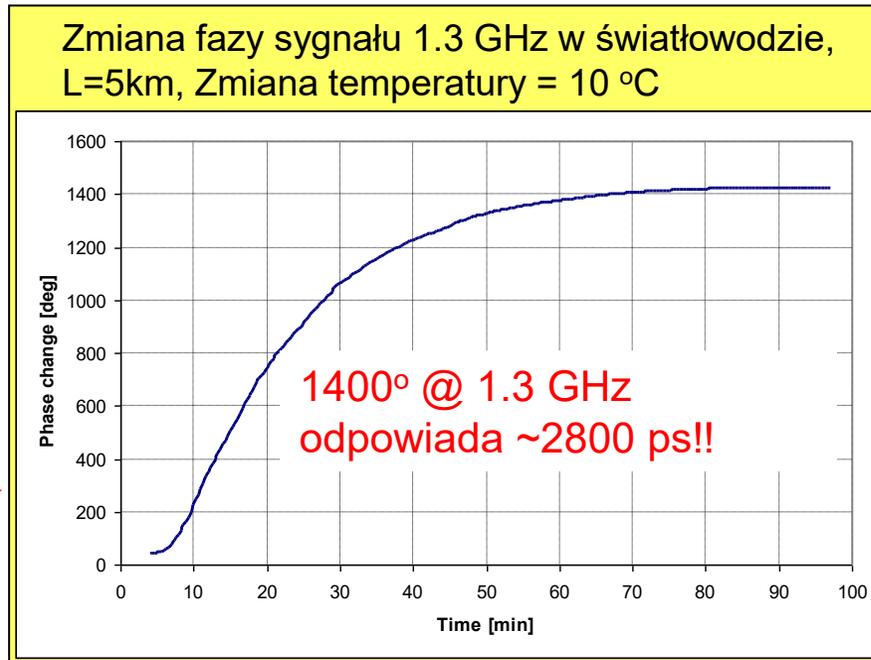
Main Enemy:
DRYFTY FAZY



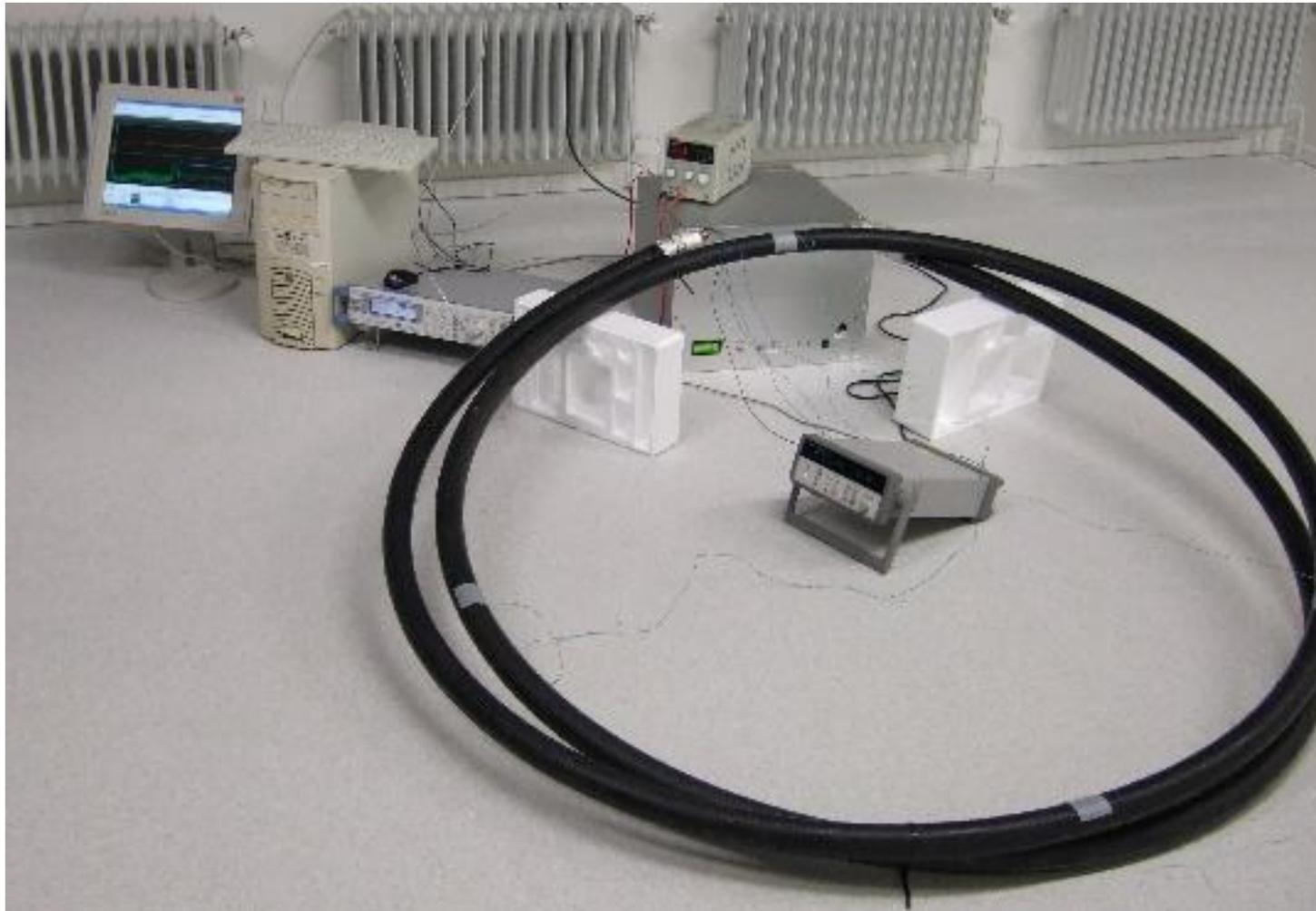
Źródła dryftów:

- w światłowodach: zmiany n_{eff}
- w przewodach: zmiany rozmiaru lub stałej dielektrycznej

Wymagana jest aktywna kompensacja dryftów fazy



Amatorskie pomiary dryftów fazy w grubych przewodach 😊



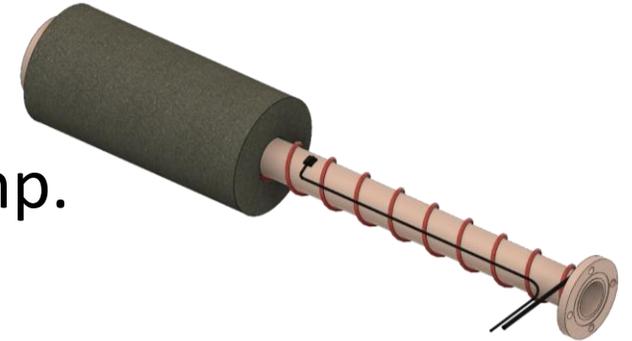
Jak walczymy z dryftami fazy

To zależy od wielkości akceleratora oraz wymagań na stałość synchronizacji

- Dla małych akceleratorów może wystarczyć dobrze zaprojektowana linia pasywna
- Dla większych maszyn może to być dystrybucja ze stabilizacją:
 - **pasywną** z kablami/światłowodami o przeciwnych (kompensujących) się współczynnikach temperaturowych zmian fazy
 - **pośrednią** – poprzez stabilizację temperatury przewodów
 - **aktywną** - z sprzężeniem zwrotnym

Cable Temperature Stabilization

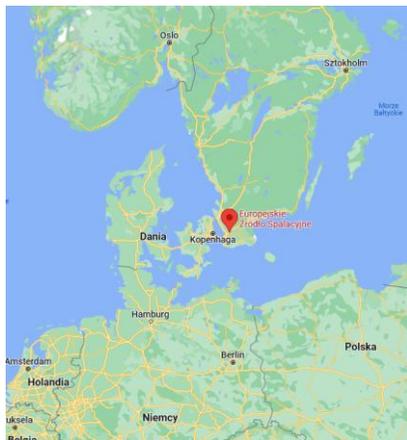
- Either by cooling water or by heating tapes
- **Very well known, robust, good performance**
- Require a good thermal insulation to achieve good temp. stability far from sensors
- **Feasible for up to several hundred meters**
- **Demonstrated $\sim 0.1^\circ$ p-p phase stability / 100m @ 704 MHz at ESS**
- For longer distances and higher frequencies stability and cost may be compromised



Projekt European Spallation Source (ESS)



+500 MEuro 2022



Główne wymagania dla projektu ESS PRL

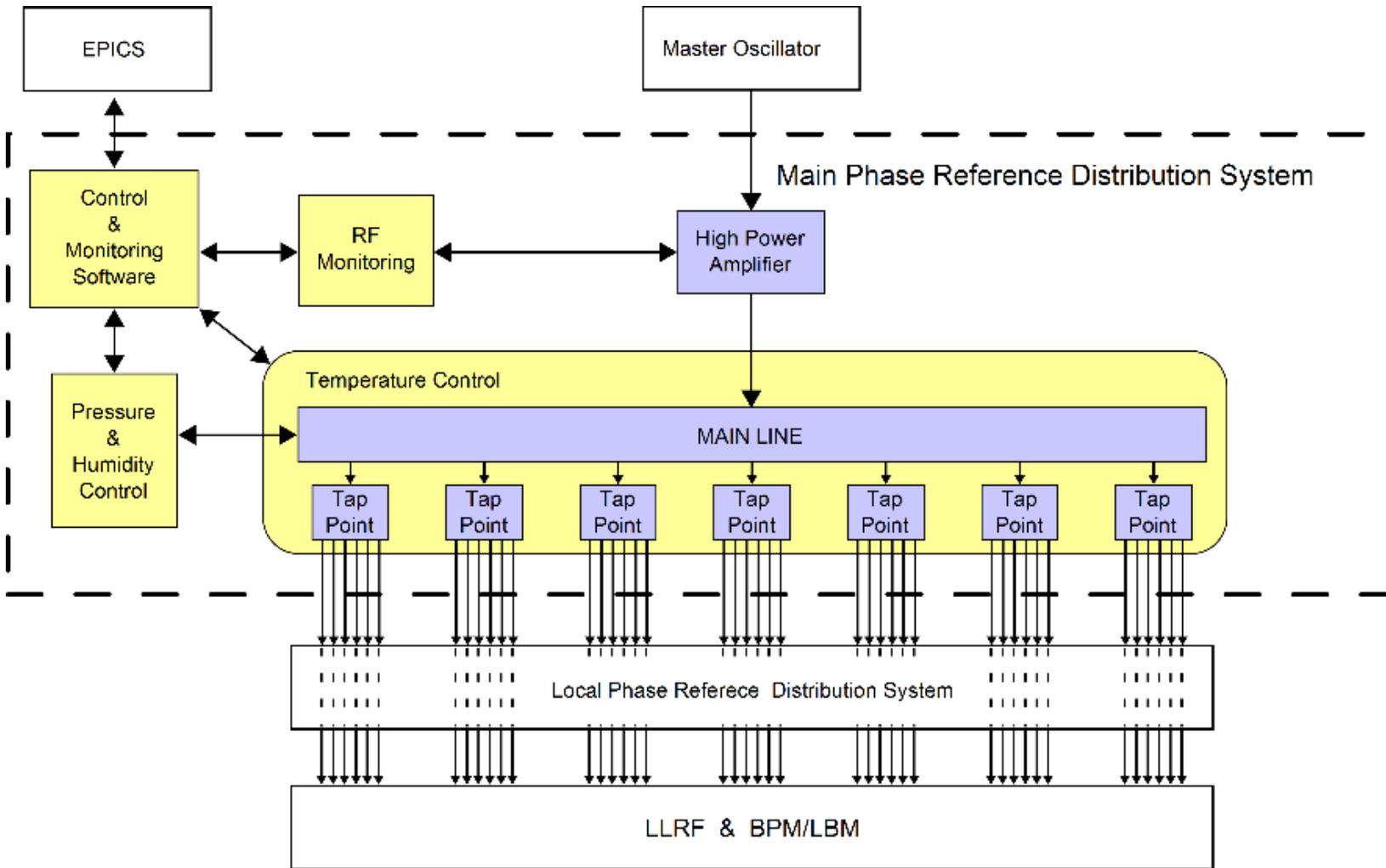
- Rozprowadzenie sygnałów odniesienia fazy o częstotliwościach 352 MHz i 704 MHz od generatora wzorcowego do podsystemów akceleratora
- Długość całkowita w tunelu: ~581 m.
- Liczba modułów wyjściowych: 56 (3 lub 6 wyjść w danym module)
- Liczba wyjść: 294
- Poziom mocy na wyjściach: +16dBm +/-2dBm na obu częstotliwościach
- Wymagania dla stałości fazy sygnału:
 - Dryfty pomiędzy sąsiednimi wyjściami: 0.1°
 - Dryfty pomiędzy dowolnymi wyjściami : 2.0°
 - Krótkoterminowa (w czasie impulsu przyspieszającego: ~3.5 ms): 0.1°

Najważniejsze założenia projektowe

- Jednoczesna dystrybucja dwóch składowych harmoniczných sygnału
- Koncentryczna linia sztywna 1 5/8"
- Sprzęgacze kierunkowe w linii (56 sztuk) dla zmniejszenia wpływu odbić sygnałów w linii
- Stabilizacja temperatury linii (+/-0.1 °C)
- Linia podwieszona pod sufitem akceleratora
- Zakaz używania materiałów zawierających teflon (problem odporności na promieniowanie)
- Elektronika sterująca oraz diagnostyka w hali Klystron Gallery

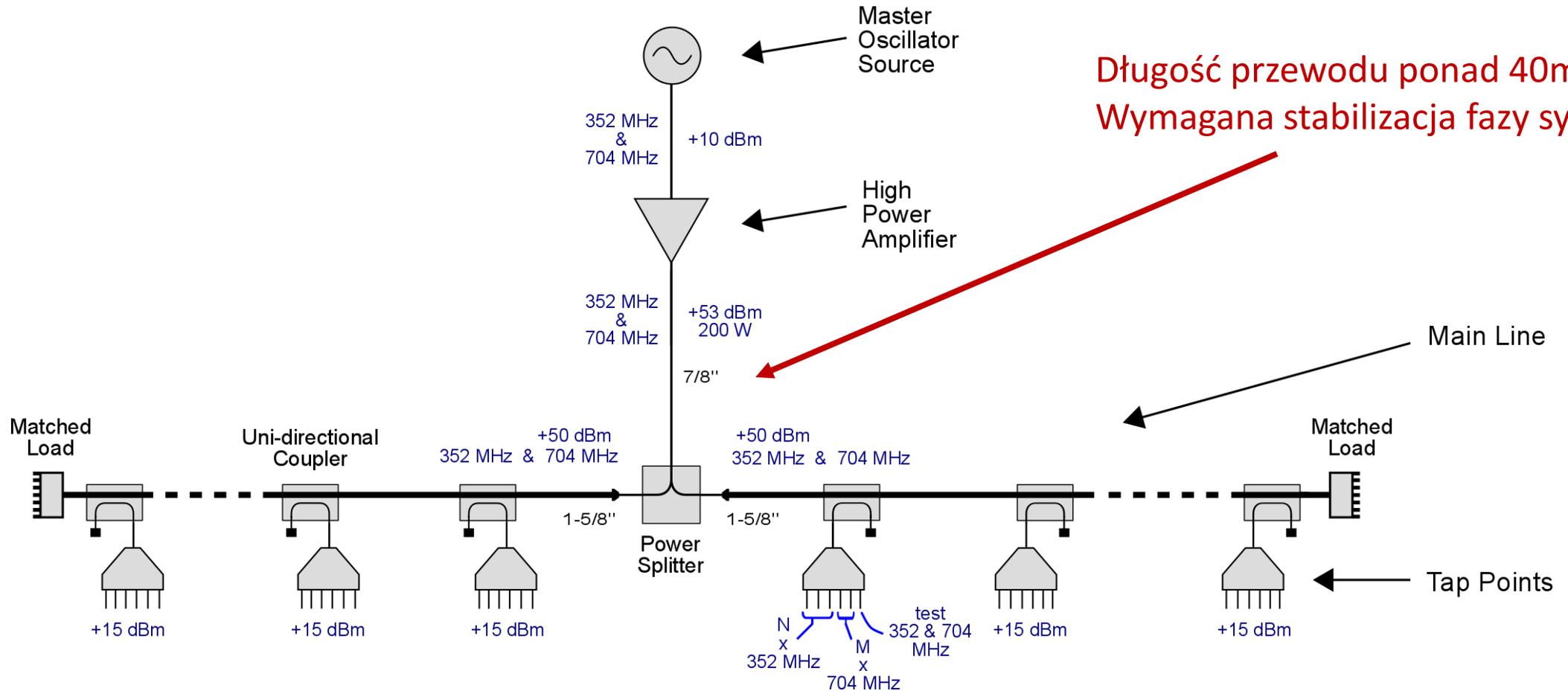


Koncepcja i najważniejsze części systemu

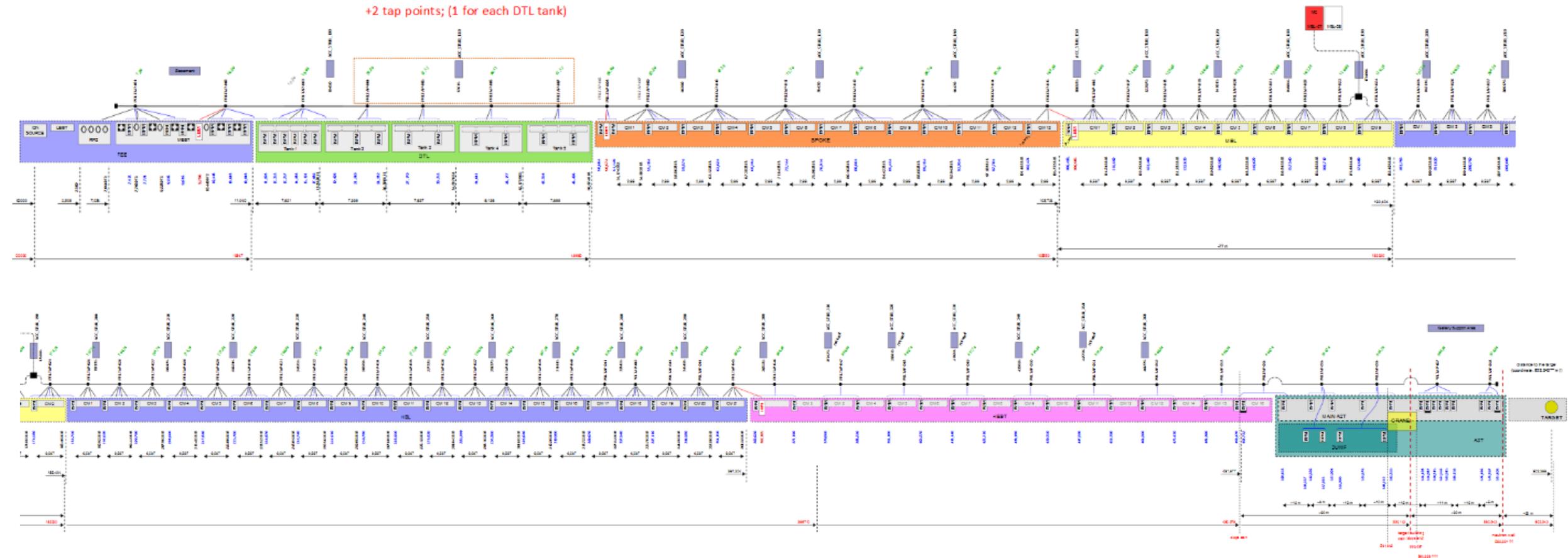


- Linia główna ze sprzęgaczami
- Moduły wyjściowe (Tap-Point)
- System stabilizacji temperatury
- System stabilizacji ciśnienia i wilgotności gazu
- System sterowania i diagnostyki

Podstawowy model w.cz. linii



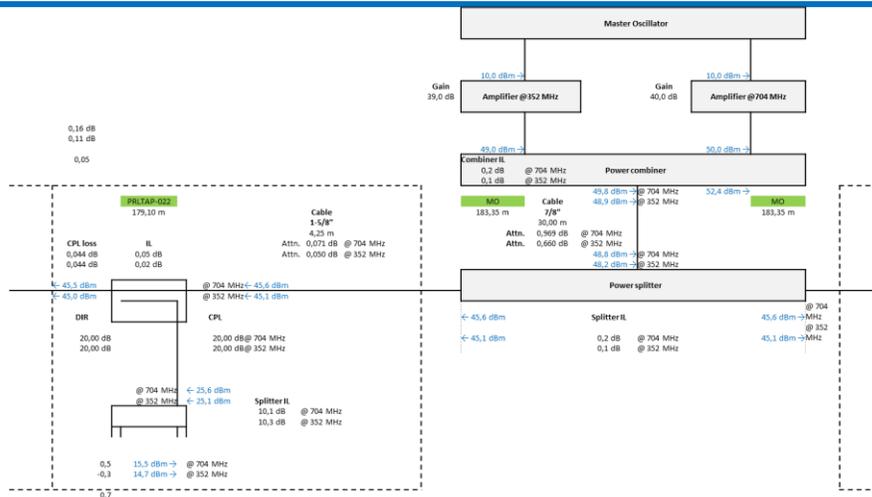
Schemat segmentów systemu



Bardzo czasochłonna praca wymagająca koordynacji i zebrania danych od projektantów wielu podsystemów akceleratora (często będących w trakcie projektowania).

Uporządkowaliśmy sporo rzeczy w projekcie ESS...

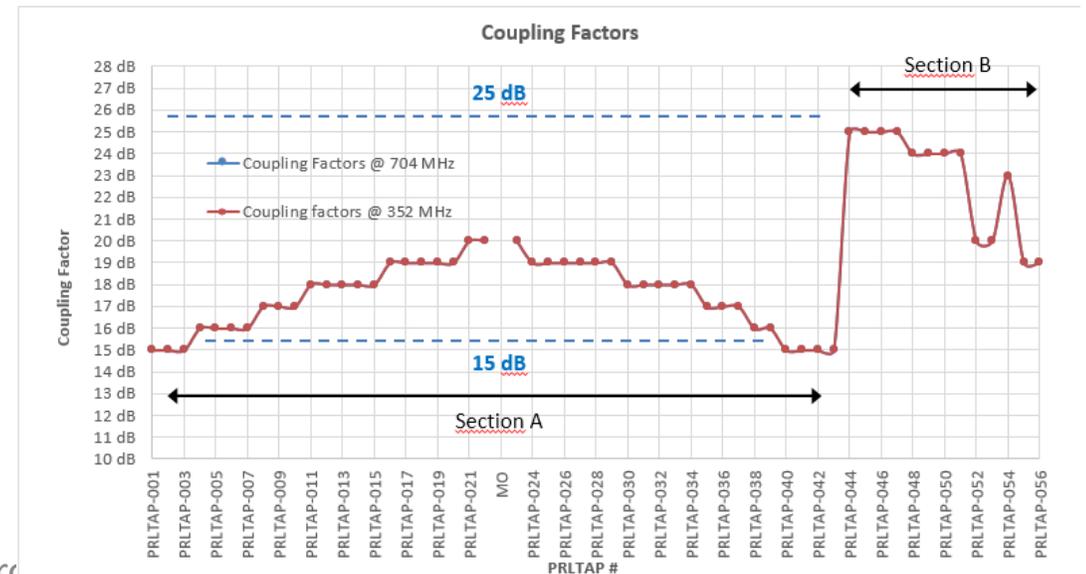
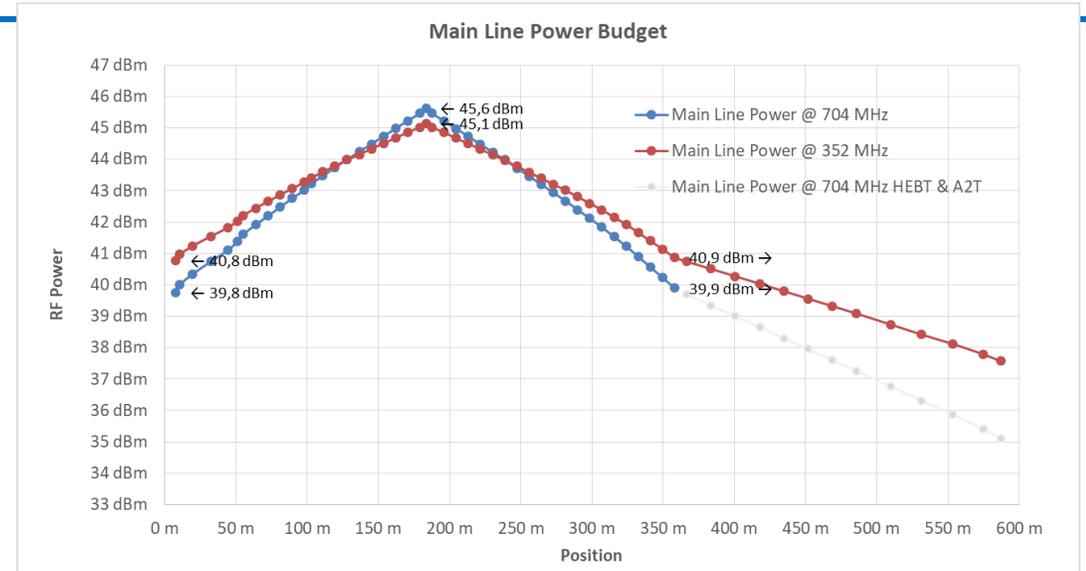
Model w.cz. i optymalizacja budżetu mocy oraz sprzęgaczy



Sprzęgacz kierunkowy o regulowanym współczynniku sprzężenia i małych odbiciach. Bez elementów teflonowych

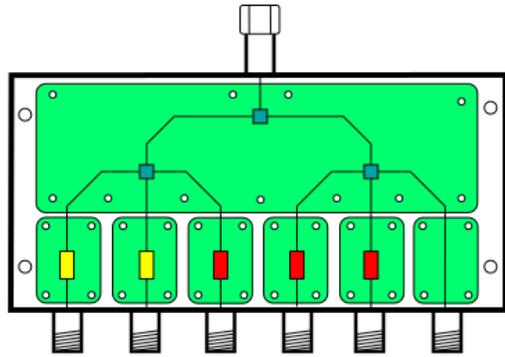
Wykonany na zamówienie przez firmę SpaceForest

2025.11.28, K. Czuba



HDM #5, Wrc...

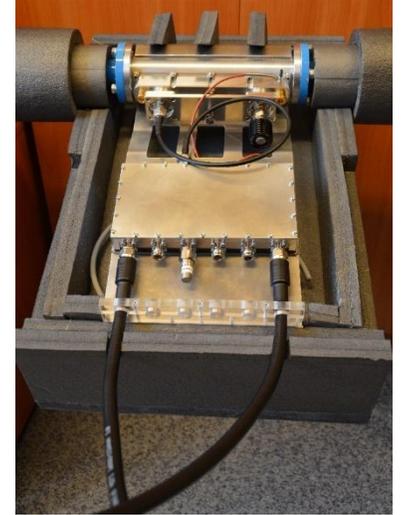
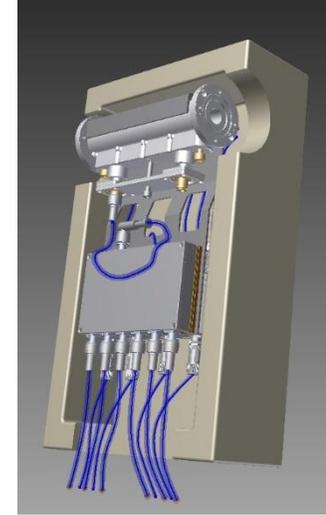
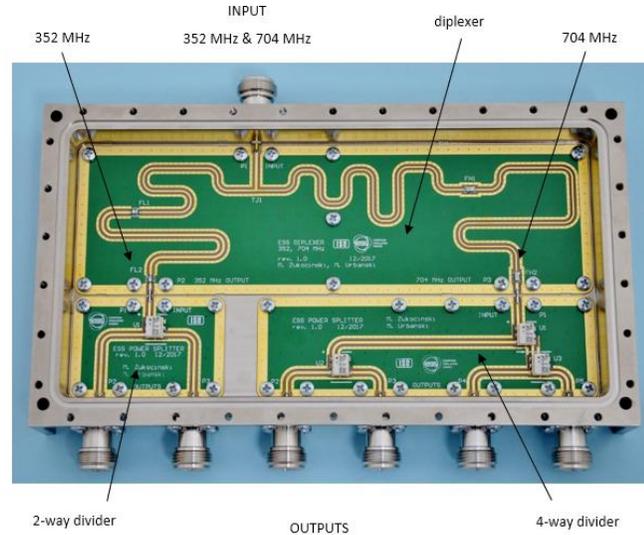
Moduł wyjściowy (TapPoint) – część w.c.z.



power dividers

LPF & HPF filters

N x 352 MHz & M x 704 MHz & K x spare

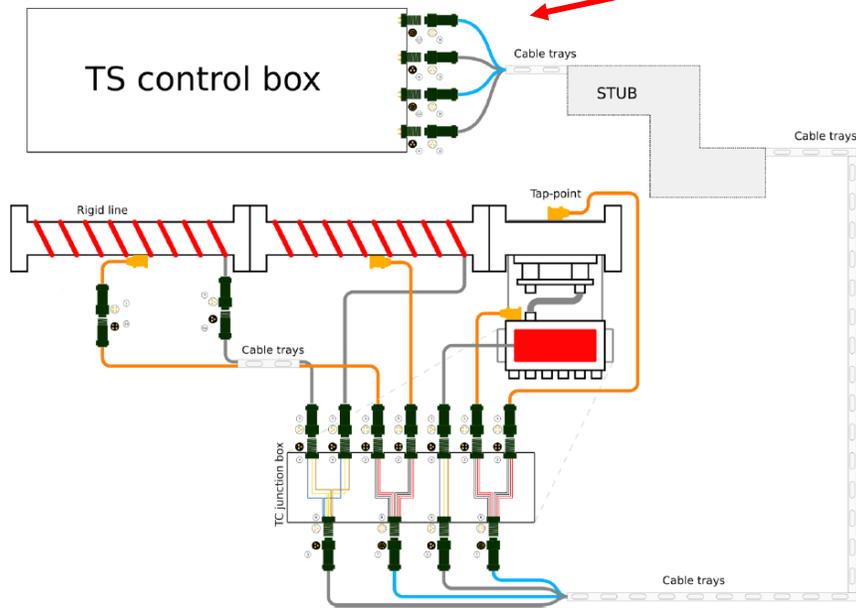


- Funkcjonalność dzielnika mocy i filtru
- **Modułowość**
- „Problem z Teflonem”
- Powinien zapewnić równy poziom mocy na obu częstotliwościach
- Minimalizacja odbić sygnałów do linii
- Dupleksery
- Stabilizacja temperatury
- Wyprodukowano i zainstalowano 58 szt.



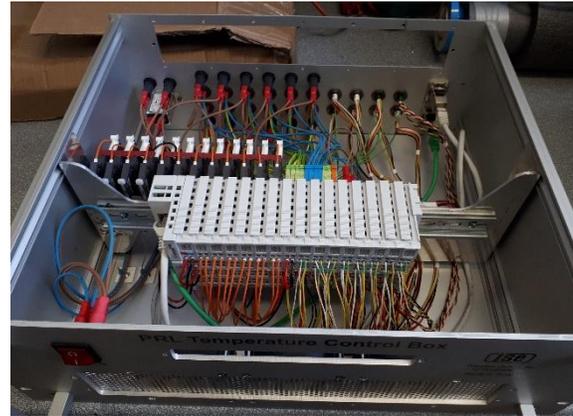
Elementy systemu stabilizacji temperatury

Uproszczony schemat jednej sekcji systemu



202 systemy
~26 km of cables

Temperature Control Box



Wyprodukowano 19 sztuk

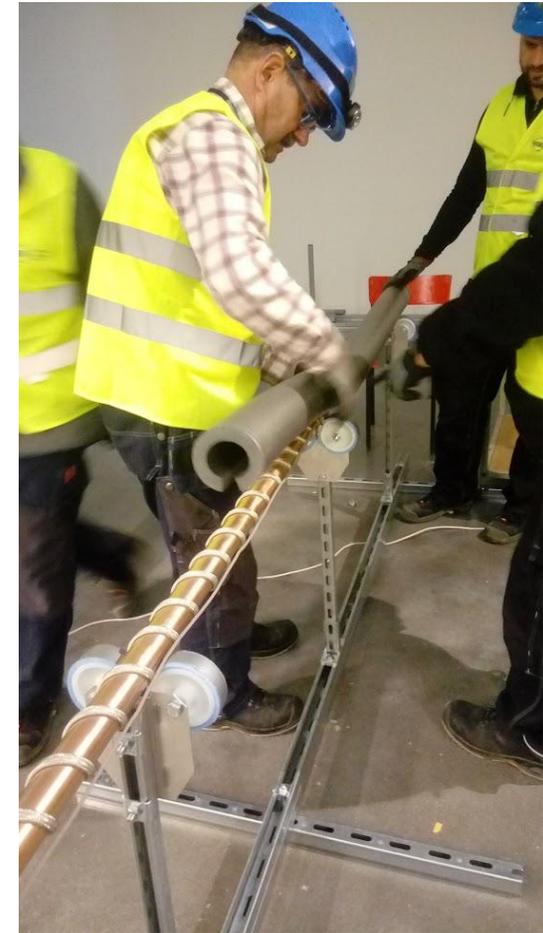
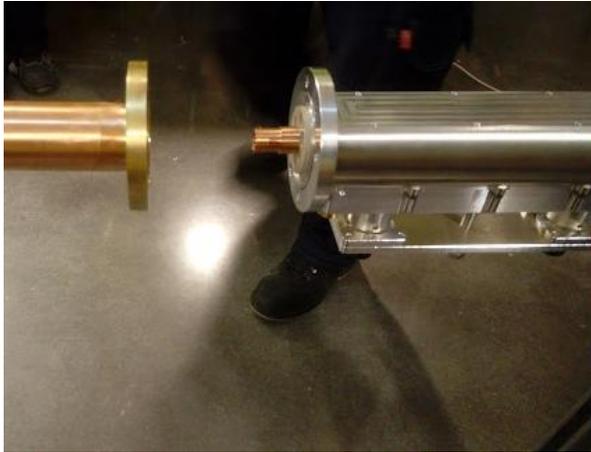


System stabilizacji temperatury - podsumowanie

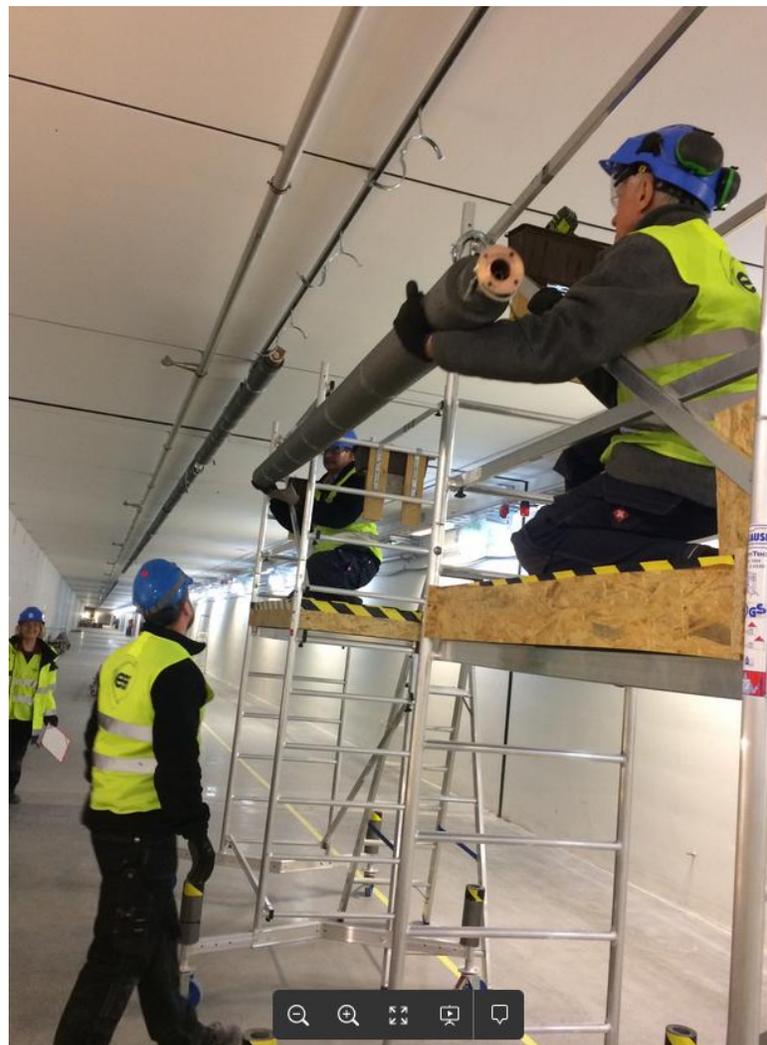
- **Zainstalowano 18 modułów TCB** obsługujących **203 obwody** stabilizacji temperatury, **275 grzałek** i **275 czujników** temperatury,
- **Uzyskano stabilizację** temperatury systemu **na poziomie 0,1 °C** na całej długości 580 m!
- **Zainstalowano 355 połączeń kablowych** pomiędzy halą Klystron Gallery, a tunelem o łącznej długości **26 km**
- **Podgrzewanie linii** od 20 °C do 40 °C powoduje jej **wydłużenie o około 13 cm!** System podwieszenia na łożyskowanych „wózkach”



Przygotowanie linii do instalacji



Zaczęliśmy instalację w pustym tunelu



Phase Reference Line po instalacji

- Zainstalowane i przetestowane wszystkie elementy
- Działa od 2022
- PW przygotowuje światłowodowe łącze do monitorowania zmian fazy w hali KG
- Prawie 9-letnia przygoda kilkunastu osób ...

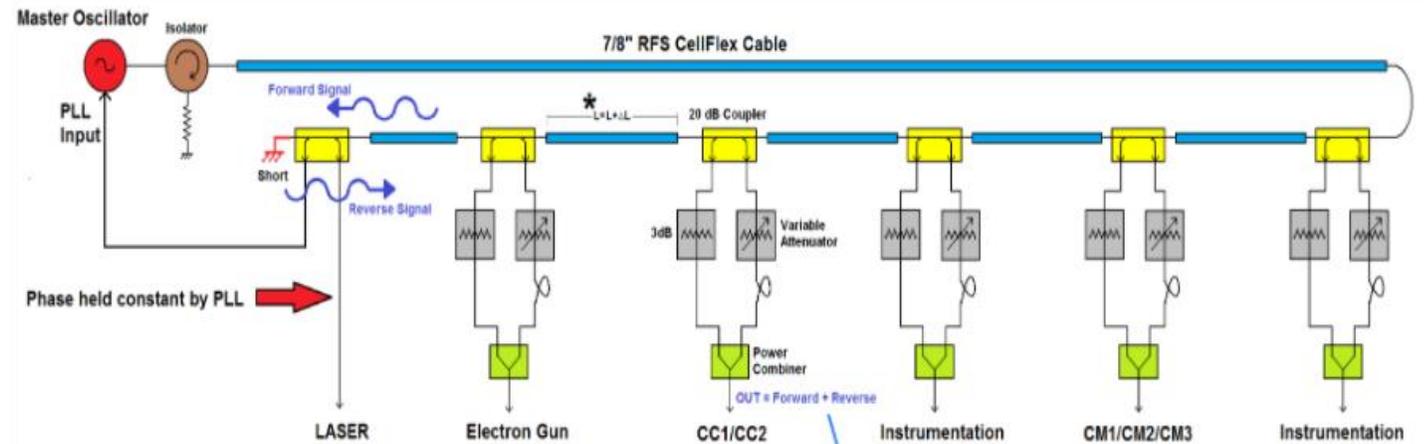


Aktywna stabilizacja dryftów fazy

Active Drift Mitigation (2)

Interferometer/phase averaging scheme

- Round trip signal phase locked at the transmitter
- But also reflected back and summed at outputs of directional couplers
- Signal vector sum averages out phase drifts
- Relatively difficult to setup
- Many problems with parasitic reflections
- Offers excellent performance for up to few hundred meters



* changes in cables lengths between tap positions due to temperature changes ($L = L + \Delta L$)

the output becomes: $OUT = A_1 \cos(\omega t + \phi_1 + \Delta \phi_1) + A_2 \cos(\omega t + \phi_2 - \Delta \phi_2)$

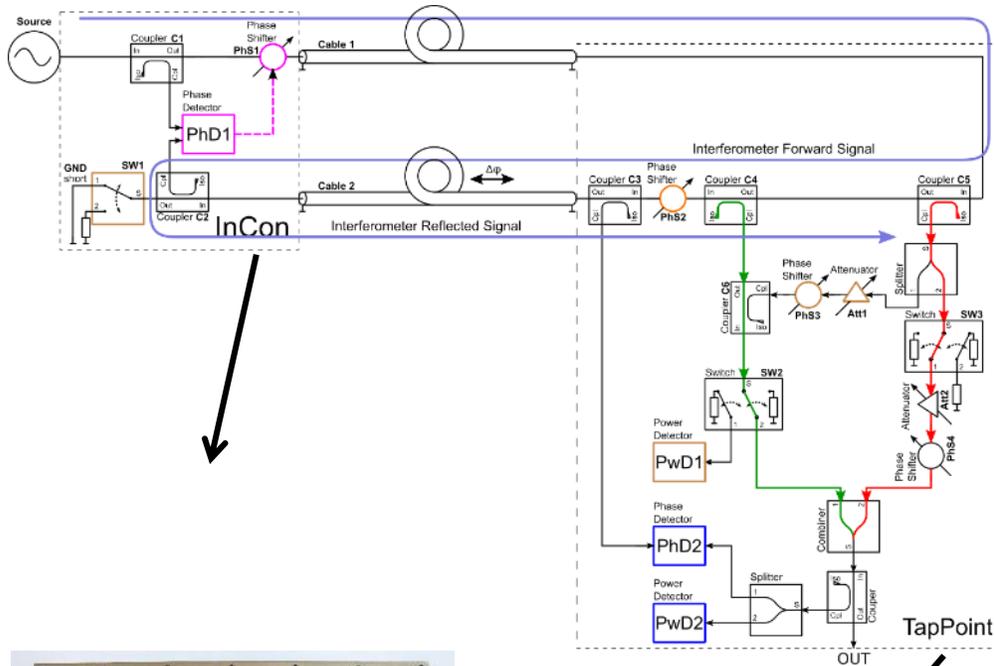
When the phase at the shorted end of the reference line is held constant, $\Delta \phi_1 = -\Delta \phi_2$

When $\Delta \phi_1 = -\Delta \phi_2$,

$$\arg \{ A_1 \cos(\omega t + \phi_1 + \Delta \phi_1) + A_2 \cos(\omega t + \phi_2 - \Delta \phi_2) \} = \arg \{ A_1 \cos(\omega t + \phi_1) + A_2 \cos(\omega t + \phi_2) \}$$

Idea by Ed Cullerton and Brian Chase (Fermilab), Presented at LLRF2011, DESY

Łącze interferometryczne dla E-XFEL



D. Sikora, ... „Phase Drift Compensating RF Link for Femtosecond Synchronization of E-XFEL”, IEEE TNS, vol. 67, 2020

2025.11.28, K. Czuba

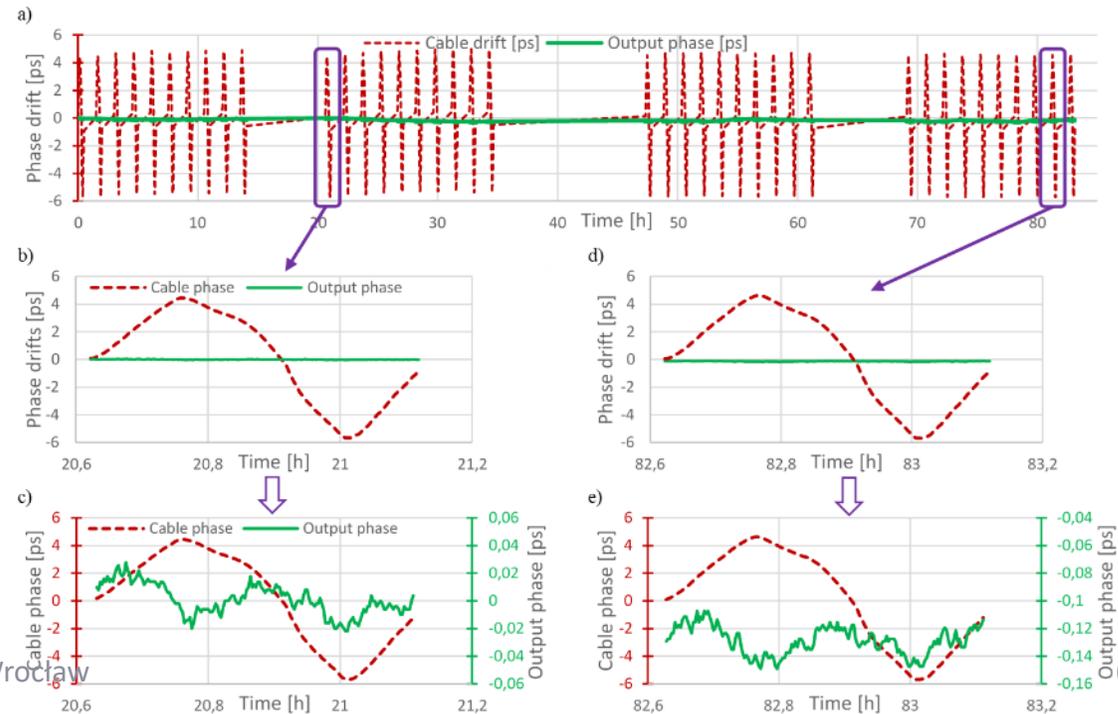
HDM #5, Wrocław

Testy interferometru

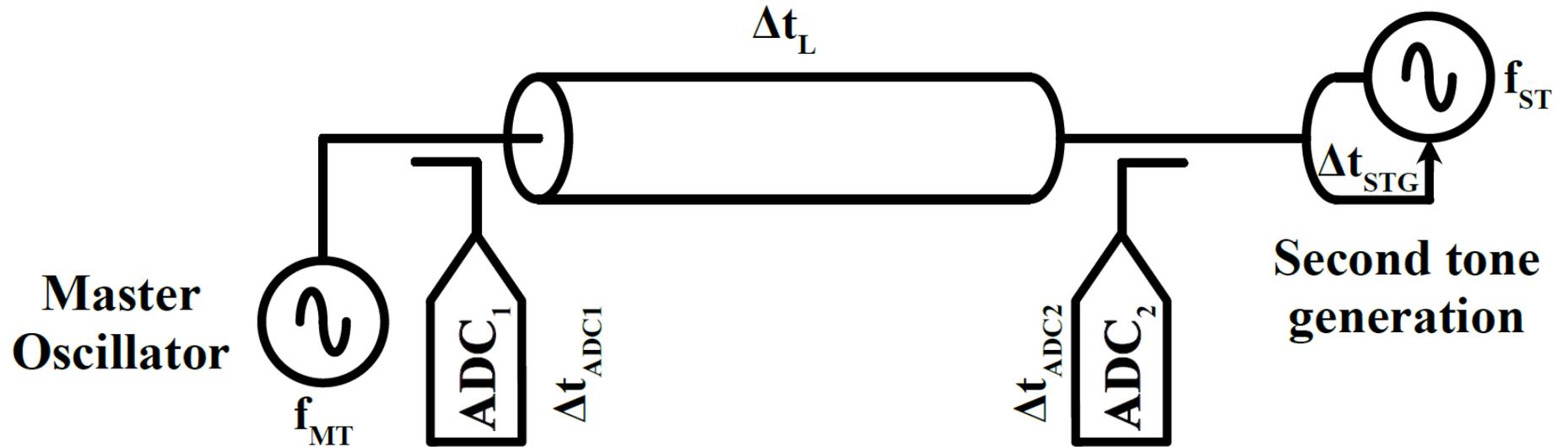


Dryfity fazy w przewodzie wymuszone za pomocą komory termicznej (12,3 ps p-p, symulacja ~150m przewodu)

Wynik: redukcja 200x, do 50 fs p-p w czasie 84h!

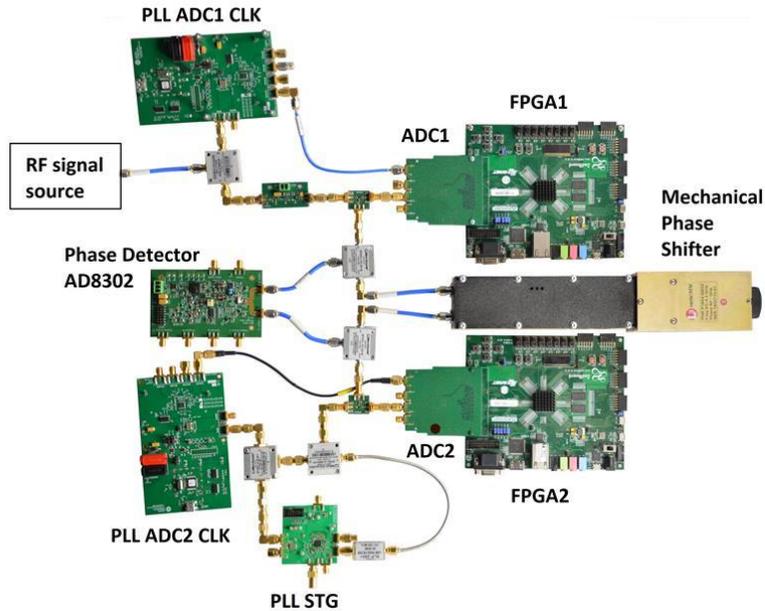


System aktywny dwutonowy – zasada pomiaru

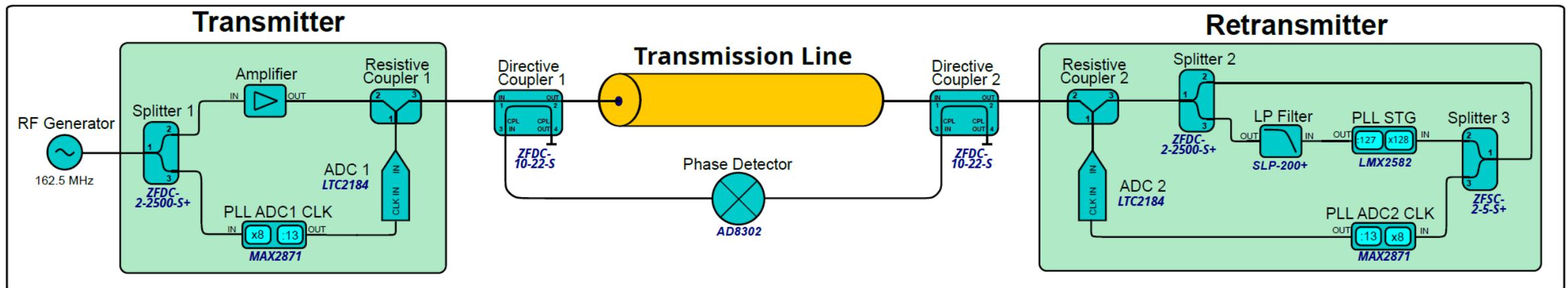


$$\Delta t_L = \frac{\Delta\varphi_{ST1} - \Delta\varphi_{ST2}}{2f_{ST}} - \frac{\Delta\varphi_{MT1} - \Delta\varphi_{MT2}}{2f_{MT}}$$

2-Tone Test System



- Test system assembled to evaluate method performance
- Mechanical phase shifter simulating line drifts
- Main tone: 162.5 MHz
- Second tones tested:
 - 20.3125 MHz \rightarrow 142.1875 MHz separation
 - 161.32 MHz \rightarrow 1.18 MHz separation



Wyniki testów systemu dwutonowego

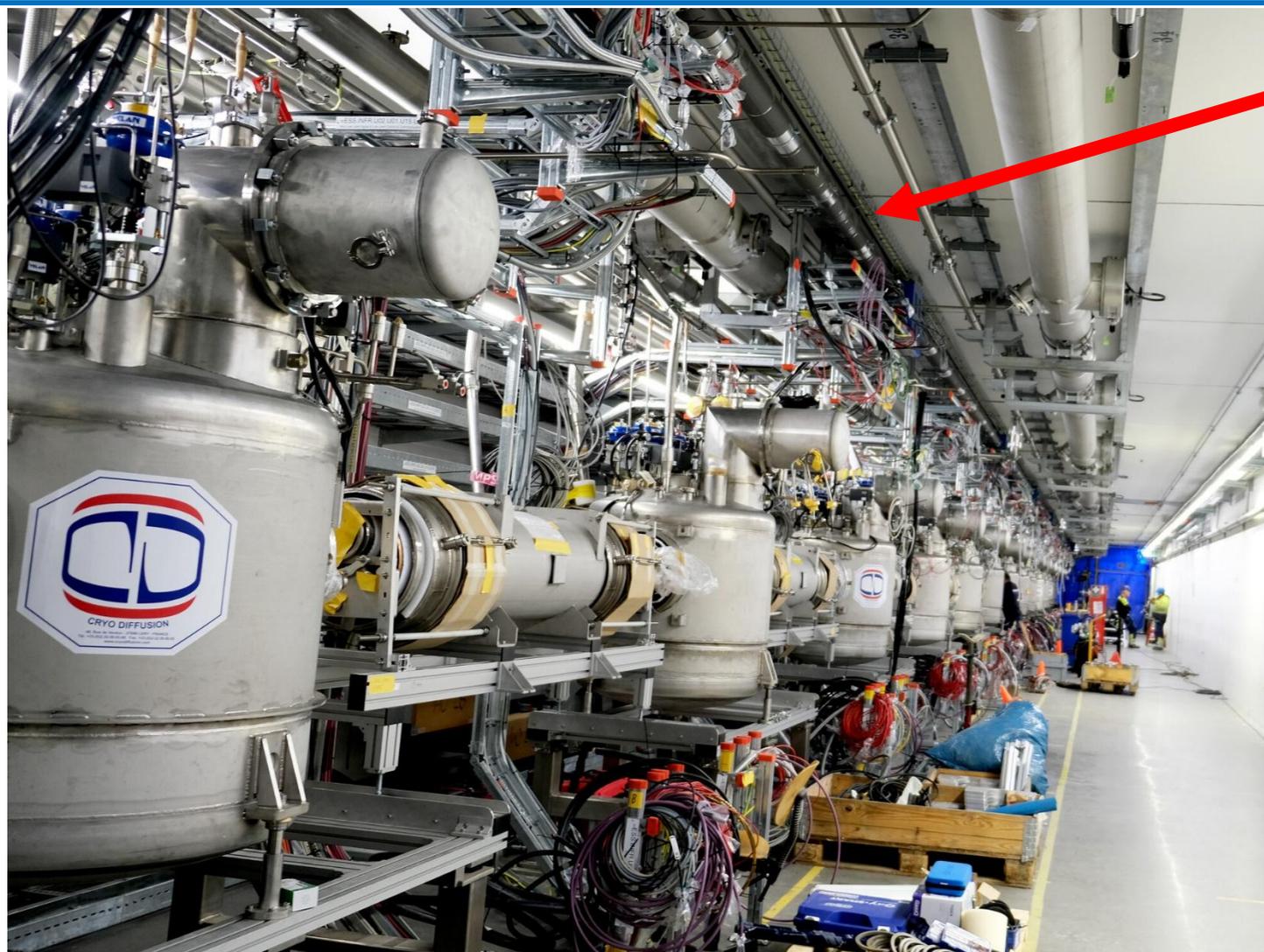
- Performance:
 - 2.6% error – 142.1875 MHz separation
 - 1.5% error – 1.18 MHz separation
- Self-drift:
 - 20.83 fs/°C – 142.1875 MHz separation
 - 667 as/°C – 1.18 MHz separation
- Więcej informacji

Šerlat, Andžej, Maciej Grzegorzówka, and Krzysztof Marek Czuba. 2025. “Two-Tone RF Signal Phase Drift Measurement System.” Measurement 243
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116183>

Podsumowanie

- Budowa „serca” akceleratora jest fascynującym wyzwaniem
- Systemy timing’owe rozprawdzają trigger’y, informacje o zdarzeniach oraz sygnały zegarowe o mniejszej jakości (ps to ns of jitter)
- Systemy referencyjne używane są do dystrybucji sygnałów harmonicznyc harmoni z femtosekundową precyzją
- Szumy fazowe są łatwe do uzyskania i dystrybucji (niestałość krótkoterminowa)
- Największy problem: dryfty fazy na dużych odległościach
- Najbardziej zaawansowane systemy dystrybucji wykorzystują techniki aktywne do zapewnienia (sub)femtosekundowych dryftów fazy
- **Systemy optyczne....**

Dziękuję za uwagę



Tu się schowało 😊