

Realizacja międzynarodowego poziomu odniesienia grawimetrycznego w Obserwatorium Borowa Góra

Przemysław Dykowski¹, Jan Krynski¹, Marcin Sękowski¹, Tomasz Olszak²



Warsaw University
of Technology

(1) *Instytut Geodezji i Kartografii, Centrum Geodezji i Geodynamiki*

(2) *Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii*



International Gravity Reference System

Warsaw University
of Technology

Motivation:

IAG Resolution No. 2 (2015): Establishment of a global absolute gravity reference system

...

Noting:

...

- that the International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN71) **no longer fulfils the requirements and accuracy** of a modern gravity reference thus requiring replacement by a new global gravity reference system,
- that **measurement accuracies have improved** from the „100 μGal ” to the „few μGal ” level,
- that only with improved gravity reference system time-dependent gravity variations can be determined with **high reliability**,

...

Recommends:

...

- to establish a gravity reference frame by **globally distributed reference stations** linked to the international comparisons of absolute gravimeters where precise gravity reference is available at any time,
- to initiate the **replacement of the International Gravity Standardization Net 1971** (IGSN71) and the latest International Absolute Gravity Base Station Network by the new Global Absolute Gravity Reference Frame.



International Gravity Reference System

Warsaw University
of Technology

Motivation:

IAG Resolution No. 4 (2019): Establishment of the Infrastructure for the International Gravity Reference Frame

...

Noting:

- that the realization of the International Gravity Reference System (IGRS), the International Gravity Reference Frame (IGRF), is based on measurements with absolute gravimeters (AG) monitored at reference stations and during international comparisons, which needs the support of national and international institutions,

...

Urges:

- **International and national institutions**, agencies and governmental bodies in charge of geodetic infrastructure to
 - **Establish a set of absolute gravity reference stations** on the national level,
 - Perform **regular absolute gravity observations** at these stations,
 - Participate in **comparisons of absolute gravimeters** to ensure their compatibility,
 - **Make the results available open access.**



International Gravity Reference System

Warsaw University
of Technology

Reference system:

The fundamental principles: The definition of gravity must be stable over time.

Measurand:

Instantaneous acceleration of free-fall expressed in the International System of Units (SI)

Set of conventional corrections

- Zero-tide system
- Standard atmosphere ISO 2533:1975
- Earth rotation axis IERS reference pole define the conventional quantity “acceleration of gravity”

Reference:

Wziontek H., Bonvalot S., Falk R. et al. Status of the International Gravity Reference System and Frame. J Geod **95**, 7 (2021).
<https://doi.org/10.1007/s00190-020-01438-9>



International Gravity Reference Frame

Warsaw University
of Technology

Reference frame:

The realization of the system: The numbers actually obtained

- **Observations with absolute gravimeters:** (epoch, position, gravity, vertical gravity gradient, reference height)
- **Comparisons of absolute gravimeters:** traceability and compatibility of the observations and the processing, assessment of systematic effects
- **Set of conventional models** for correction of temporal changes (tides, ocean tide loading, atmosphere, polar motion) - **IGRS Conventions 2020**
- **Compatible infrastructure** (markers, points) and documentation (database)

Reference:

Wziontek H., Bonvalot S., Falk R. et al. Status of the International Gravity Reference System and Frame. *J Geod* **95**, 7 (2021).
<https://doi.org/10.1007/s00190-020-01438-9>

Reference frame:

Infrastructure:

- **Reference stations** are essential to ensure a long-term stable absolute gravity reference
 - Continuous operation of a superconducting gravimeter in combination with repeated absolute gravity observations
 - Continuously operated absolute quantum gravimeter
 - Repeated absolute gravity observations (two months interval recommended)
- **Comparison stations** are reference stations as described above with extended facilities to check the compatibility of instruments, either based on continuous gravity monitoring or by simultaneous measurements of at least two absolute gravimeters.
- **Core stations** provide a link to the ITRF where at least one space geodetic technique is established and GGOS core sites play an essential role.

Reference:

Wziontek H., Bonvalot S., Falk R. et al. Status of the International Gravity Reference System and Frame. *J Geod* **95**, 7 (2021).
<https://doi.org/10.1007/s00190-020-01438-9>

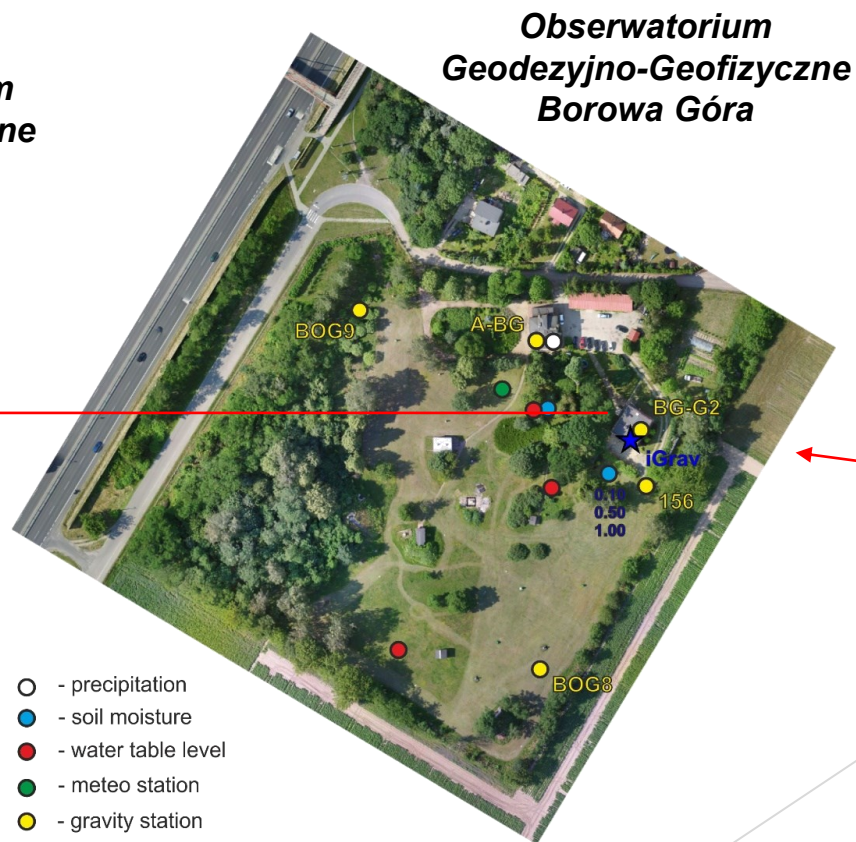
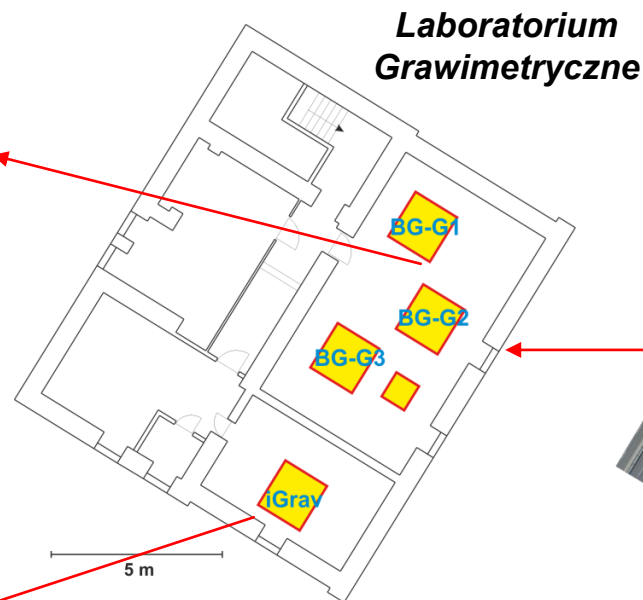


Obserwatorium Borowa Góra

Obserwatorium Geodezyjno-Geofizyczne Borowa Góra

- położone ~35 km na północ od Warszawy

Infrastruktura grawimetryczna:



Obserwatorium Geodezyjno-Geofizyczne Borowa Góra

Od 2016 – ciągła rejestracja zmian przyspieszenia siły ciężkości **grawimetrem nadprzewodnikowym iGrav-027** uzupełniane przez pomiary:

- **grawimetrem A10-020 (~miesięczne)**
 - Coroczne wzorcowanie lasera, zegara, barometru
 - **RCAG2015 (EURAMET.M.G-K2), RCAG2018 (EURAMET.M.G-K3)**
- **grawimetrem FG5-230 (kilkukrotnie) – GiK PW**
 - **RCAG2015 (EURAMET.M.G-K2)**

Analizowany okres: 2016.05-2021.05

Ewaluacja dryftu – 2 warianty (wszystkie i wybrane dane A10-020)

2016.05 – 2017.01 – krzywa eksponencjalna

2017.01 – 2019.01 – dryft liniowy

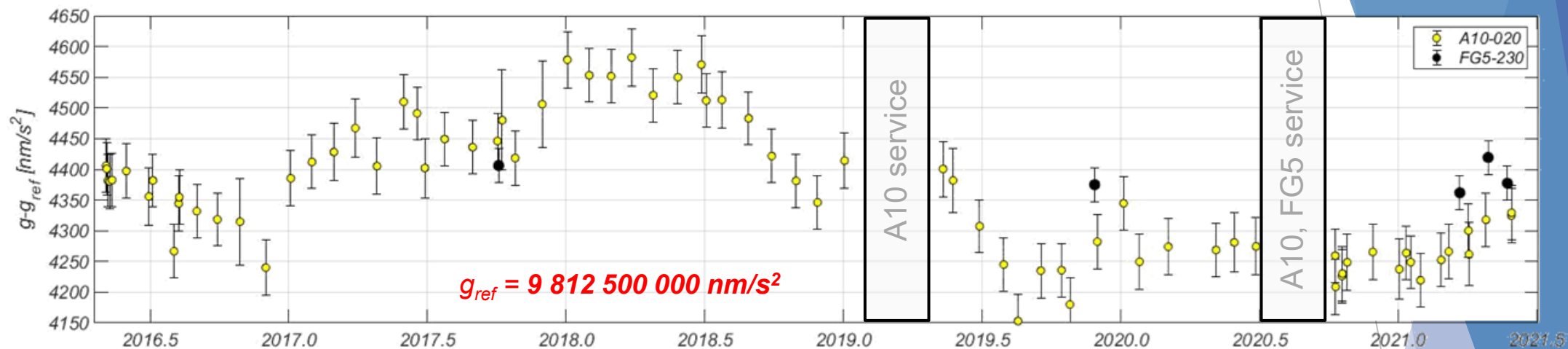
2019.01 – założenie dryftu liniowego

Wybrane dane A10-020 (<T.U. do krzywej wpasowania)

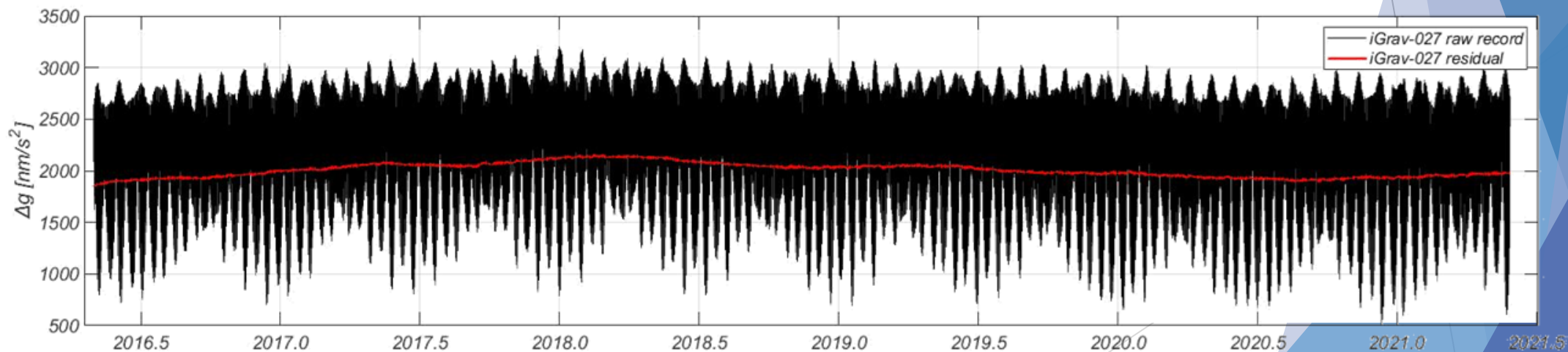
$1 \mu\text{Gal} = 10 \text{ nm/s}^2$



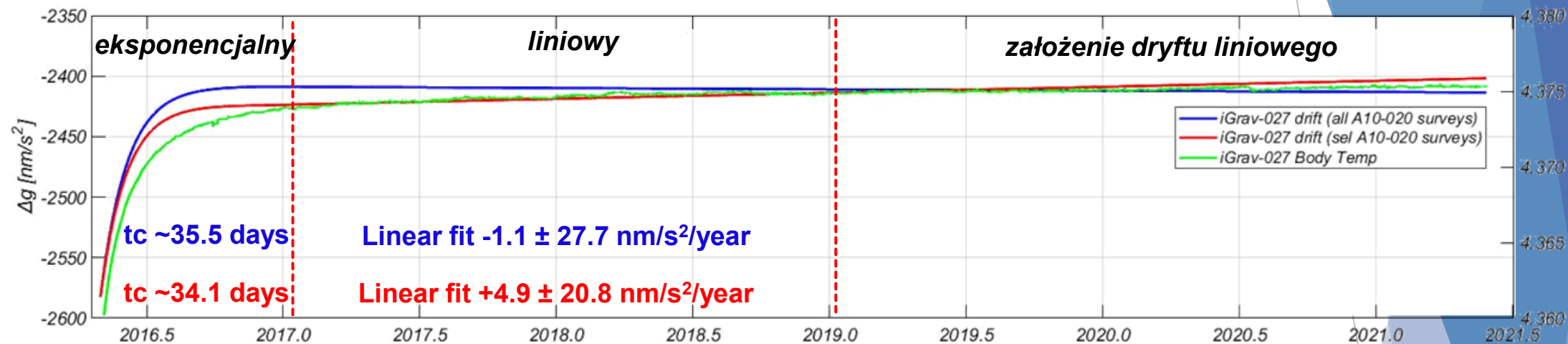
Pomiary absolutne (A10-020 & FG5-230)



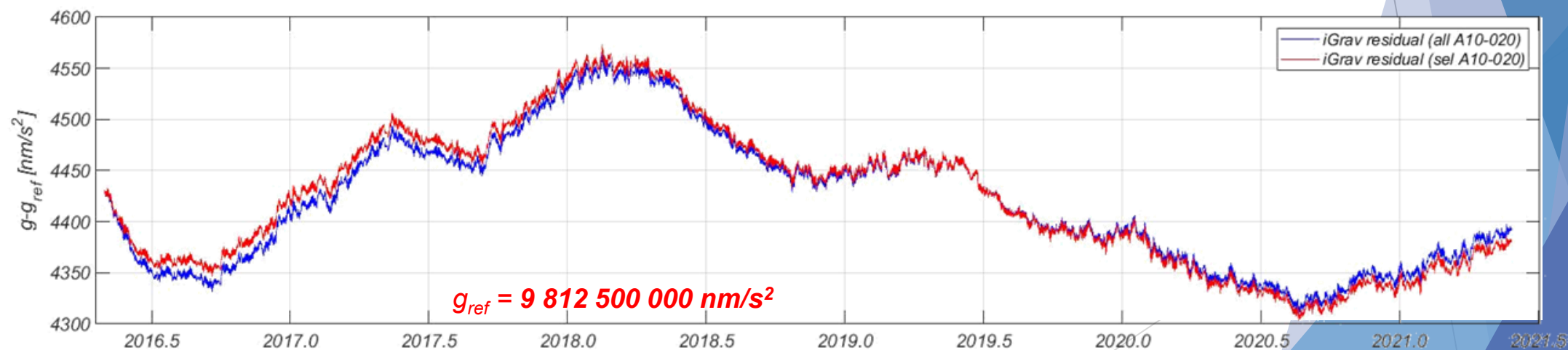
Rejestracje ciągłe (iGrav-027)



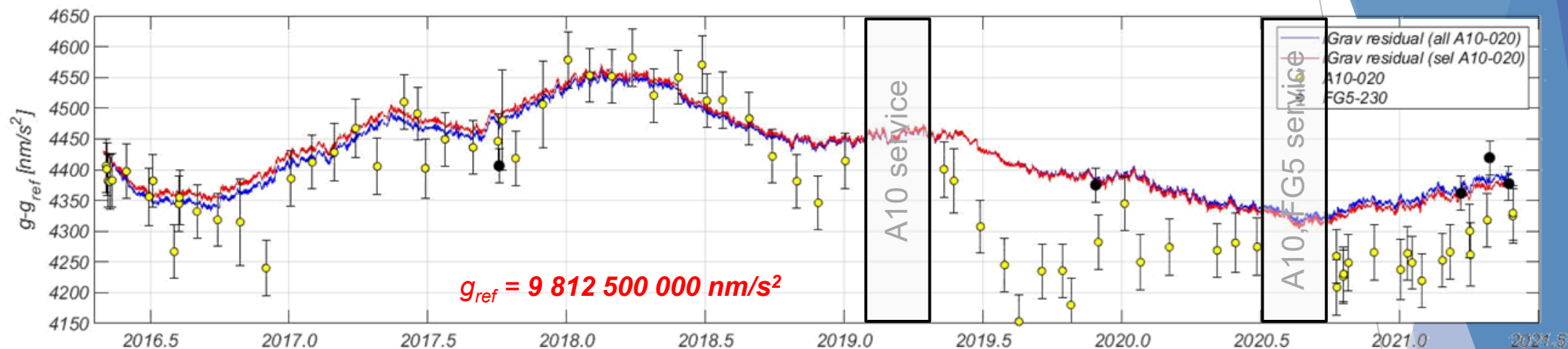
Dryft grawimetru iGrav-027 (2 warianty)



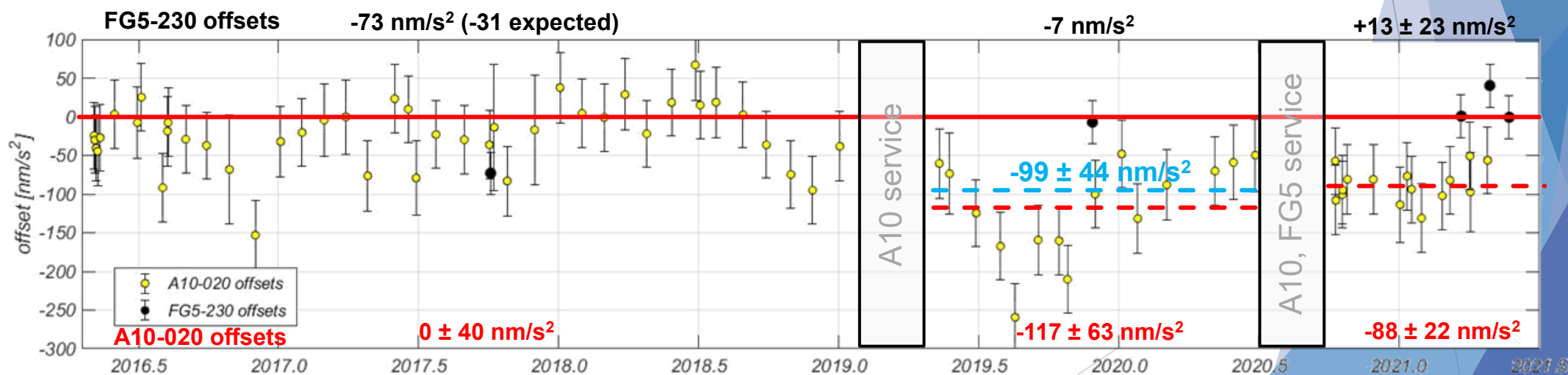
Residua iGrav-027 skorygowane o dryft (2 warianty)



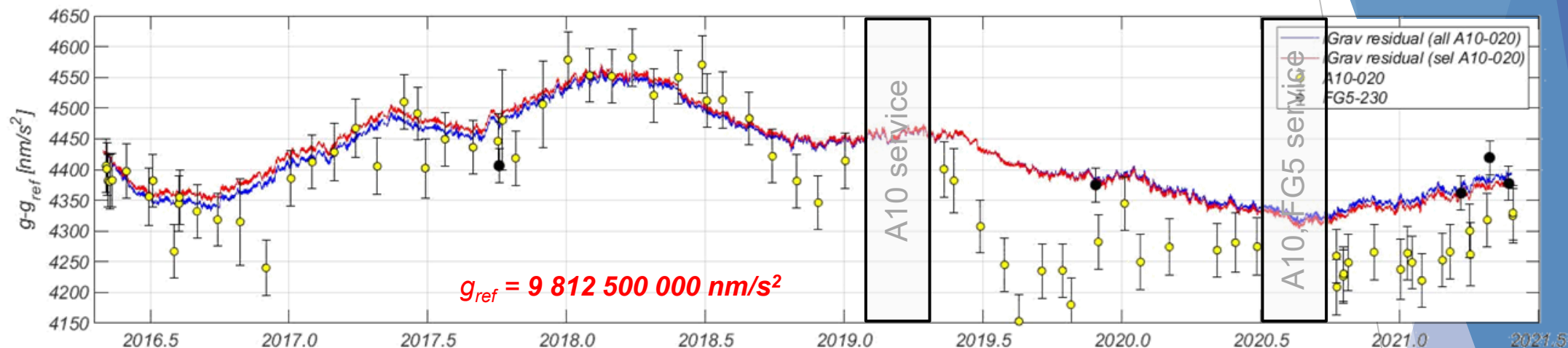
Kombinacja absolutnych i ciągłych rejestracji – grawimetryczna funkcja odniesienia



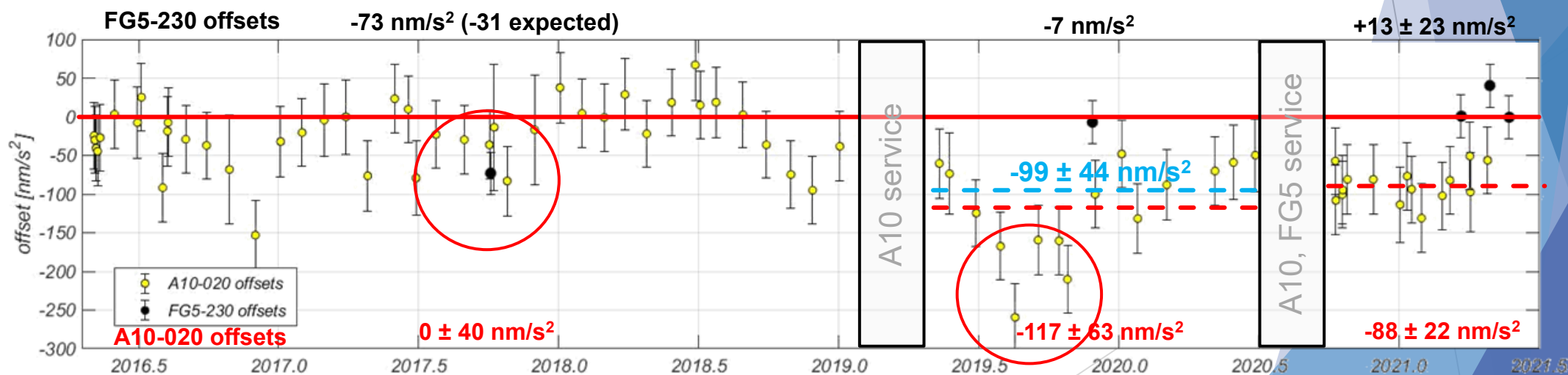
Offset grawimetrów absolutnych względem grawimetrycznej funkcji odniesienia



Kombinacja absolutnych i ciągłych rejestracji – grawimetryczna funkcja odniesienia



Offset grawimetrów absolutnych względem grawimetrycznej funkcji odniesienia





Absolutny Grawimetr Kwantowy

2021 – **Absolutny Grawimetr Kwantowy AQG-B07** (prod. *iXblue*, dawniej *Muquans*) - instalacja w Obserwatorium Borowa Góra w październiku 2021

- Instrument nowej generacji (*interferencja zimnych atomów*)

- Wersja B – możliwość pomiarów terenowych

Główne różnice do klasycznych grawimetrów absolutnych

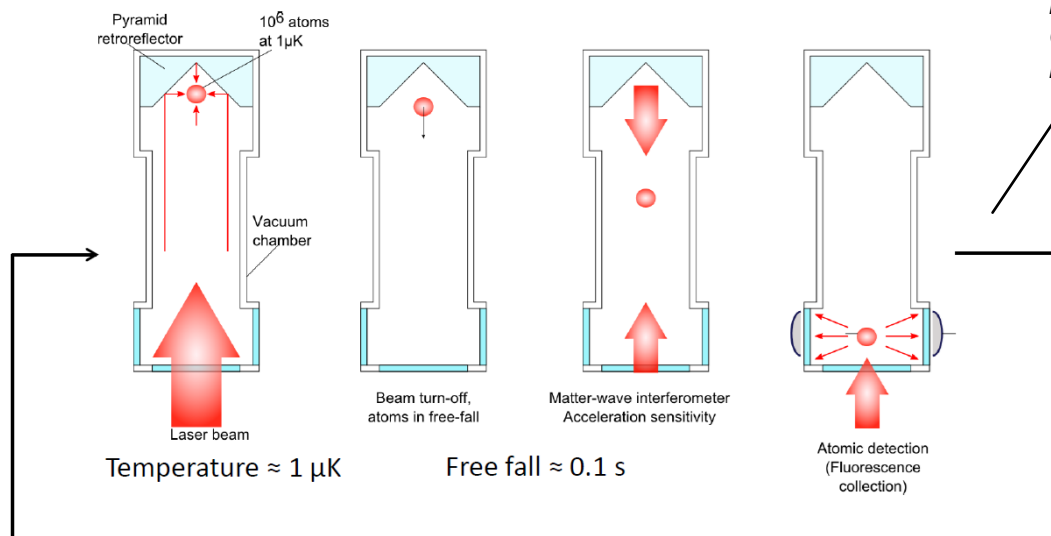
- masą testową jest chmura atomów Rb^{87} schłodzona do temperatury $\sim 1 \mu\text{K}$ o średnicy $\sim 1 \text{ mm}$
- brak części mechanicznych (brak zużycia mechanicznego, brak limitu spadków)
 - A10/FG5 – „limit” spadków $\sim 1 \text{ mln}$
 - AQG – brak limitu – $\sim 4.5 \text{ mln}$ na miesiąc ciągłej pracy
- próbkowanie z częstotliwością $\sim 2 \text{ Hz}$
- nowa (niezależna) technologia dająca nowy potencjał długookresowej stabilności utrzymania poziomu odniesienia grawimetrycznego
- „samokalibracja” – wewnętrzna spektroskopia laserowa, rubidowy zegar atomowy
- kompensacja mikrosejsm poprzez wbudowany akcelerometr





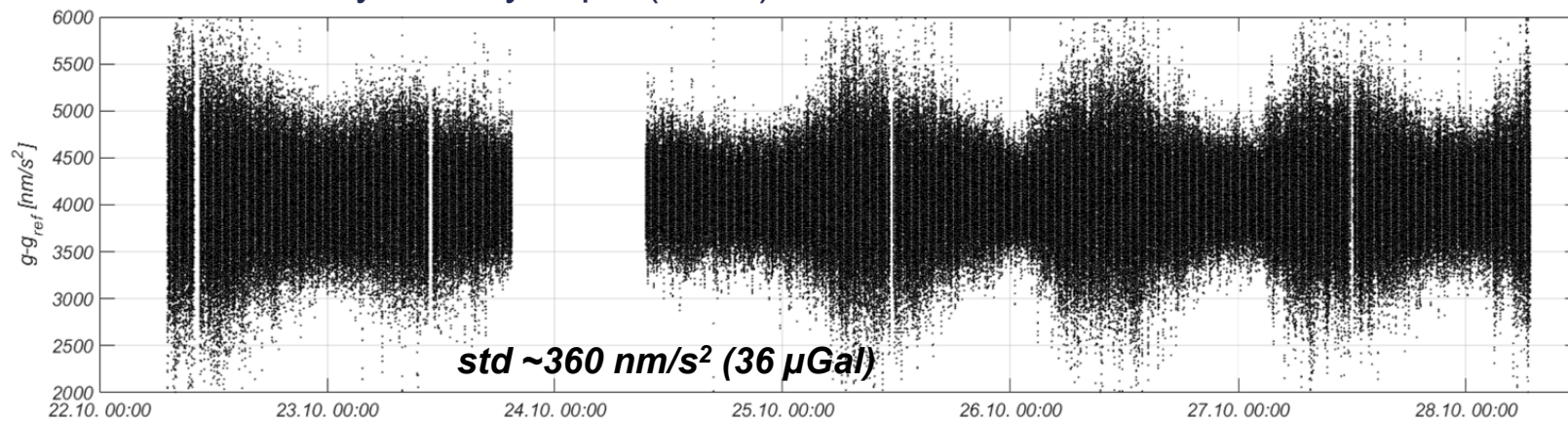
Absolutny Grawimetr Kwantowy

Uproszczona zasada działania



Vermeulen, P., Antoni-Micollier, L., Mazzoni, T., Condon, G., Ménoret, V., Janvier, C., Desruelle, B., Landragin, A., Lautier-Gaud, J., and Bouyer, P.: Operating the Absolute Quantum Gravimeter outside of the laboratory, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-8969, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-8969>, 2020.

Przykładowy zapis (~2Hz):

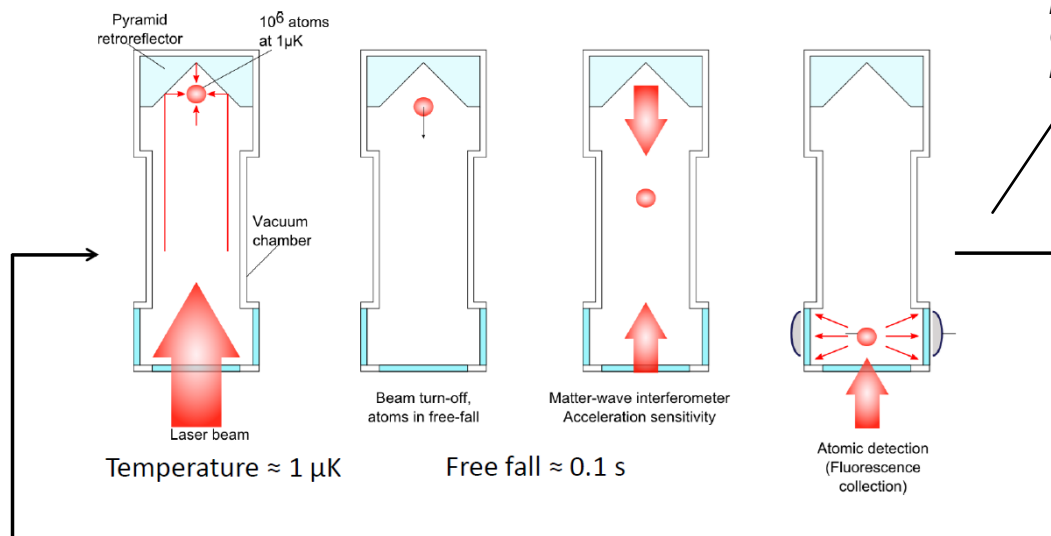


$g_{ref} = 9\,812\,500\,000\text{ nm/s}^2$



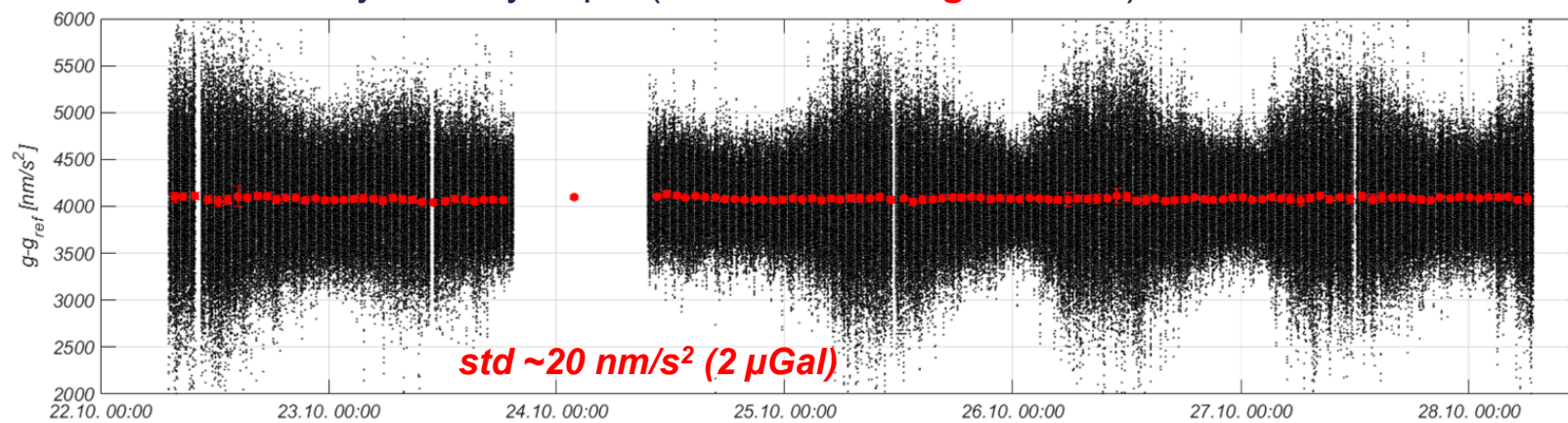
Absolutny Grawimetr Kwantowy

Uproszczona zasada działania



Vermeulen, P., Antoni-Micollier, L., Mazzoni, T., Condon, G., Ménoret, V., Janvier, C., Desruelle, B., Landragin, A., Lautier-Gaud, J., and Bouyer, P.: Operating the Absolute Quantum Gravimeter outside of the laboratory, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-8969, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-8969>, 2020.

Przykładowy zapis (*uśrednianie 1 godzinne*):

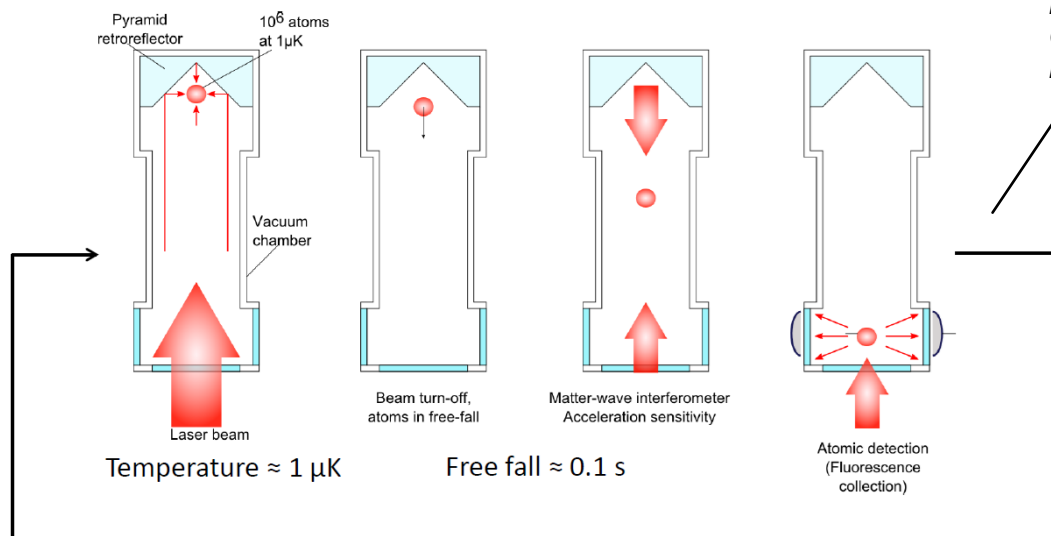


$$g_{ref} = 9\,812\,500\,000 \text{ nm/s}^2$$



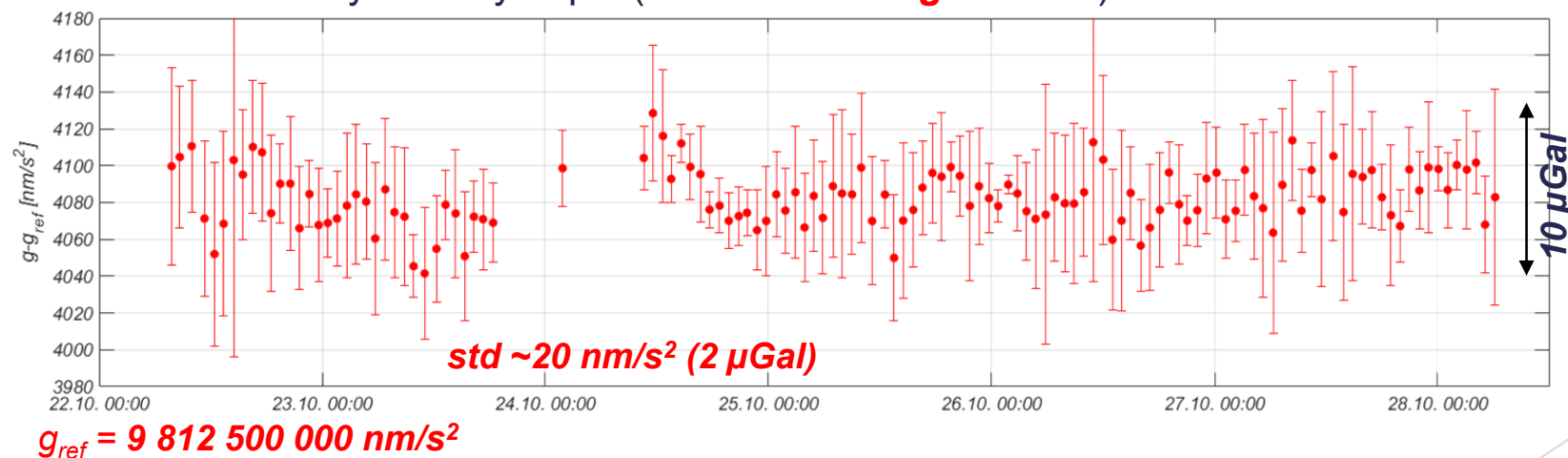
Absolutny Grawimetr Kwantowy

Uproszczona zasada działania



Vermeulen, P., Antoni-Micollier, L., Mazzoni, T., Condon, G., Ménoret, V., Janvier, C., Desruelle, B., Landragin, A., Lautier-Gaud, J., and Bouyer, P.: Operating the Absolute Quantum Gravimeter outside of the laboratory, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-8969, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-8969>, 2020.

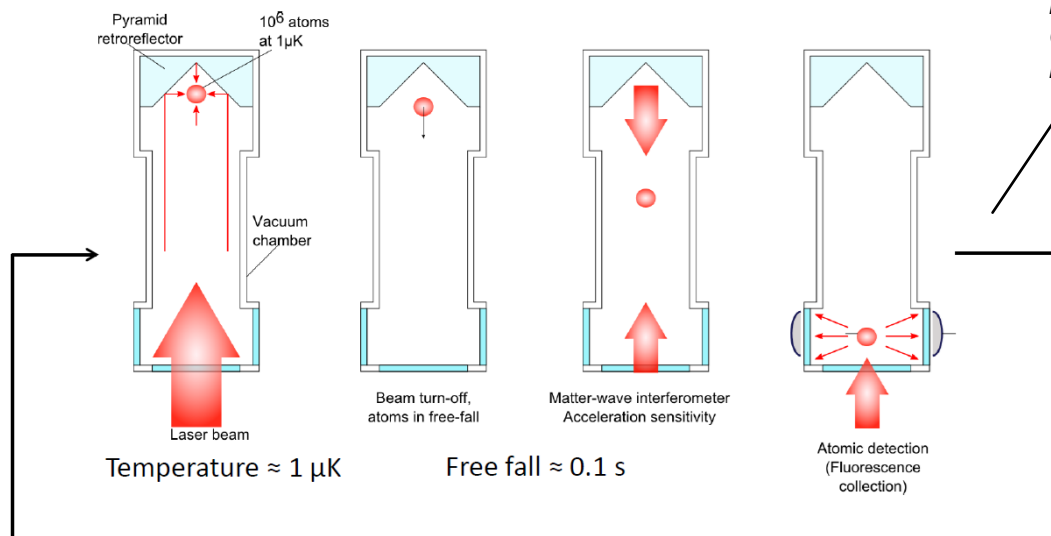
Przykładowy zapis (**uśrednianie 1 godzinne**):





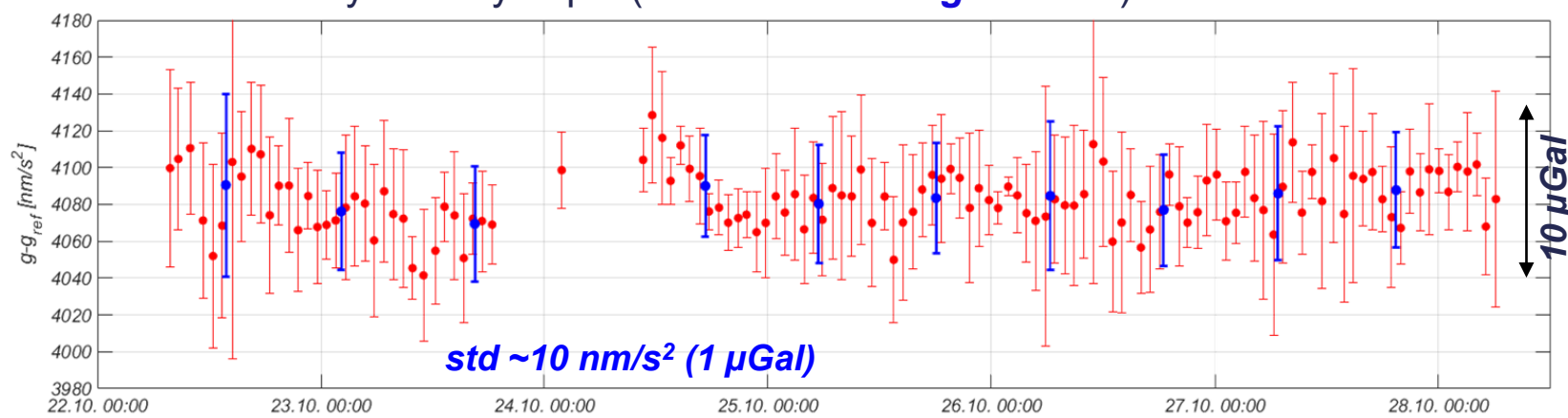
Absolutny Grawimetr Kwantowy

Uproszczona zasada działania



Vermeulen, P., Antoni-Micollier, L., Mazzoni, T., Condon, G., Ménoret, V., Janvier, C., Desruelle, B., Landragin, A., Lautier-Gaud, J., and Bouyer, P.: Operating the Absolute Quantum Gravimeter outside of the laboratory, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-8969, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-8969>, 2020.

Przykładowy zapis (uśrednianie 12 godzinne):

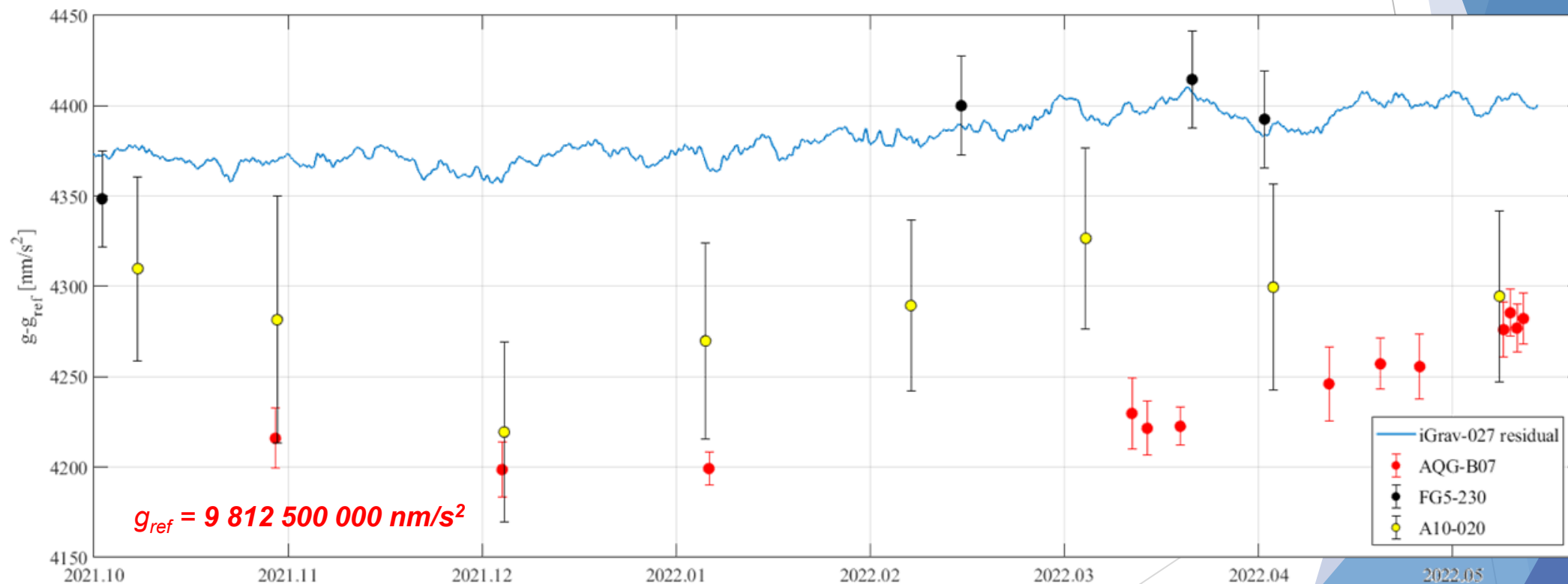


$$g_{ref} = 9\,812\,500\,000 \text{ nm/s}^2$$



Okresowe vs. ciągłe pomiary absolutne przyspieszenia siły ciężkości (Borowa Góra) – słup BG_G2

- *iGrav-027* ~zgodny z grawimetryczną funkcją odniesienia
- Średnie różnice: AQG – A10 (-44 nm/s^2), AQG – FG5 (-150 nm/s^2), AQG – *iGrav* (-157 nm/s^2)
- Słupki błędów: A10-020, FG5-230 (T.U.), AQG-B07 (1h std)
- **Efekty systematyczne i budżet niepewności pomiaru grawimetru AQG są w trakcie ewaluacji przez iXblue**

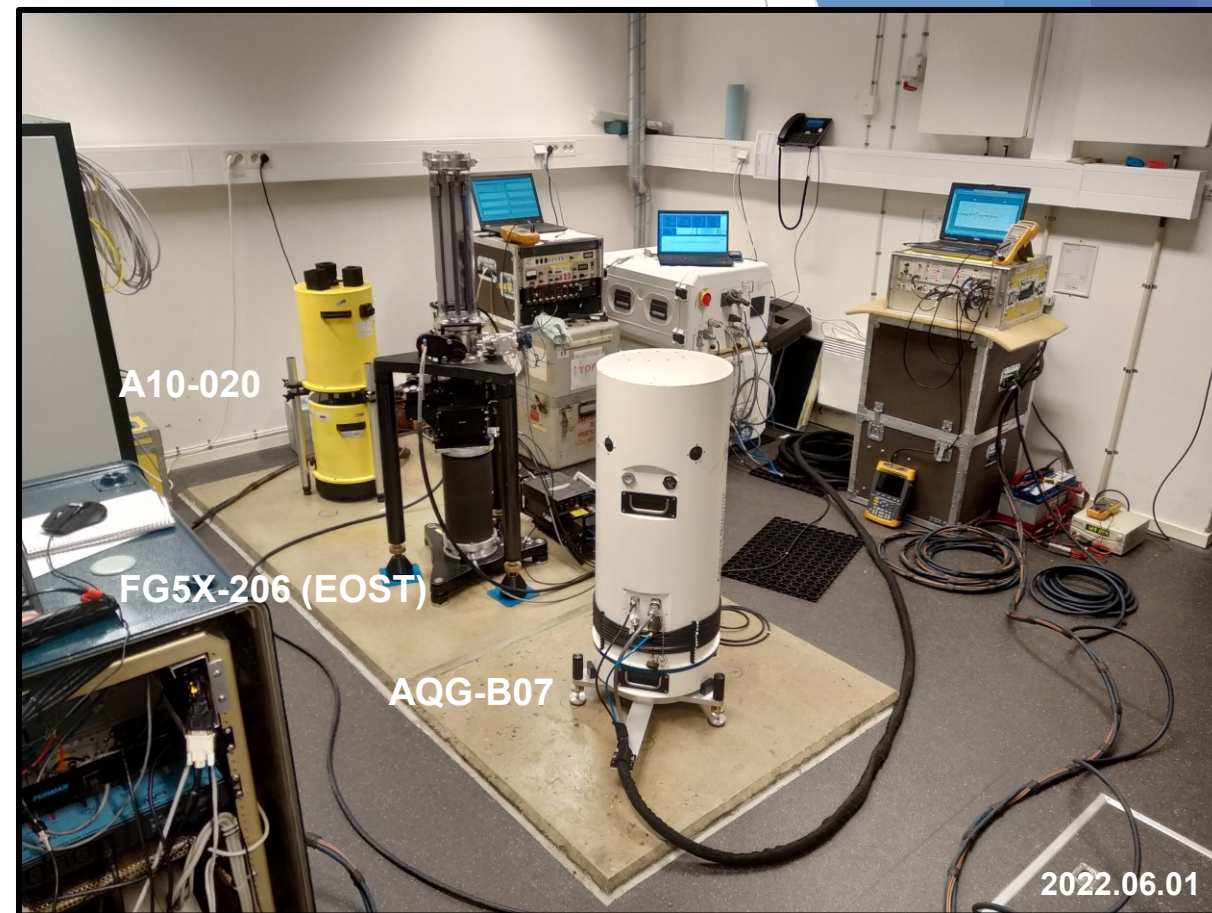


Okresowe vs. ciągłe pomiary absolutne przyspieszenia siły ciężkości (Borowa Góra) – słup BG_G2

- Wyniki iGrav, A10, FG5 przesunięte do AQG, AQG-B07 ujednolicone (wyniki <24h)
- Spójność względem iGrav-027: AQG (**26 nm/s²**), A10 (**24 nm/s²**), FG5 (**16 nm/s²**)
- Słupki błędów: A10-020, FG5-230 (T.U.), AQG-B07 (1h std)
- **Efekty systematyczne i budżet niepewności pomiaru grawimetru AQG są w trakcie ewaluacji przez iXblue**



- Wyniki uzyskiwane grawimetrem AQQ-B07 wyniki są obiecujące
- Grawimetr AQQ-B07 wziął udział w Nordyckiej kampanii porównawczej grawimetrów absolutnych NKG-CAG-2022 (laboratorium nadzorujące – Fiński Instytut Geodezyjny)
 - 19 grawimetrów:
 - 14 – FG5(X)
 - 2 – A10
 - 3 - AQQ
- Onsala Space Observatory 2022.05-07
- „przeniesienie” międzynarodowego poziomu odniesienia grawimetrycznego do Obserwatorium Borowa Góra



- **Przyjęcie IGRS** jako obowiązującego systemu odniesienia grawimetrycznego jest w toku, zgodnie z rezolucją nr 4 z 2019 IAG **wymaga wcześniejszych przygotowań** z wsparciem międzynarodowych i krajowych instytucji, agencji rządowych odpowiedzialnych za infrastrukturę geodezyjną
- **Obserwatorium Borowa Góra** spełnia warunki stawiane stacjom referencyjnym, porównawczym, bazowym IGRS/IGRF
- Utrzymywanie **grawimetrycznej funkcji odniesienia**:
 - pozwala na regularne odnoszenie uzyskiwanych wyników względem międzynarodowego poziomu odniesienia grawimetrycznego (szczególnie w okresach pomiędzy kampaniami porównawczymi, w okresie pandemii)
 - pozwala na monitorowanie stanu grawimetrów absolutnych (stabilność, serwis grawimetrów)
- **Udział w kampaniach porównawczych grawimetrów absolutnych** wciąż pozostaje kluczowym elementem utrzymania grawimetrycznej funkcji odniesienia – udział w kampanii Nordyckiej w 2022 roku
- Pierwsze wyniki uzyskiwane absolutnym grawimetrem kwantowym AQG-B07 są obiecujące, szczególnie w zakresie relacji do grawimetru nadprzewodnikowego iGrav-027 (przeniesienie poziomu odniesienia, ewaluacja dryftu, wyznaczenia współczynnika skali)