



JAGIELLONIAN
UNIVERSITY
IN KRAKÓW



SOLARIS
NATIONAL SYNCHROTRON
RADIATION CENTRE

SKANDEM I LASEREM OPowieść o zmaganiach na kresach ultraprecyzyjnej metrologii

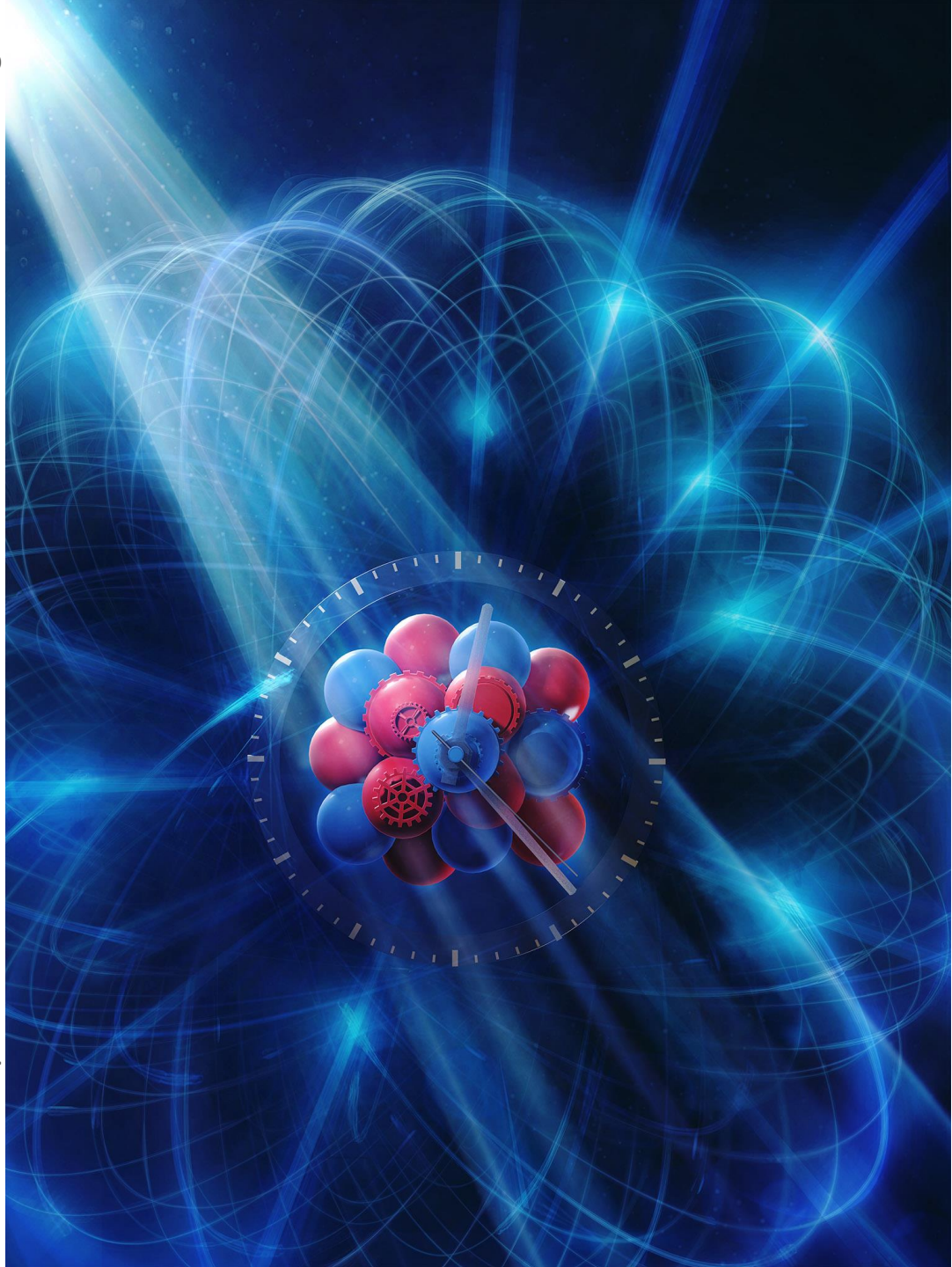
Tomasz S. Kołodziej

reprezentujący zespół badawczy:

Yuri Shvyd'ko, Ralf Röhlsberger, Olga Kocharovskaya, Jörg Evers, Gianluca Aldo Geloni, Peifan Liu, Deming Shu, Antonino Miceli, Brandon Stone, Willi Hippler, Berit Marx-Glowna, Ingo Uschmann, Robert Loetzsch, Olaf Leupold, Hans-Christian Wille, Ilya Sergeev, Miriam Gerharz, Xiwen Zhang, Christian Grech, Marc Guetg, Vitali Kocharyan, Naresh Kujala, Shan Liu, Weilun Qin, Alexey Zozulya, Jörg Hallmann, Ulrike Boesenberg, Wonhyuk Jo, Johannes Möller, Angel Rodriguez-Fernandez, Mohamed Youssef, Anders Madsen & Tomasz Kołodziej

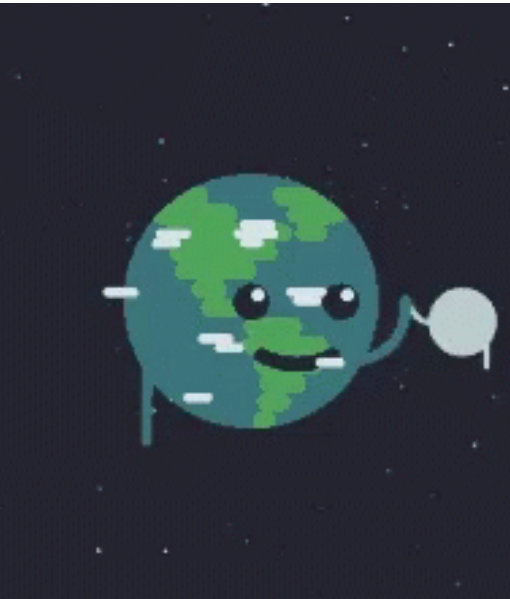
Seminarium astrofizyczne Komisji Astrofizyki PAU

Kraków, 27.11.2024.



Jak mierzymy czas i częstotliwość?

astronomiczne



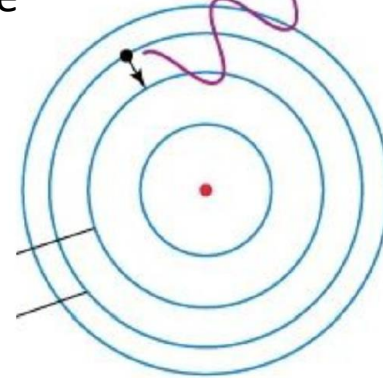
mechaniczne



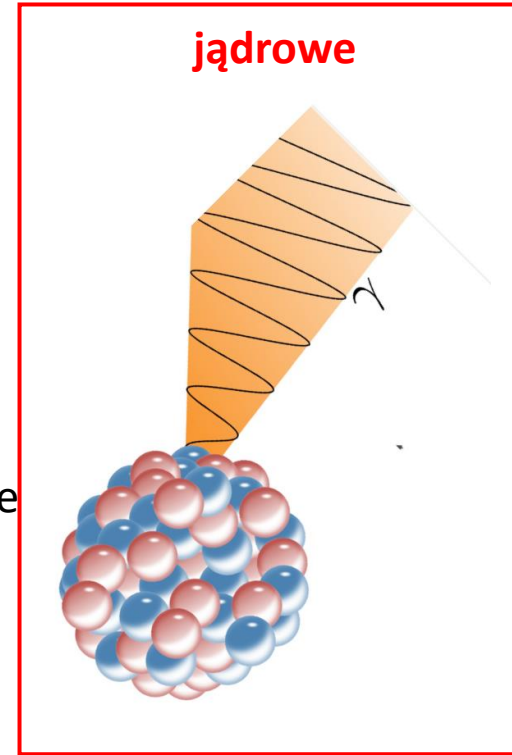
elektroniczne/ciało stałe



atomowe



jądrowe

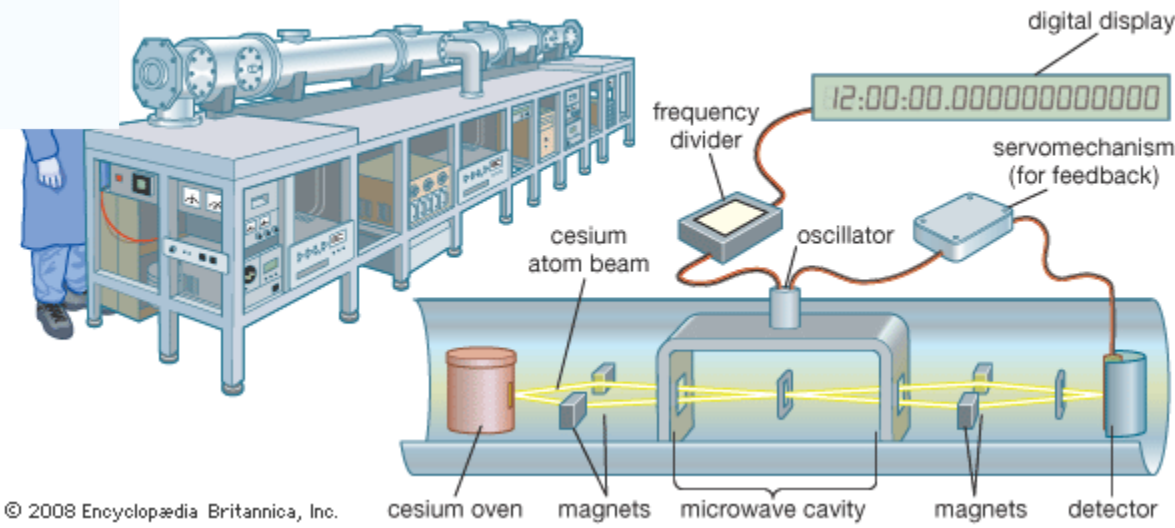
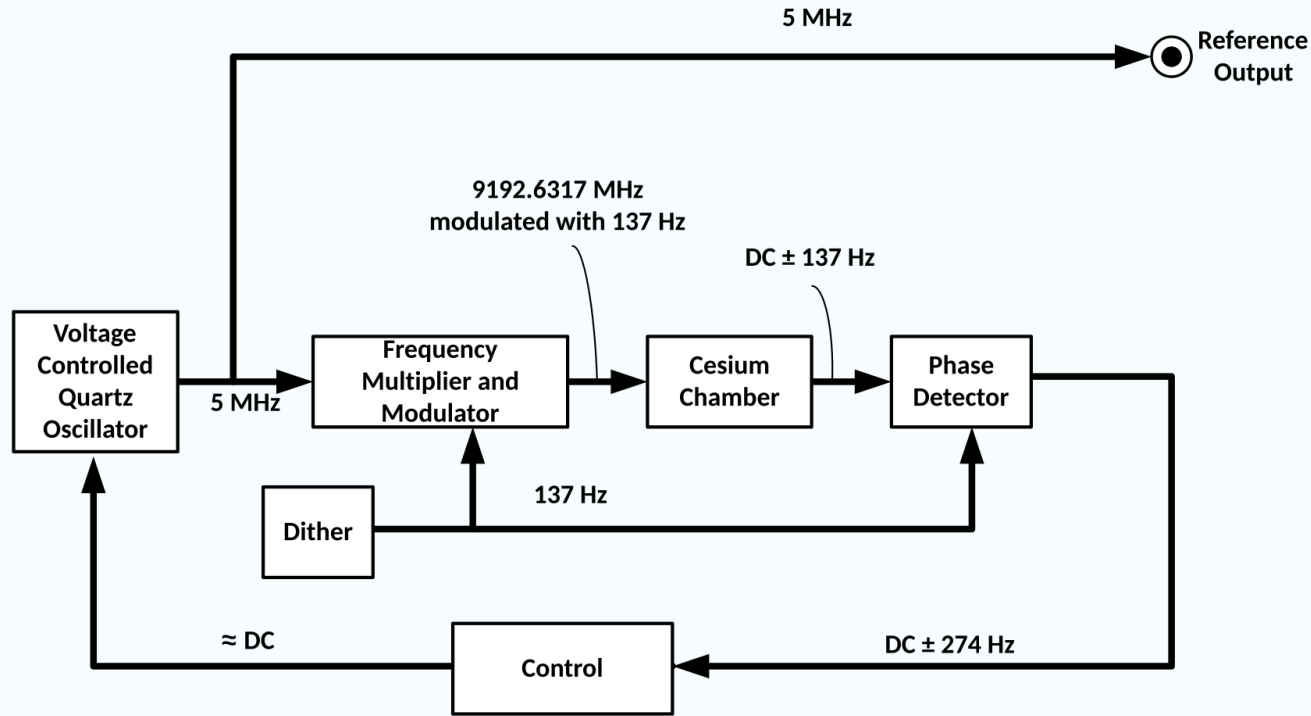


Na chwilę obecną najbardziej precyzyjne urządzenia do pomiaru czasu
Np. zegar atomowy ^{133}Cs (definicja 1s)
lub zegar optyczny ^{87}Sr , itd.
Również niezbędne dla nawigacji GPS,
udokładniania wartości podstawowych stałych fizycznych i podstawowych zasad fizyki , ...

Poszukujemy oscylatorów o stabilnych częstotliwościach i dużych współczynnikach jakości (standardach częstotliwości), aby poprawić naszą zdolność śledzenia czasu z najwyższą precyzją. Jednak przykłady pokazane powyżej w różnym stopniu są podatne na zakłócenia przez zmieniające się warunki zewnętrzne.

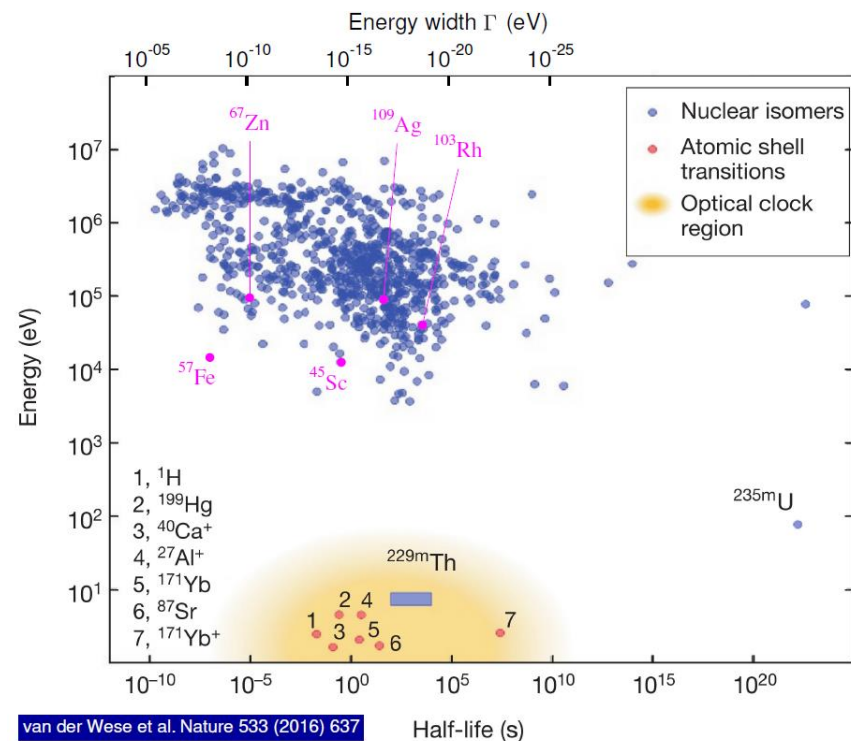
Poszukiwania dokładniejszych, stabilniejszych i wygodniejszych oscylatorów referencyjnych trwają.

Zegary atomowe/optyczne



Zalety rezonansów jądrowych nad atomowymi

- **Wyższe współczynniki Q (stosunek energii rezonansu do jego szerokości: $E/\delta E$)**
- **Wyższe częstotliwości:** większa stabilność ze względów statystycznych (fluktuacje są uśredniane w większej liczbie cykli)
- **Mniejsza podatność na zaburzenia zewnętrzne** (ze względu na mały rozmiar, małe momenty magnetyczne i ekranowanie przez otaczającą chmurę elektronów, jądra są znacznie mniej wrażliwe na pola elektromagnetyczne niż elektrony atomowe)
- **Można użyć większej liczby atomów** (ze względu na mniejszą wrażliwość, atomy w zegarze jądrowym nie muszą być rozdzielane/rozcieńczane w gazie ani uwięzione w pułapkach jonowych przy bardzo niskich temperaturach)



Większość izomerów jądrowych (o stabilnych stanach podstawowych) ma energię wzbudzenia powyżej 30 keV i dlatego rezonanse nie mogą być efektywnie wzbudzone przez współczesne koherentne źródła promieniowania elektromagnetycznego.

Na szczęście, oprócz $^{229\text{m}}\text{Th}$ istnieje jeszcze jeden godny uwagi wyjątek – ^{45}Sc .

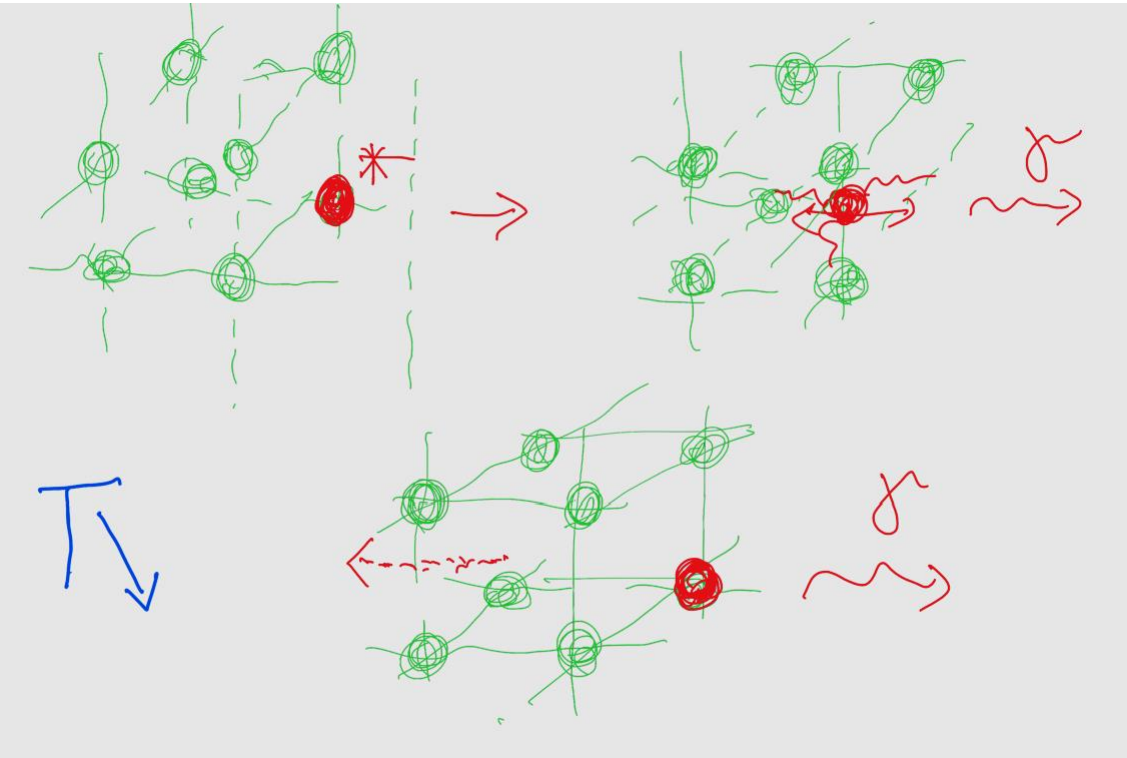
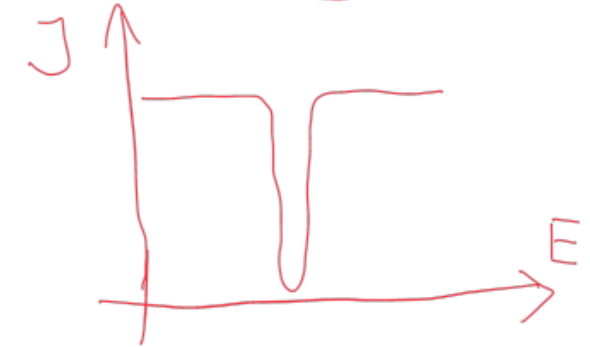
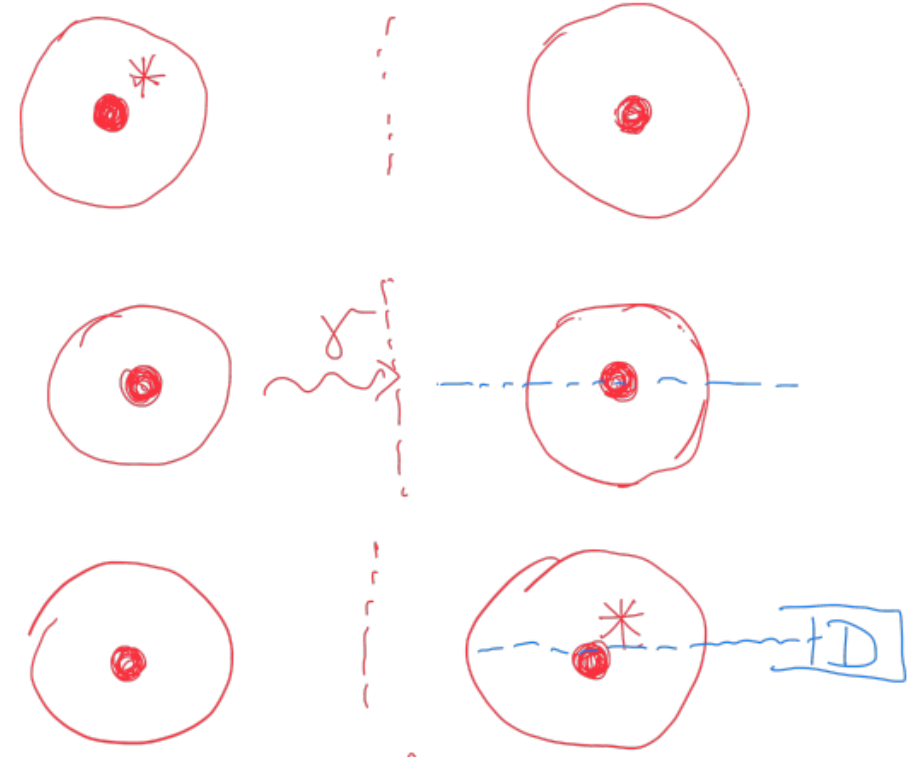
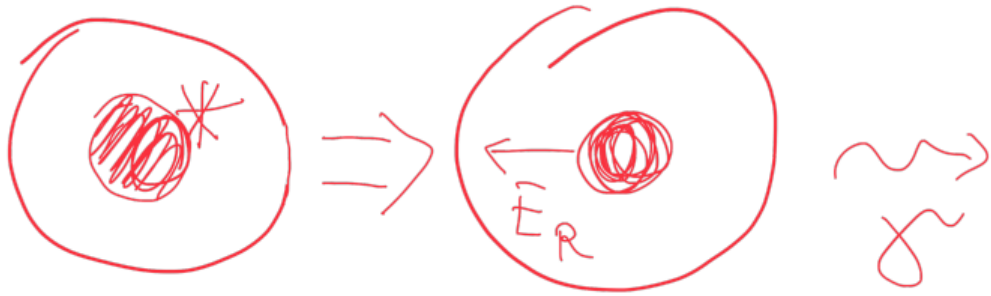
van der Wese et al. Nature 533 (2016) 637

van der Wese et al. Nature 533 (2016) 637

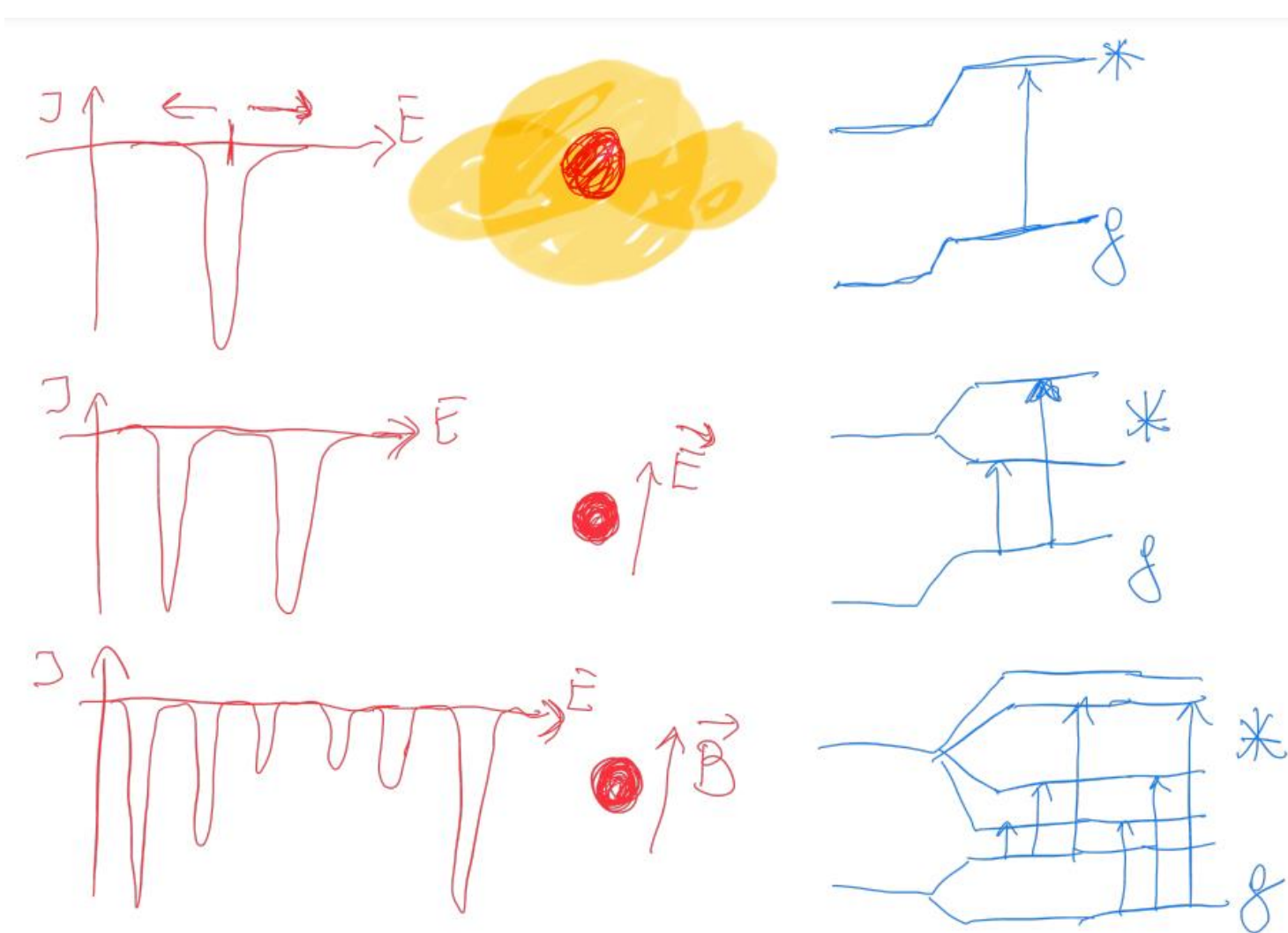
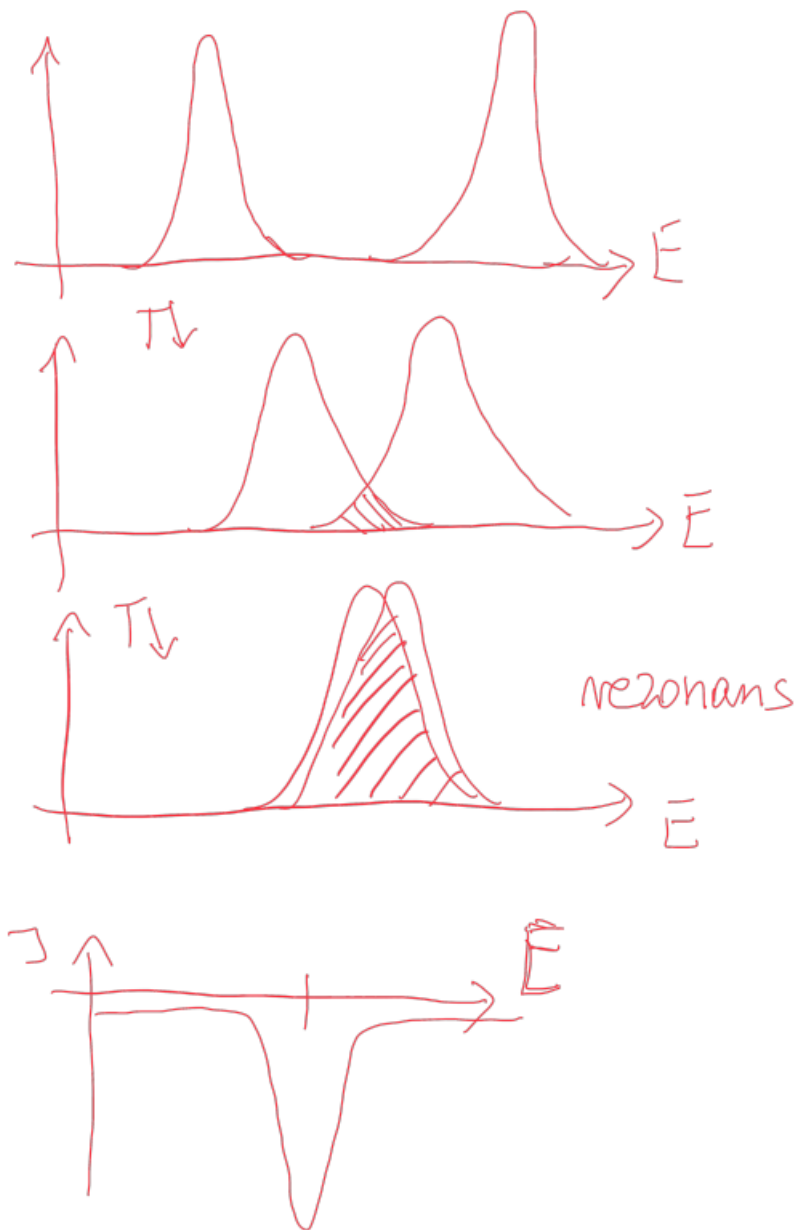
Half-life (s)

- **Jądrowa absorpcja rezonansowa → Efekt Mössbauera z atomami w ciałach stałych** pozwoliłby ilości jąder w ilości ciała stałego na wykazanie wąskiej linii rezonansu w umiarkowanie niskich temperaturach.

Efekt Mössbauera



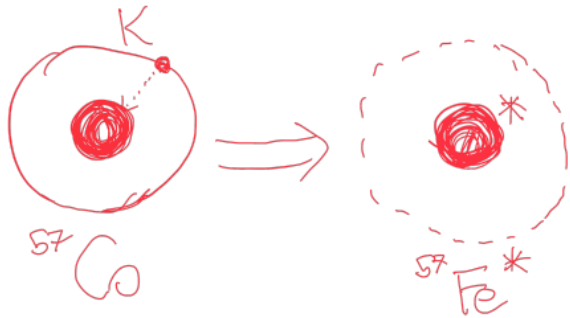
Efekt Mössbauera



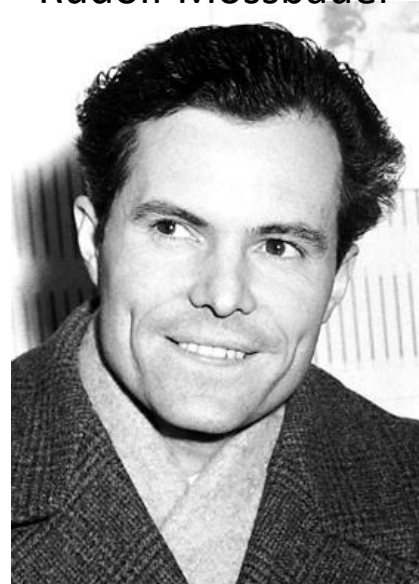
Efekt Mössbauera

$$E = E_0 \left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$$

Doppler
Izmena



Rudolf Mössbauer



*1927 - †2011
Odkrycie 1957 (¹⁹¹Ir)
Nagroda Nobla 1961

Mössbauer Periodic Table

1																	18	
H	2											13	14	15	16	17	He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K ¹	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe ²	Co	Ni ¹	Cu	Zn ¹	Ga	Ge ²	As	Se	Br	Kr ¹	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc ¹	Ru ²	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn ²	Sb ¹	Te ¹	I ²	Xe ²	
Cs ¹	Ba ¹	La ¹	Hf ⁴	Ta ²	W ⁷	Re ¹	Os ⁶	Ir ⁴	Pt ²	Au ¹	Hg ¹	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac																
			Ce	Pr ¹	Nd ²	Pm ¹	Sm ⁶	Eu ⁴	Gd ⁹	Tb ¹	Dy ⁶	Ho ¹	Er ⁵	Tm ¹	Yb ⁶	Lu ¹		
			Th ¹	Pa ¹	U ³	Np ¹	Pu ¹	Am ¹	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw		

Number of observed Mössbauer transitions

Number of isotopes in which the Mössbauer effect has been observed

1 z 5

PHYSICAL REVIEW LETTERS

VOLUME 4

APRIL 1, 1960

NUMBER 7

APPARENT WEIGHT OF PHOTONS*

R. V. Pound and G. A. Rebka, Jr.
Lyman Laboratory of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts
(Received March 9, 1960)

As we proposed a few months ago,¹ we have now measured the effect, originally hypothesized by Einstein,² of gravitational potential on the apparent frequency of electromagnetic radiation by using the sharply defined energy of recoil-free γ rays emitted and absorbed in solids, as discovered by Mössbauer.³ We have observed an

solutely necessary to measure a change in the relative frequency that is produced by the perturbation being studied. Observation of a frequency difference between a given source and absorber cannot be uniquely attributed to this perturbation. More recently, we have discovered and explained a variation of frequency with time

Rezonans Jądrowy ^{45}Sc (12.4 keV) - FAQ

Jaka jest energia wzbudzenia ^{45}Sc ? $E = 12.40 \pm 0.05$ keV [1,2,3,6]

Jaki jest czas życia stanu wzbudzonego? $\tau = 0.47$ s [1,5,6]

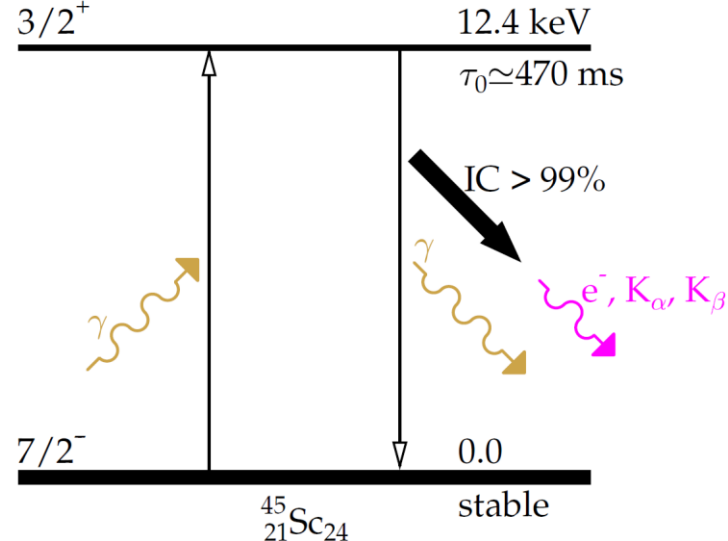
Jaka jest naturalna szerokość przejścia? $\Gamma = \hbar/\tau = 1.4$ feV

Jaka jest jakość rezonansu? $Q = E/\Gamma \approx 10^{19}$

Jaki jest współczynnik konwersji wewnętrznej? $\alpha \approx 630$ [4,5,6]

Jaka jest naturalna abundancja ^{45}Sc ? **100%**

Jaki jest współczynnik Lamba-Mössbauera ^{45}Sc w RT? $f_{\text{LM}} \approx 0.8$



VOLUME 13, NUMBER 7

PHYSICAL REVIEW LETTERS

17 AUGUST 1964

LIFETIMES OF $d_{3/2}$ HOLE STATES IN SCANDIUM ISOTOPES*

R. E. Holland, F. J. Lynch, and K.-E. Nystén[†]
Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois
(Received 16 July 1964)

Ze względu na bardzo wysoki współczynnik jakości, przewyższający większość przejść optycznych metastabilnych jonów i atomów stosowanych w nowoczesnych zegarach i przewyższający wszystkie mierzalne rezonanse Mössbauerowskie o rzędy wielkości (w szczególności o $3 \cdot 10^6$ rezonansu ^{57}Fe), oscylator oparty na ^{45}Sc może być używany do ekstremalnej metrologii, w szczególności do opracowywania zegara jądrowego.

Niestety, ^{45}Sc nie ma żadnego wygodnego macierzystego izotopu radioaktywnego (jak np. ^{57}Co dla ^{57}Fe) ☹. Klasyczna spektroskopia Mössbauera jest niemożliwa → Źródła promieniowania synchrotronowego 3 generacji nie miały wystarczającej jasności spektralnej → ale oparte na akceleratorach, wysoce intensywne, przestrajalne źródła fotonów są obiecującymi urządzeniami napędowymi do wzbudzania rezonansu jądrowego.

[1] Holland R.E., Lynch F.J., Nysten K.E., PRL 13 (1964) 241-243.

[2] Freedman, M. S., Porter, F. T. & Wagner F.Jr, Phys. Rev. 140, B563-B565 (1965).

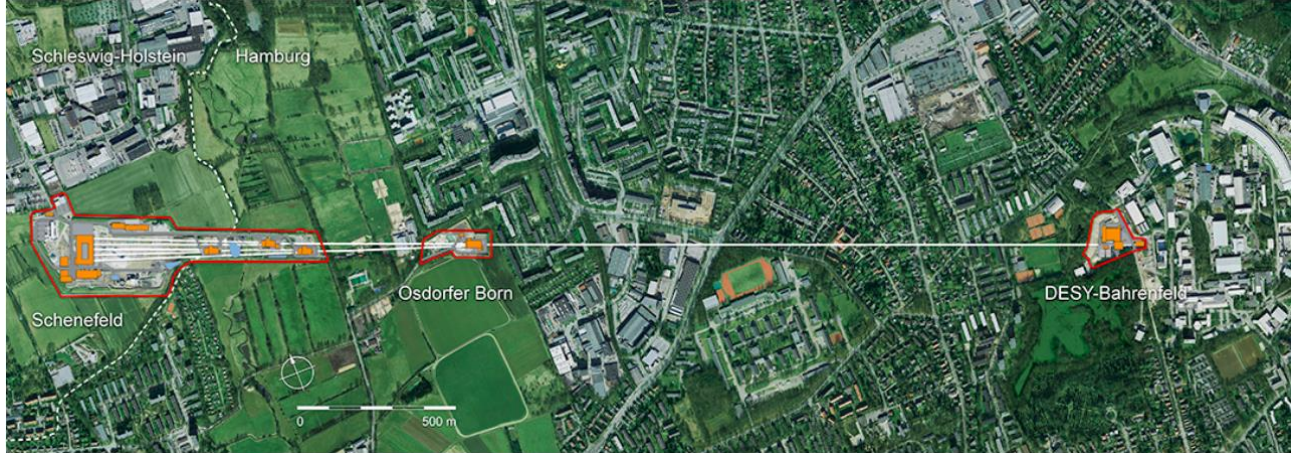
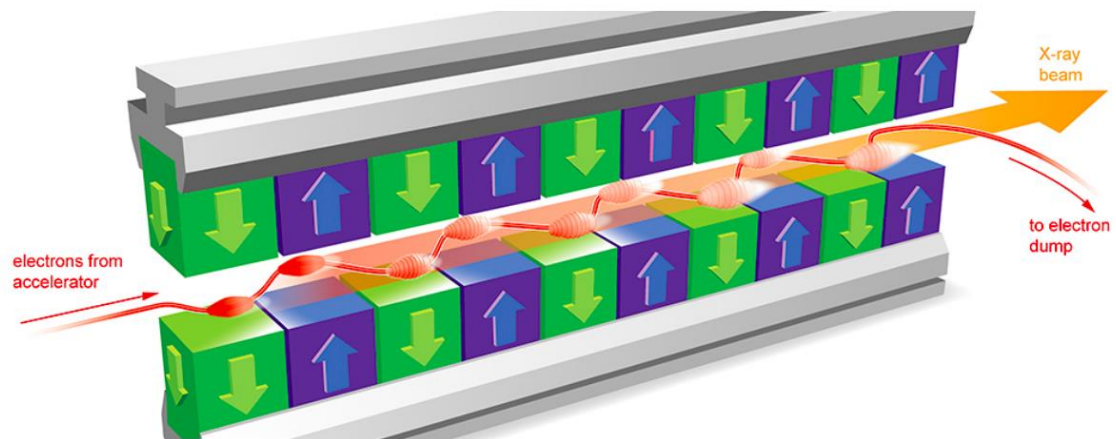
[3] Porter, F. T., Freedman, M. S., Wagner F. & Orlandini, K. A., Phys. Rev. 146, 774-780 (1966).

[4] Jones, K. W. and Schwarzschild, Phys. Rev. 148, 11481150 (1966).

[5] Blaugrund, A. E., Holland, R. E. & Lynch, F.J., Phys. Rev. 159, 926930 (1967).

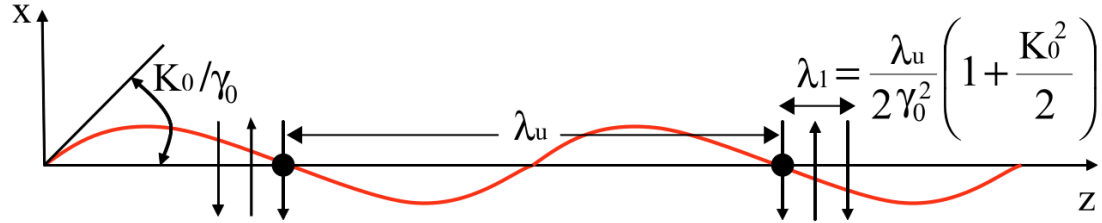
[6] Burrows, T. W., Nuclear Data Sheets 109, 171-296 (2008).

Lasery na swobodnych elektronach (Free Electron Lasers, FEL)

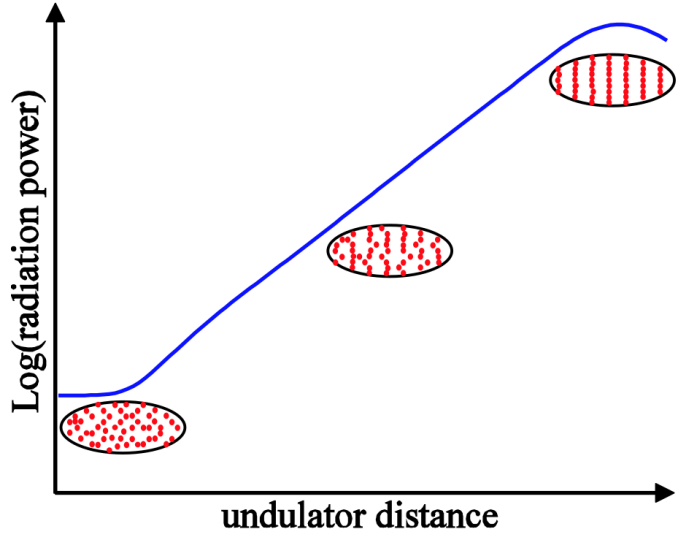


European XFEL GmbH

Self Amplified Spontaneous Emission (SASE)



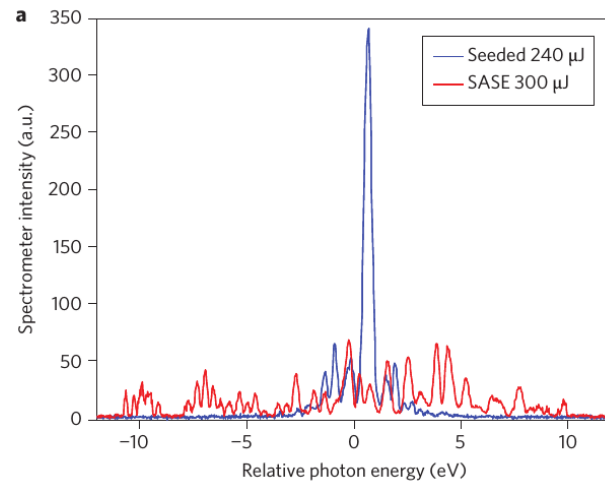
Z. Huang and K.-J. Kim, Phys. Rev. ST Accel. Beams **10**, 034801 (2007)



HIGH GAIN

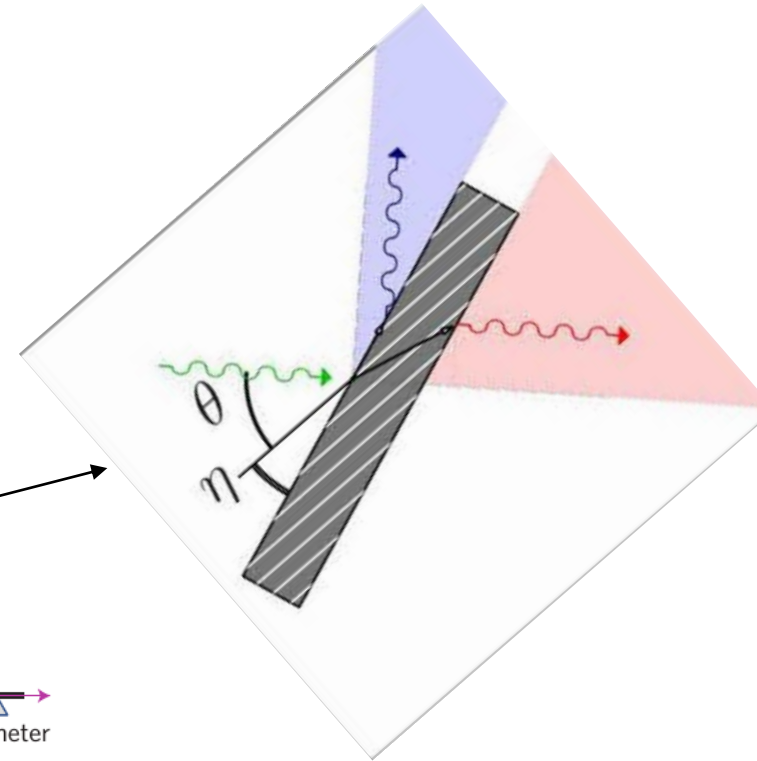
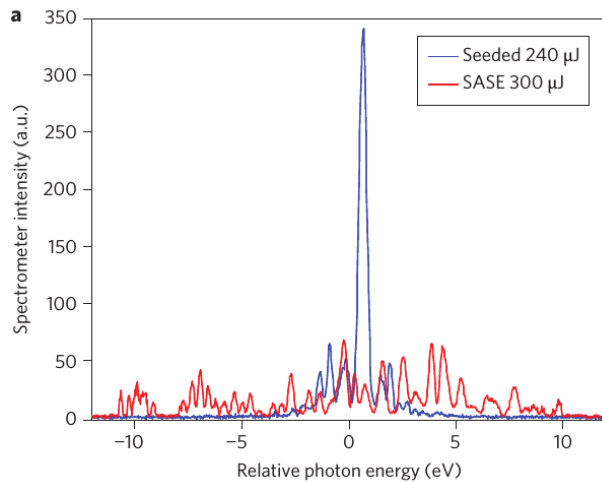
Lasery na swobodnych elektronach (Free Electron Lasers, FEL)

Samowzmacniona emisja spontaniczna (SASE) wiązki FEL ma charakter stochastyczny, co powoduje stałe fluktuacje widma energii fotonów wiązki.

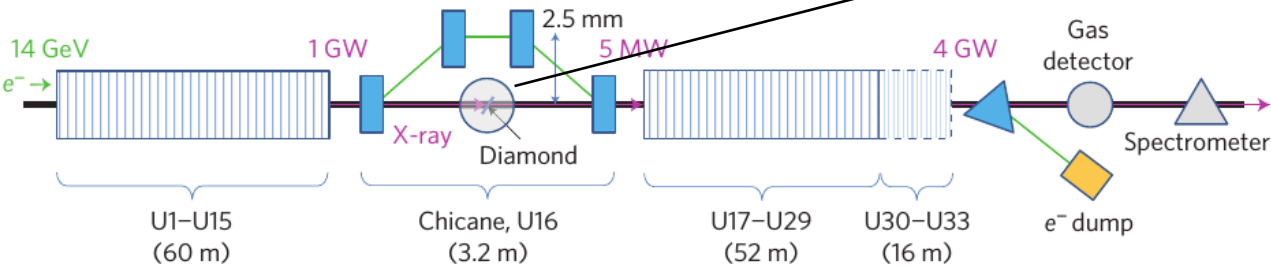


Lasery na swobodnych elektronach (Free Electron Lasers, FEL)

Samowzmacniona emisja spontaniczna (SASE) wiązki FEL ma charakter stochastyczny, co powoduje stałe fluktuacje widma energii fotonów wiązki. **Rozwiązaniem jest „self seeding”** – modulacja wiązki elektronów za pomocą już zmonochromatyzowanego impulsu promieniowania rentgenowskiego.



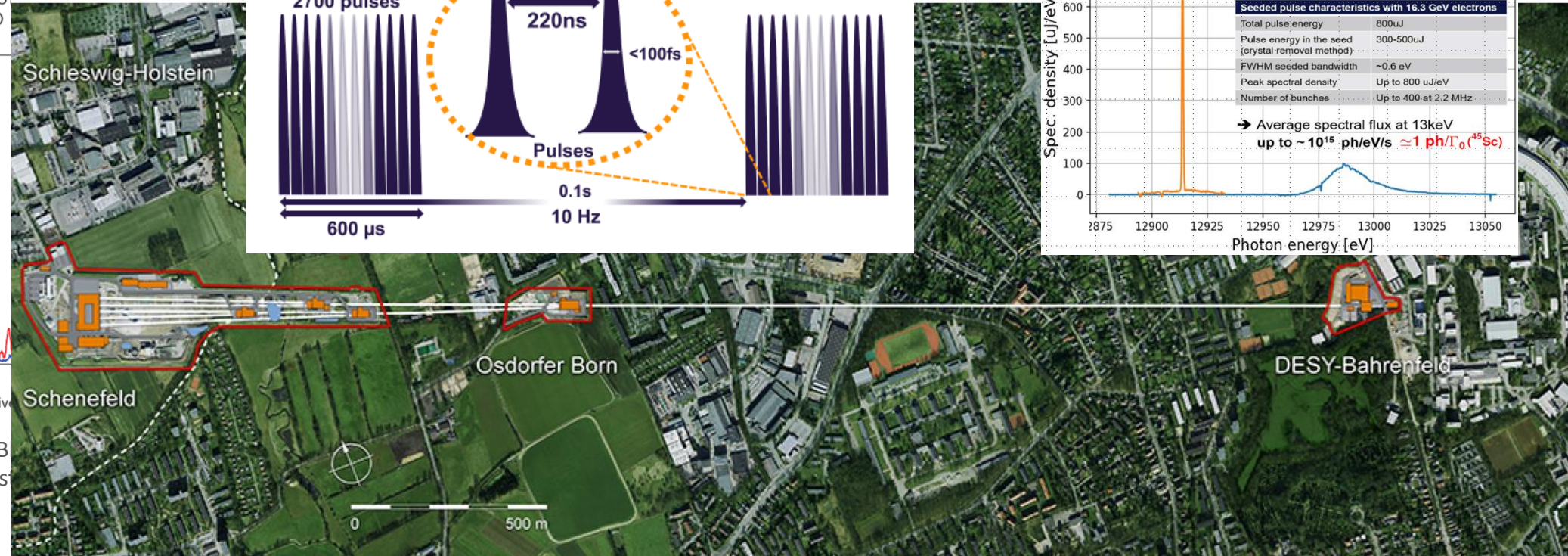
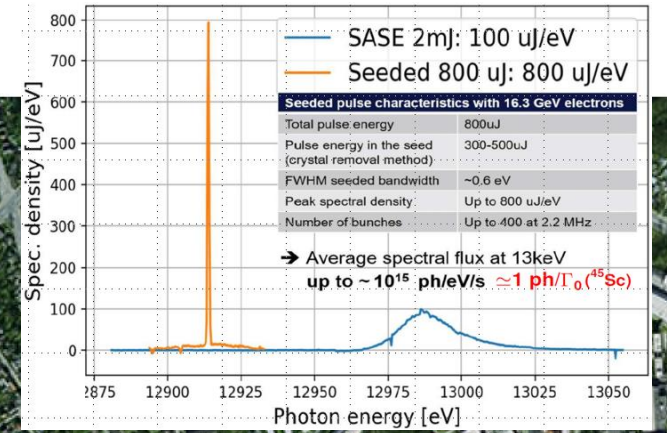
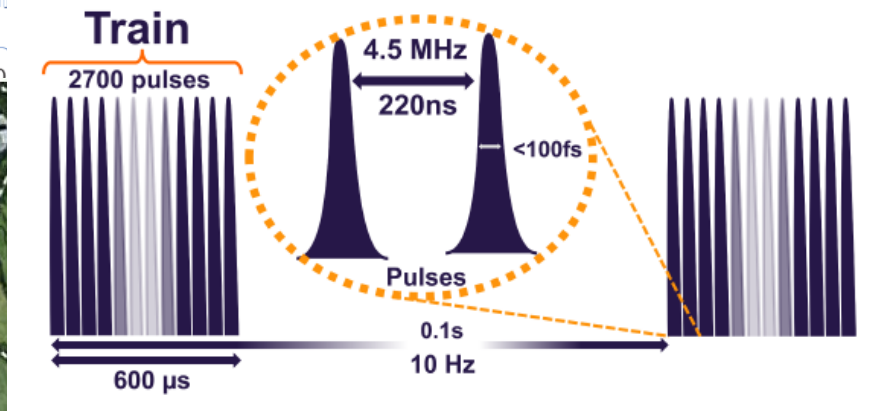
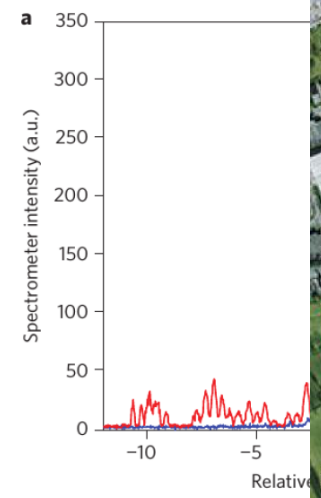
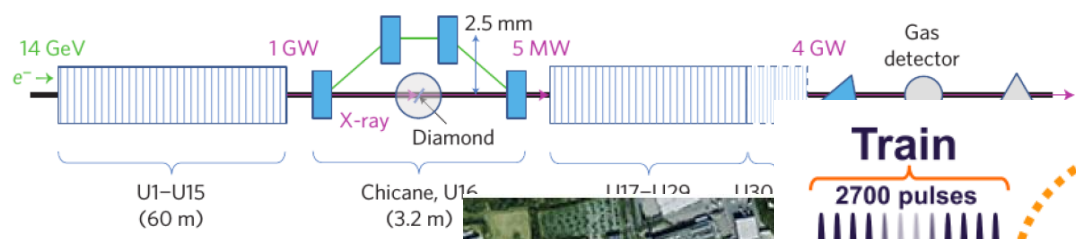
„Self-seeding” przy użyciu dyfrakcji Braggowskiej w przód



J. Amann, W. Berg, V. Blank, F.-J. Decker, Y. Ding, P. Emma, Y. Feng, J. Frisch, D. Fritz, J. Hastings, et al., Nature Photonics **6** (2012)

Self-Seeded Hard X-ray Free Electron Laser

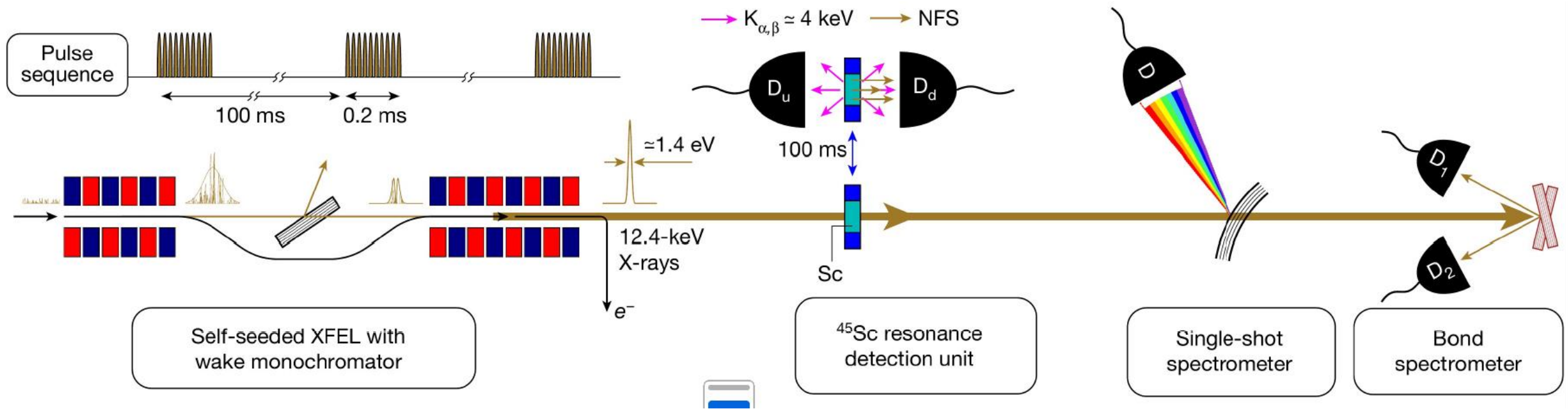
Samowzmocniona emisja spontaniczna (SASE) wiązki FEL ma charakter stochastyczny, co powoduje stałe fluktuacje widma energii fotonów wiązki. Rozwiązaniem jest „self seeding” – modulacja wiązki elektronów za pomocą już zmonochromatyzowanego impulsu promieniowania rentgenowskiego.



J. Amann, W. Berg, V. B...
J. Frisch, D. Fritz, J. Has...

- European XFEL to pierwszy HXRSS HRR XFEL (hard-xray self-seeding high repetition rate)
W. Decking i in. Nat. Photonics, 14 (2020) 391
- Średni natężenie spektralne wiązki przy 13 keV do 10^{15} ph/s/eV ≈ 1 ph/ Γ_0 (^{45}Sc)
G. Geloni (2021) t.b.p.
- Struktura czasowa odpowiednia do poszukiwania rezonansu ^{45}Sc : ciągi impulsów sub-ms z „czasem ciemnym” 100 ms

Eksperyment



EuXFEL zapewnił:

0.2 ms ciągi impulsów co 100 ms
 Ok. $5 \cdot 10^{14}$ ph/s/eV = 0.7 ph/s/ Γ
 (wymagane było 10^{14} ph/s/eV \approx 0.1 ph/s/ Γ , aby wykryć 1 zdarzenie rezonansowe o wartości 1.4 feV w ciągu 100 s)

Zakres energii fotonów został przeskanowany w zakresie ± 50 eV

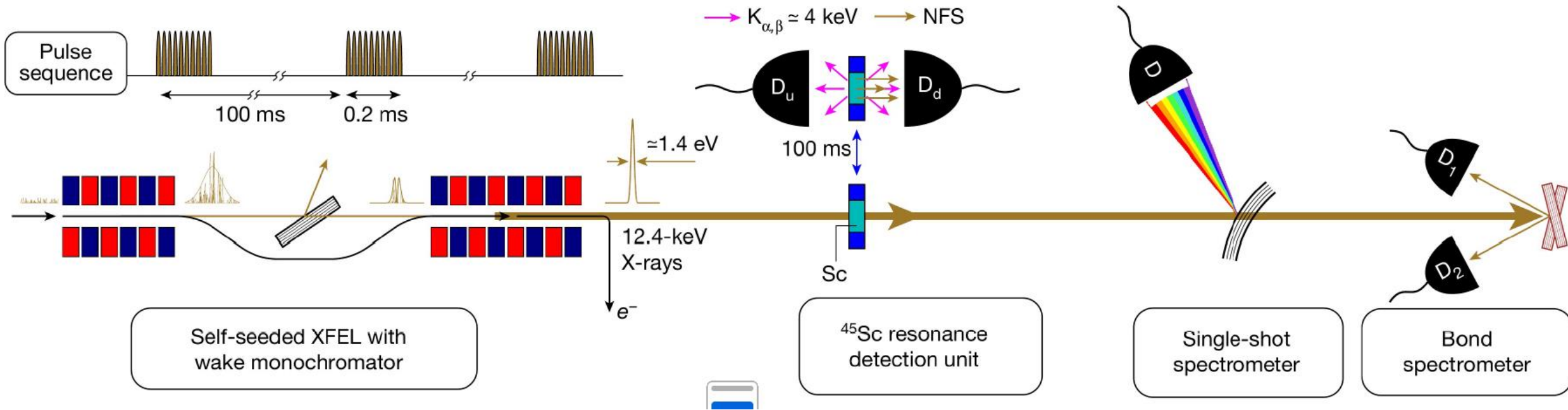
Każdy ciąg impulsów mógł podgrzać folię Sc do 450 K co 100 ms \rightarrow problem musiał zostać rozwiązany \rightarrow próbka była przesuwana po napromieniowaniu poza wiązkę co 100 ms za pomocą mechanicznej przesłony optycznej i była chłodzona powietrzem i wodą

Tło detektora Du – Dd wynosiło < 2 zliczenia/10000 s, ponieważ były one zbramkowane podczas napromieniowania i umieszczone 12 mm od wiązki XFEL

Względne energie padające 12.4 keV musiały zostać zmierzone w każdym skanie – względna stabilność i rozdzielczość pojedynczego strzału wynosiły < 50 meV

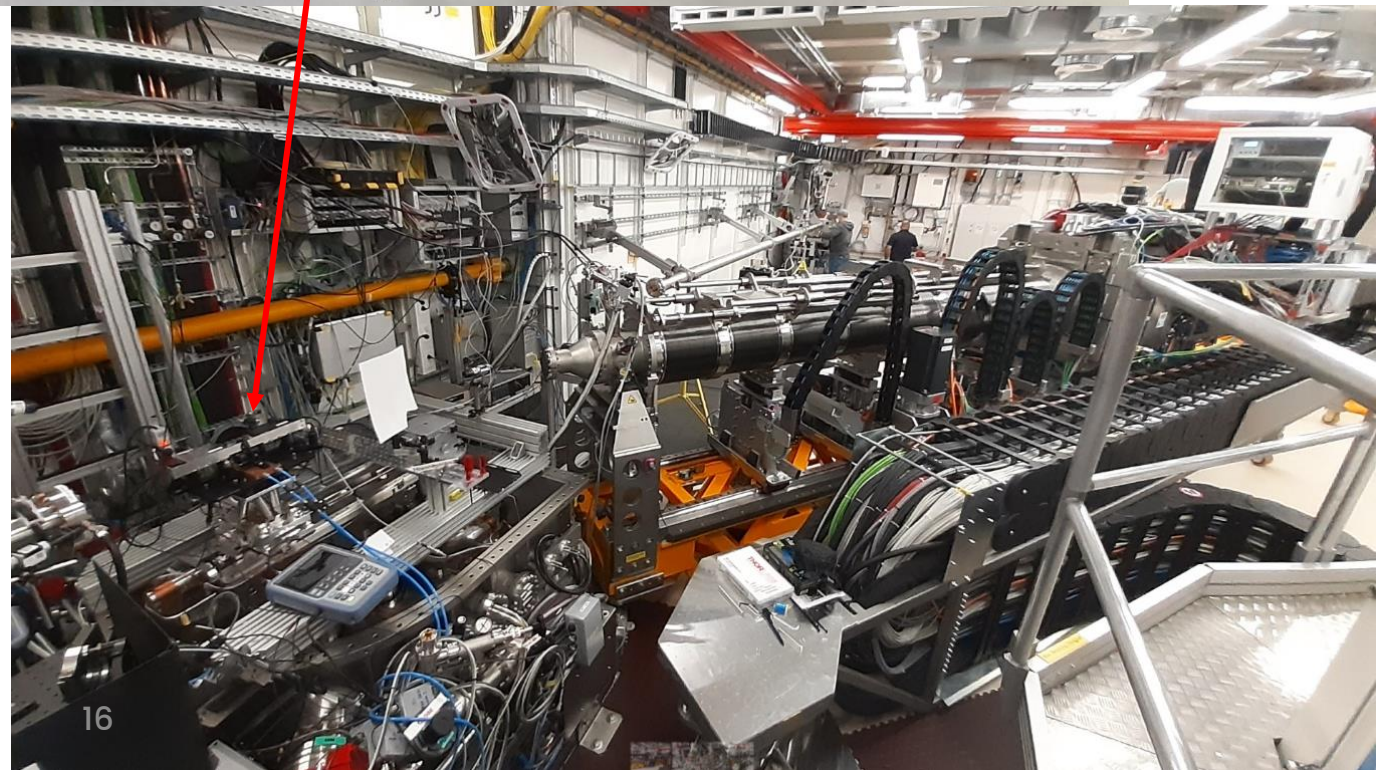
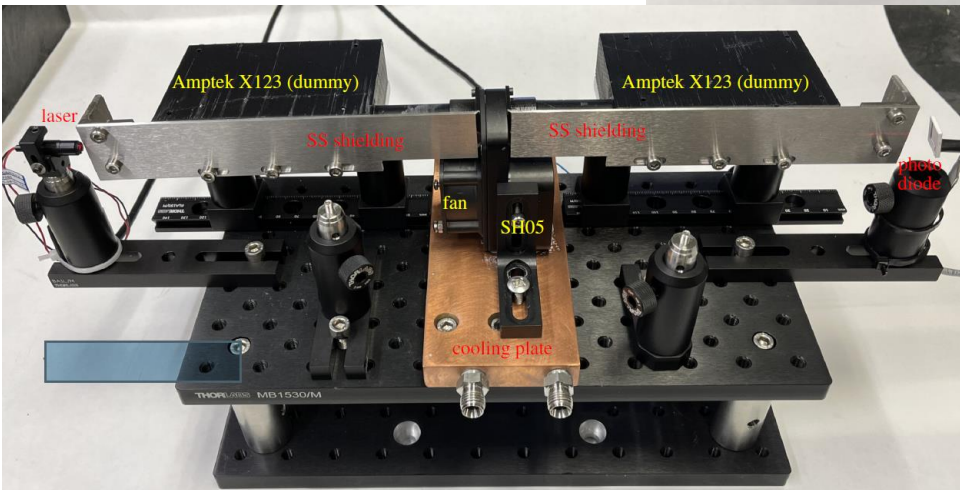
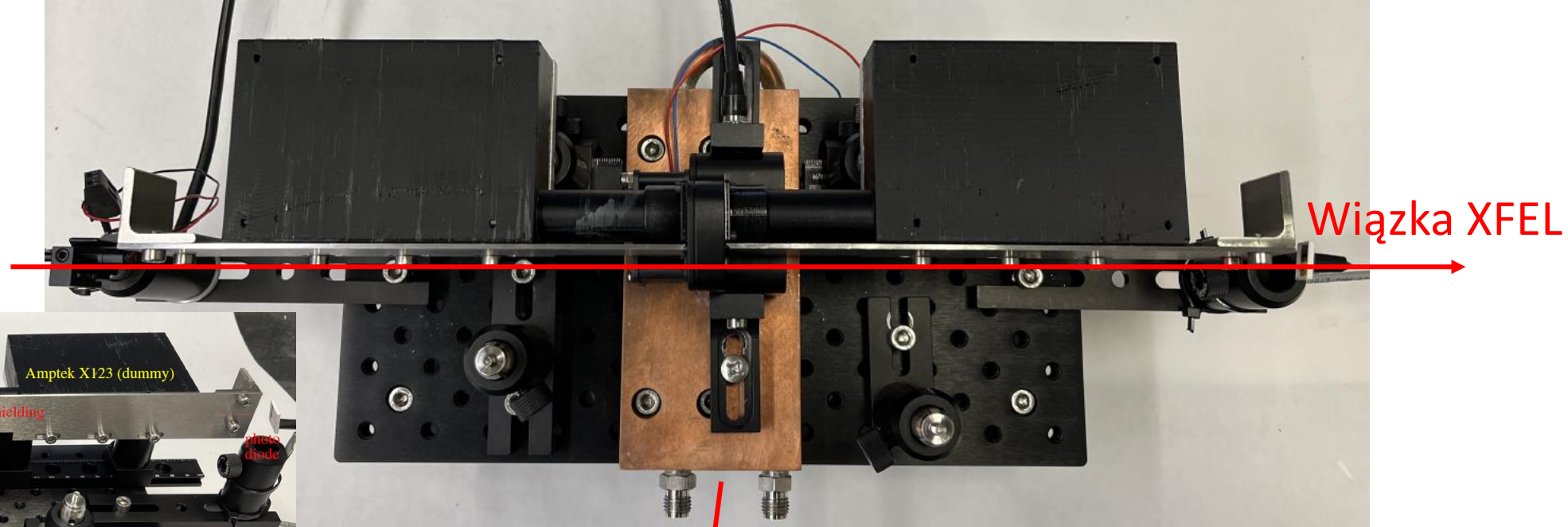
Względna energia fotonów musiała być dokładnie powiązana z energią absolutną \rightarrow Rozdzielczość absolutna spektrometru Bonda < 300 meV

Eksperyment

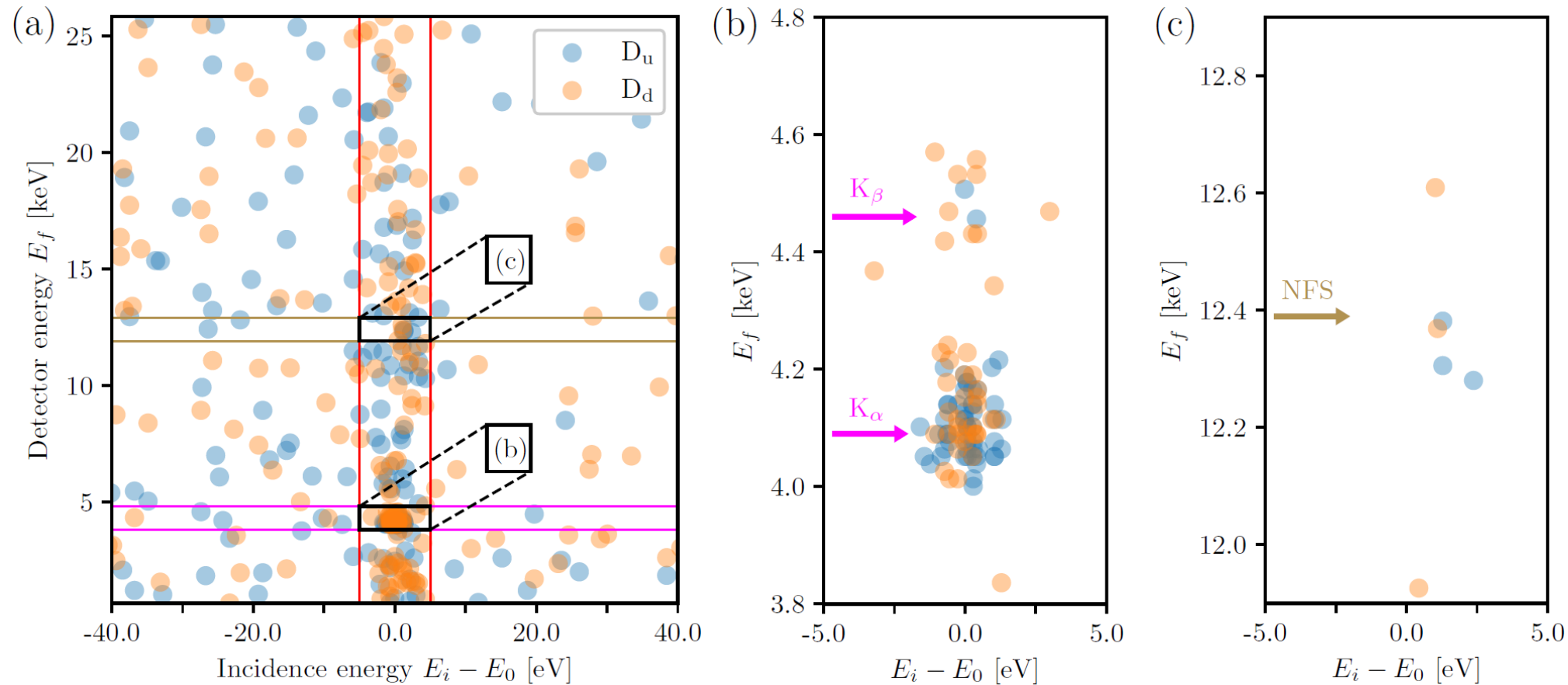


- Próbkę: 25 μm skandowa folia metaliczna.
- Staramy się obserwować rozpad jądrowy w sposób pośredni (pamiętamy o wysokim współczynniku konwersji wewnętrznej!).
- Przy podanym natężeniu spektralnym oczekiwana szybkość zliczania opóźnionej w czasie fluorescencji atomowej $K\alpha$, $K\beta$ (≈ 4 keV) w detektorach SDD wynosi 1-5 fotonów/100 s.
- Rozpraszanie jądrowe do przodu (NFS) nie zostało zoptymalizowane i oczekiwaliśmy, że będzie słabsze niż fluorescencja atomowa.

Eksperyment



Eksperyment – Poszukiwanie rezonansu

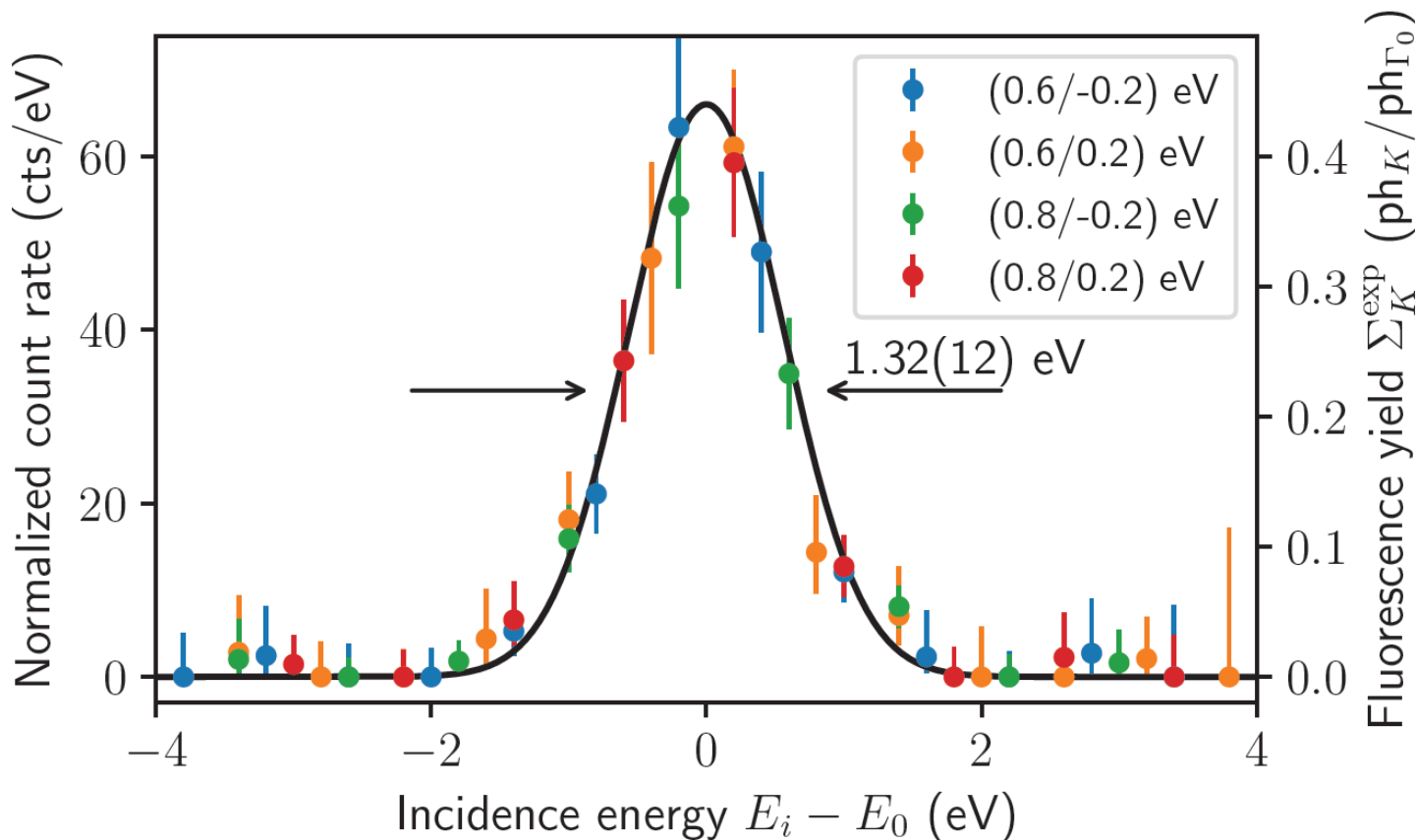


(a) Zliczenia z detektorów przedstawione jako energia E_f wykrytych fotonów rentgenowskich w funkcji energii padających fotonów $E_i - E_0$. Fotony rejestrowano w oknie czasowym około 20-80 ms po każdym wzbudzeniu ciągiem impulsów. Rozdzielczość energetyczna detektora: < 150 eV

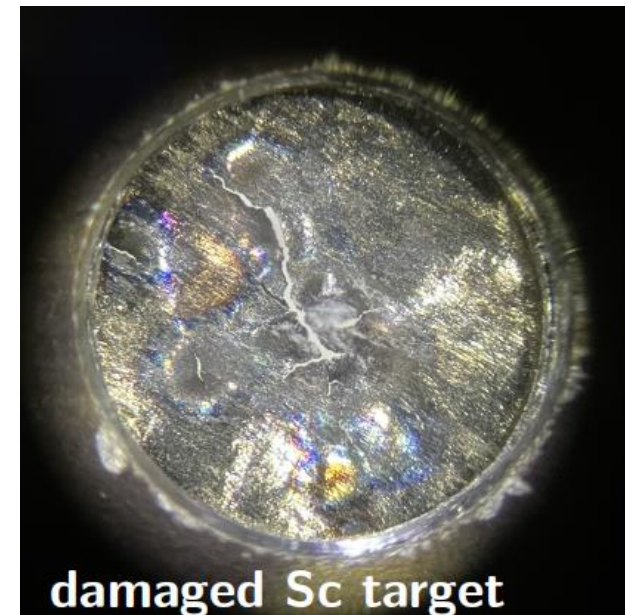
(b) Powiększony obszar zainteresowania wokół 4.3-keV, widoczne dwa skupiska zliczeń skupione przy energiach ^{45}Sc K_α (4.09 keV) i K_β (4.46 keV) fluorescencji. **Jest to bezpośrednie potwierdzenie wykrycia rezonansu ^{45}Sc .**

(c) Zbliżenie na obszar wokół 12.4 keV. Sygnał NFS przy 12.4 keV jest statystycznie nieistotny. NFS jest kolejnym głównym celem.

Eksperyment – wykrycie rezonansu



- Energia fotonów XFEL E_i została zeskanowana w zakresie ± 50 eV wokół 12,4 keV
- $\approx 10^{20}$ fotonów o energii 12.4 keV zostało skierowanych na próbki Sc.
- Dwie próbki Sc zostały uszkodzone przez wiązkę XFEL i wymienione.
- 93 fotony o energii 4 keV zostały wykryte w zakresie opóźnienia ≈ 20 -80 ms wokół E_0 .
- Stosunek sygnału do szumu ≈ 70 .
- Bezwzględna energia rezonansowa ^{45}Sc E_0 została określona z dokładnością sub-eV.

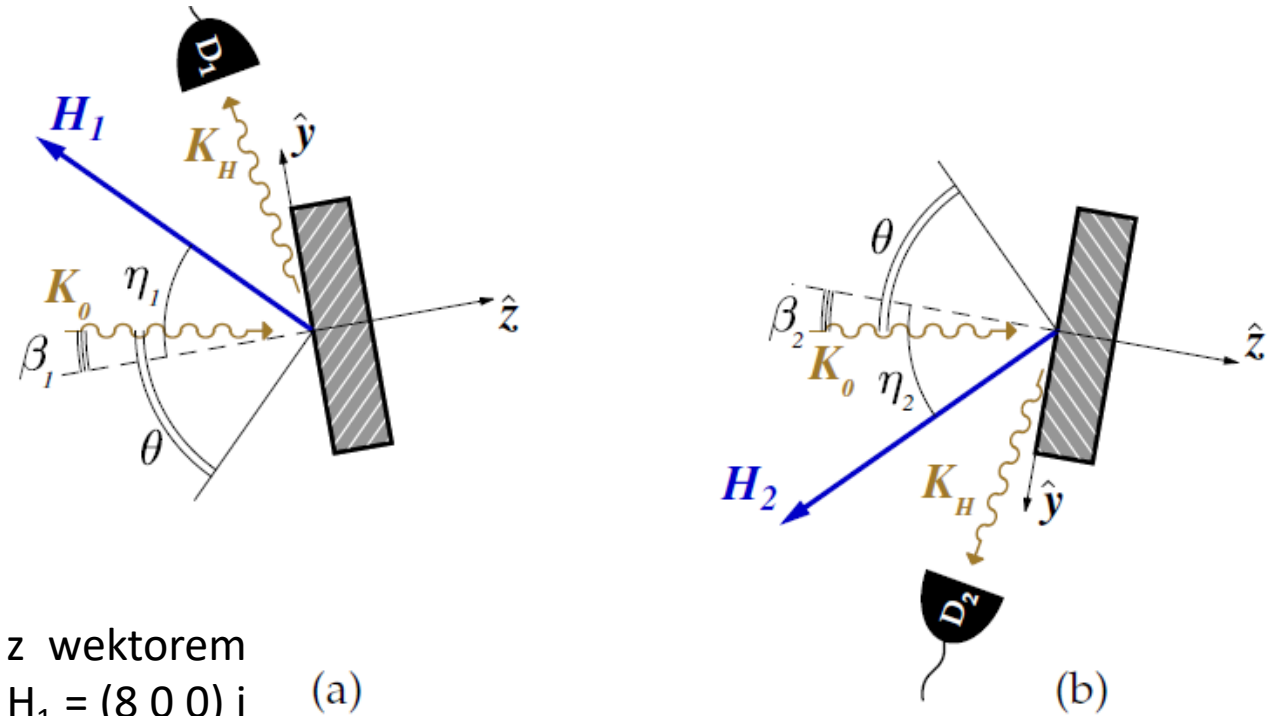


Opóźniona w czasie fluorescencja powłoki K ^{45}Sc zarejestrowana przez detektory rentgenowskie jako funkcja energii padającego fotonu E_i w stosunku do energii rezonansowej E_0 . Kolorowe punkty pokazują przykładowe zbinowane dane. Szerokość spektralna 1.32(12) eV odzwierciedla szerokość widmową wiązki promieniowania XFEL.

Te dane (dla intensywności fluorescencji wymuszonej rezonansem jądrowym) pozwoliły na ponowną ocenę współczynnika konwersji wewnętrznej (≈ 424 w porównaniu z 632 raportowanymi wcześniej) i przekroju czynnego rezonansu jądrowego.

Eksperyment – Precyzyjny pomiar energii rezonansu

Energia przejścia rezonansu jądrowego ^{45}Sc E_0 , znana wcześniej z niepewnością wynoszącą zaledwie $\pm \approx 50$ eV, została określona z dokładnością ponad stukrotnie większą, wynoszącą $E_0 = 12389.590$ eV, przy użyciu metody Bonda.



Metoda Bonda wykorzystuje dyfrakcję Bragga promieni X z wektorem falowym K_0 z płaszczyzn atomowych z wektorami dyfrakcji (a) $H_1 = (8\ 0\ 0)$ i (b) $H_2 = (0\ 8\ 0)$ z kryształu krzemu. Kryształ jest obracany o $\beta = \beta_1 + \beta_2$ między położeniami kątowymi odbić $(8\ 0\ 0)$ i $(0\ 8\ 0)$. Długość fali promieni X $\lambda = 2\pi/K_0$ i energia fotonu E są obliczane ze znanego parametru sieci krystalicznej a_{Si} przy użyciu zmodyfikowanego prawa Bragga:

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{a_{\text{Si}}}{4} \sin(\pi/4 + \beta/2)$$

W.L. Bond, Acta Crystallogr. 13 (1960) 814.

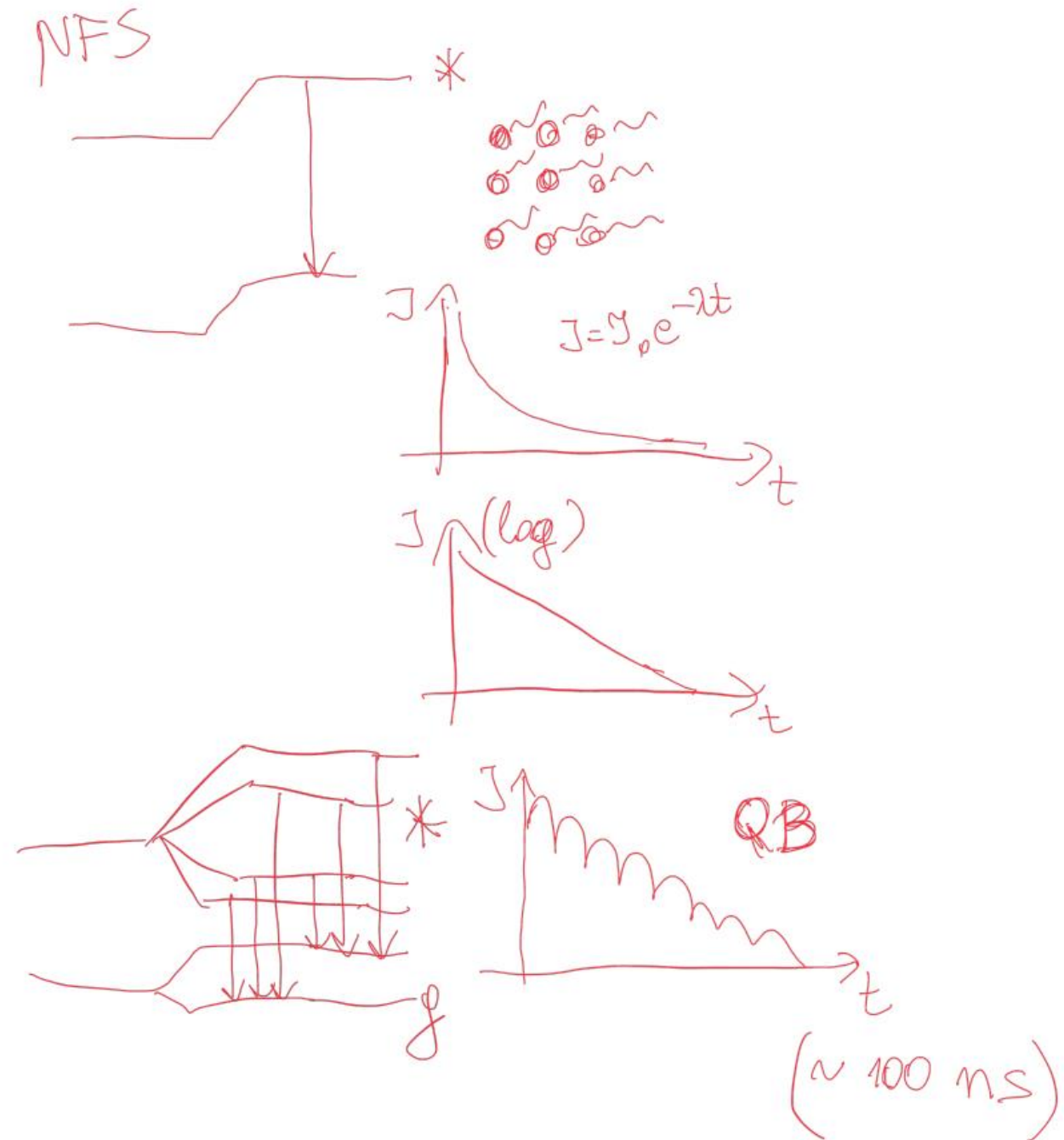
Następne kroki

Blizsza przyszłość

- Nie wiemy, jaka jest rzeczywista szerokość widmowa $\Gamma = \Gamma_0 + \Delta\Gamma$ rezonansu ^{45}Sc .
- Bezpośredni pomiar $\Gamma \approx \text{feV}$ stanowi poważne wyzwanie
- Pomiar komplementarnych zależności czasowych w skali milisekundowej zamiast zależności energetycznych w skali feV jest prostszym podejściem.
- Wymaga jednak pomiaru zależności czasowej koherentnego rozpraszania jądrowego do przodu (NFS), aby uzyskać dostęp do Γ .

(Yu. Shvyd'ko i G.V. Smirnov NIM 51 (1990) 452-457)

- → 1-5 listopada 2024 r. – drugi eksperyment w EuXFEL w celu podjęcia próby pomiaru NFS na ^{45}Sc



Następne kroki

Blizsza przyszłość

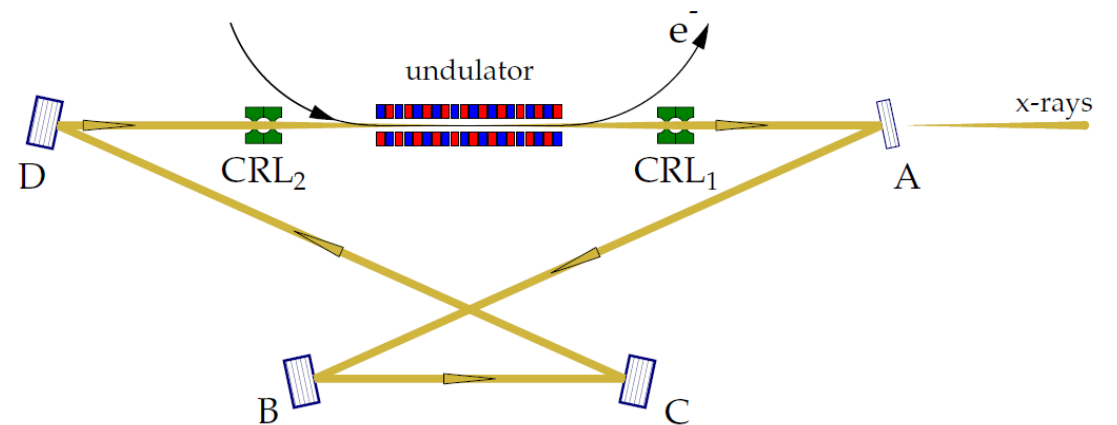
- Nie wiemy, jaka jest rzeczywista szerokość widmowa $\Gamma = \Gamma_0 + \Delta\Gamma$ rezonansu ^{45}Sc .
- Bezpośredni pomiar $\Gamma \approx \text{feV}$ stanowi poważne wyzwanie
- Pomiar komplementarnych zależności czasowych w skali milisekundowej zamiast zależności energetycznych w skali feV jest prostszym podejściem.
- Wymaga jednak pomiaru zależności czasowej koherentnego rozpraszania jądrowego do przodu (NFS), aby uzyskać dostęp do Γ .

(Yu. Shvyd'ko i G.V. Smirnov NIM 51 (1990) 452-457)

- → 1-5 listopada 2024 r. – drugi eksperyment w EuXFEL w celu podjęcia próby pomiaru NFS na ^{45}Sc

Dalsza przyszłość

Realizacja mössbauerowskich zegarów jądrowych w oparciu o ^{45}Sc wymaga dalszego zwiększenia rezonansowego strumienia spektralnego przy użyciu ulepszonych wąskopasmowych źródeł promieni rentgenowskich o energii 12.4 keV i (2) grzebieni częstotliwości rozciągających się do tej energii. Istnieją dwie możliwe drogi do tego celu: wnętrza XFEL (1) i twarde grzebienie rentgenowskie generowane przez XFEL stabilizowane rezonansem jądrowym [2].



[1] K.J. Kim, Yu. Shvyd'ko, S. Reiche PRL 100, 244802 (2008)

[2] B Adams and K.J. Kim PRAB 18, 030711 (2015)

Wnioski

- Długożyciowe przejście jądrowe ^{45}Sc zostało rezonansowo wzbudzone ze stanu podstawowego do długożyciowego stanu wzbudzonego 12.4-keV przez promienie rentgenowskie o energii 12.4-keV po raz pierwszy.
- Wysokie średnie natężenie spektralne promieni rentgenowskich i bardzo niskie tło detektora były krytyczne dla pomyślnej detekcji.
- Energia rezonansowa, która była znana przed eksperymentem z niepewnością 50 eV, została określona z dokładnością sub-eV do wartości $12\,389,590 \pm 15 \text{ (stat)} + 0.12 \text{ (syst) eV}$
- Wąskopasmowy XFEL z wysoką częstotliwością powtarzania jest idealną platformą do badania długożyciowych rezonansów jądrowych przy energiach twardych promieni rentgenowskich.
- Udane rezonansowe wzbudzenie rezonansu ^{45}Sc otwiera nowe horyzonty dla ultraprecyzyjnej spektroskopii, ekstremalnej metrologii w zakresie twardych promieni rentgenowskich i dla stałego wzorca częstotliwości jądrowej ^{45}Sc (Mössbauerowski zegar jądrowy)
- Dla porównania: zegar optyczny atomowy ^{87}Sr – dokładność 1 s w ciągu $3 \cdot 10^9$ lat \rightarrow zegar jądrowy ^{45}Sc – 1 s w ciągu $300 \cdot 10^9$ lat
- To jest pierwszy krok. Następne kroki (NFS itp.) będą równie ekscytujące, ale nie łatwiejsze.

Article

Resonant X-ray excitation of the nuclear clock isomer ^{45}Sc

<https://doi.org/10.1038/s41586-023-06491-w>

Received: 15 May 2023

Accepted: 27 July 2023

Published online: 27 September 2023

Open access

 Check for updates

Yuri Shvyd'ko^{1,2}, Ralf Röhlsberger^{2,3,4,5}, Olga Kocharovskaya⁶, Jörg Evers⁷, Gianluca Aldo Geloni⁸, Peifan Liu¹, Deming Shu¹, Antonino Miceli¹, Brandon Stone¹, Willi Hippler^{2,3}, Berit Marx-Glowna^{2,3}, Ingo Uschmann⁴, Robert Loetzsch⁴, Olaf Leupold⁵, Hans-Christian Wille⁵, Ilya Sergeev⁵, Miriam Gerharz⁷, Xiwen Zhang⁸, Christian Grech⁵, Marc Guetg⁵, Vitali Kocharyan⁵, Naresh Kujala⁶, Shan Liu⁵, Weilun Qin⁵, Alexey Zozulya⁶, Jörg Hallmann⁶, Ulrike Boesenberg⁶, Wonhyuk Jo⁶, Johannes Möller⁶, Angel Rodriguez-Fernandez⁷, Mohamed Youssef⁸, Anders Madsen⁸ & Tomasz Kołodziej⁹

$$\frac{\Gamma_o(^{57}\text{Fe})}{\Gamma_o(^{45}\text{Sc})} = \frac{4.8 \text{ neV}}{1.4 \text{ feV}} \simeq 3 \times 10^6$$

Kolaboracja ⁴⁵Sc

Argonne National Laboratory

Yuri Shvyd'ko

Peifan Liu

Antonino Miceli

Deming Shu

Brandon Stone



Texas A&M University

Olga Kocharovskaya

Xiwen Zhang



European XFEL, Hamburg

Alexey Zozulya

Jörg Halmann

Ulrike Boesenberg

Wonhyuk Jo

Johannes Möller

Angel Rodriguez-Fernandez

Mohamed Youssef

Naresh Kujala

Gianluca Aldo Geloni

Anders Madsen



Helmholtz Institute Jena & University of Jena

Ralf Röhlsberger

Willi Hippler

Berit Marx-Glowna

Ingo Uschmann

Robert Loetzsch

HELMHOLTZ
Helmholtz-Institut Jena

FRIEDRICH-SCHILLER-
UNIVERSITÄT
JENA

MPIK, Heidelberg

Jörg Evers

Miriam Gerharz



DESY, Hamburg

Olaf Leupold

Hans-Christian Wille

Ilya Sergeev

Christian Grech

Marc Guetg

Vitali Kocharyan

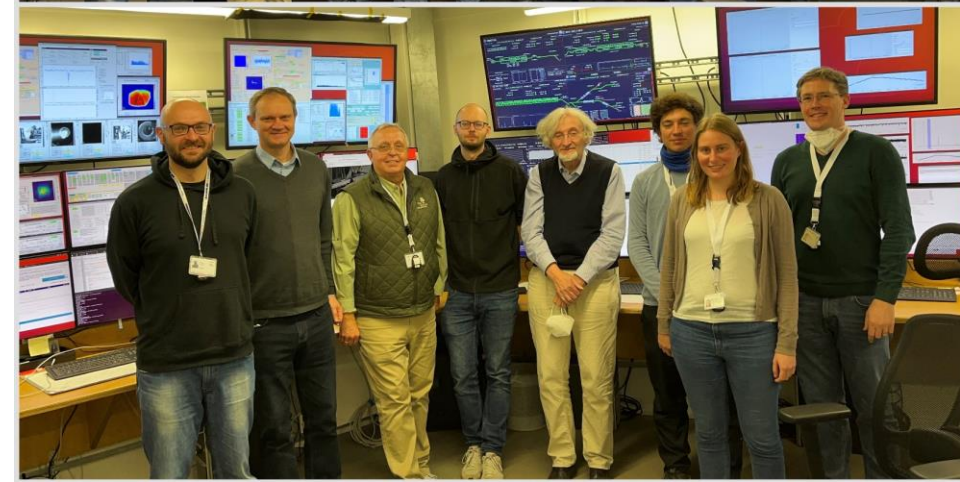
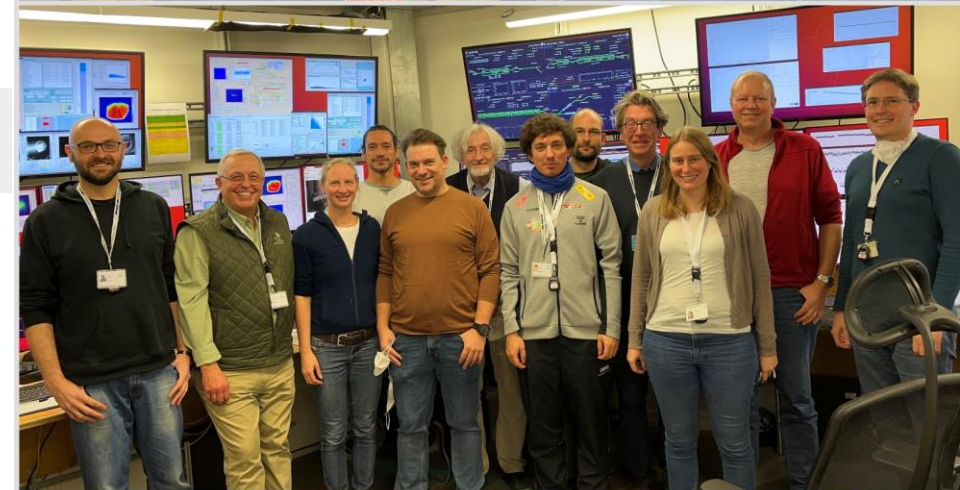
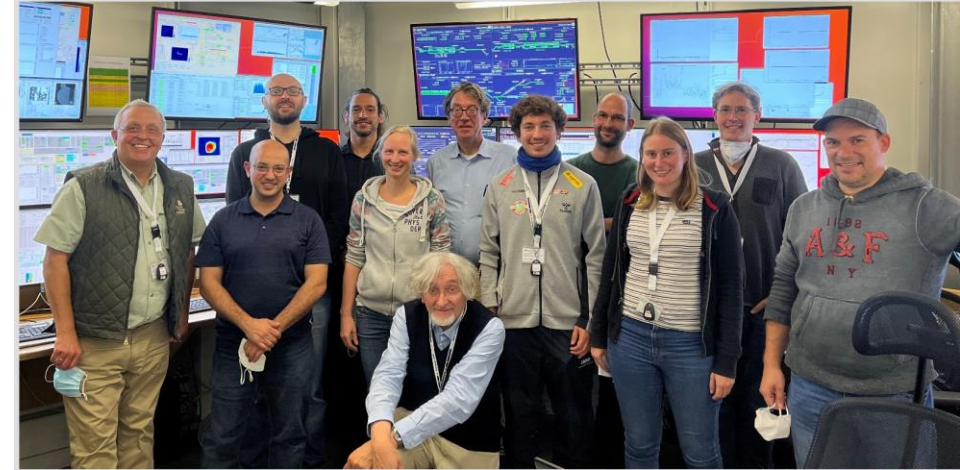
Shan Liu

Weilun Qin



Solaris, Kraków

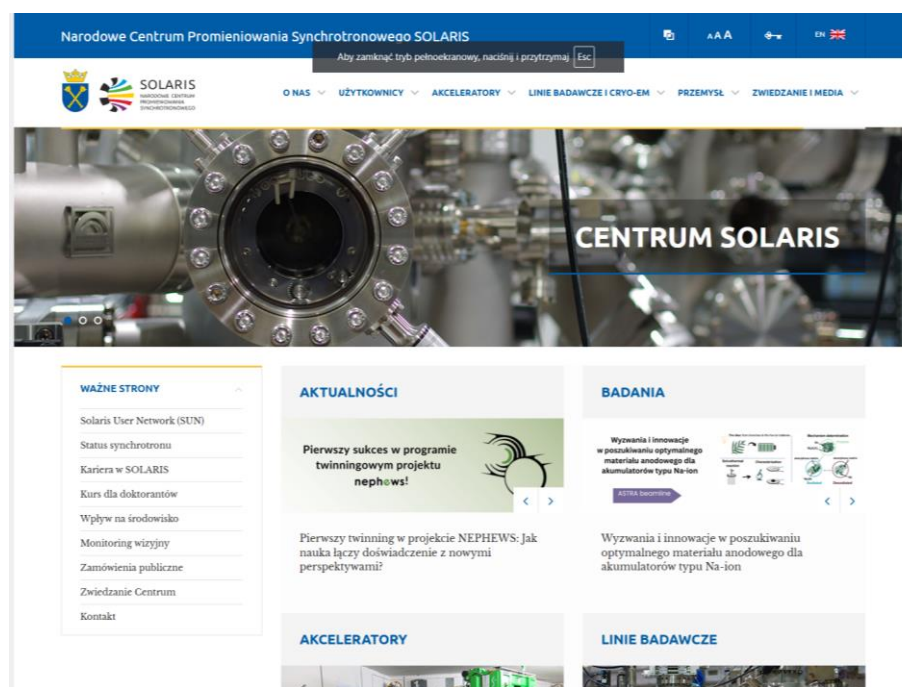
Tomasz S. Kołodziej



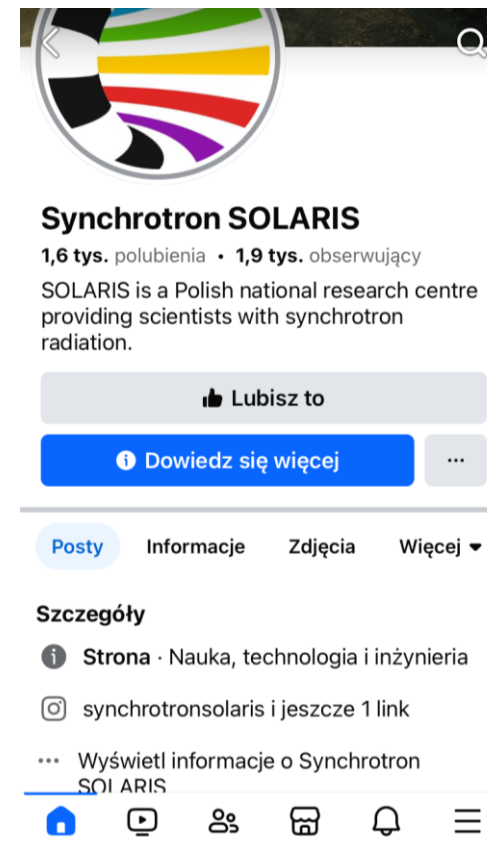


**SHELDON, I WAS UP ALL NIGHT
USING THE NEW FREE-ELECTRON
LASER...**

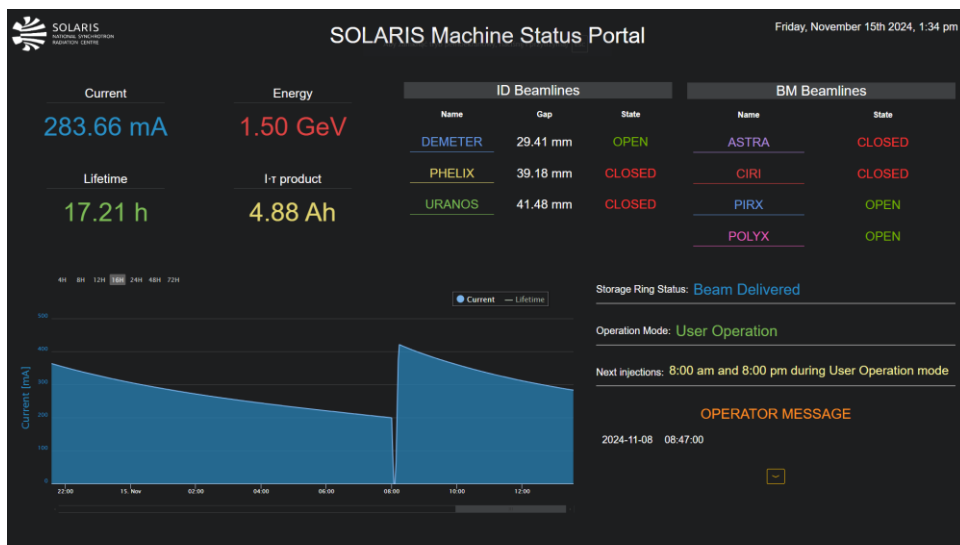
Dziękuję za uwagę!!



<https://synchrotron.uj.edu.pl/>



+ sociale



<https://status.synchrotron.pl/>