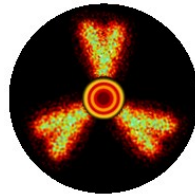
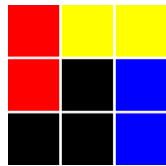


O coraz lepszych zegarach

od Galileusza do $^{229\text{m}}\text{Th}$



Marek Pfützner



ZAKŁAD FIZYKI JĄDROWEJ
UNIwersytet Warszawski

XVIII LO im. Jana Zamoyskiego w Warszawie

13 marca 2024



Trochę reklamy

„Z kamerą wśród
egzotycznych nuklidów”

<https://www.deltami.edu.pl/2021/6/>

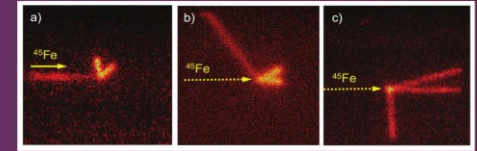
<https://www.deltami.edu.pl/2021/9/>

Delta 6, 2021

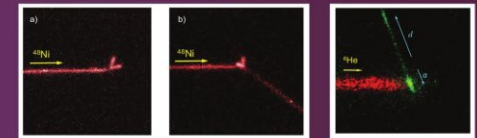


Delta 9, 2021

W artykule „Z kamerą wśród egzotycznych nuklidów” (Delta 6/2021) Marek Płutnierz pisał o nowatorskim detektorze OITPC (Optical Time Projection Chamber). Fotografie z detektora OITPC, do których odwołuje się artykuł, a które przez pomyłkę redakcji nie ukazały się na tylnej okładce Delta 6/2021, zamieszczamy poniżej. Autora i Czytelników przepraszamy.



Rys. 4
Fotografie CCD rozpadów ^{45}Fe . Tylko na pierwszym zdjęciu (a) widać tor jonu ^{45}Fe wpadającego do detektora z lewej strony. Ekspozycyjne zdjęcie (b) i (c) rozpoczęto już po zatrzymaniu jonu ^{45}Fe .
a) Widoczna emisja dwóch protonów z ^{45}Fe
b) po emisji dwóch protonów z ^{45}Fe powstał ^{43}Cr , który później uległ przemianom β^+ z emisją jednego protonu opóźnionego (widoczny długi tor w lewo do góry). Kolejność zdarzeń znamy dzięki zapisowi sygnałów z fotopowielacza.
c) widoczna emisja trzech protonów opóźnionych po przemianie β^+ ^{45}Fe



Rys. 5
Fotografie CCD rozpadów ^{48}Ni . Na obu zdjęciach widać tor jonu ^{48}Ni wpadającego do detektora z lewej strony.
a) Widoczna emisja dwóch protonów z ^{48}Ni
b) po emisji dwóch protonów z ^{48}Ni powstał ^{46}Fe , który następnie uległ przemianie β^+ z emisją jednego protonu opóźnionego (widoczny długi tor w prawo, do dołu)

Rys. 6
Złączenie dwóch fotografii CCD. Kolor czerwony obrazuje paczkę około tysiąca jonów ^4He , które wpadły do detektora z lewej strony. W kolorze zielonym widać rezultat przemiany β^- jednego z tych jonów do ^3Li , który rozpadł się na deuteron i cząstkę α

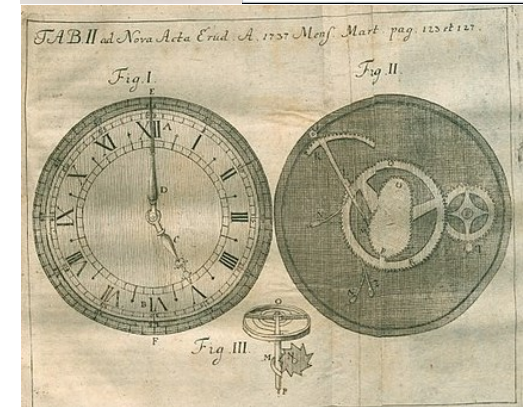
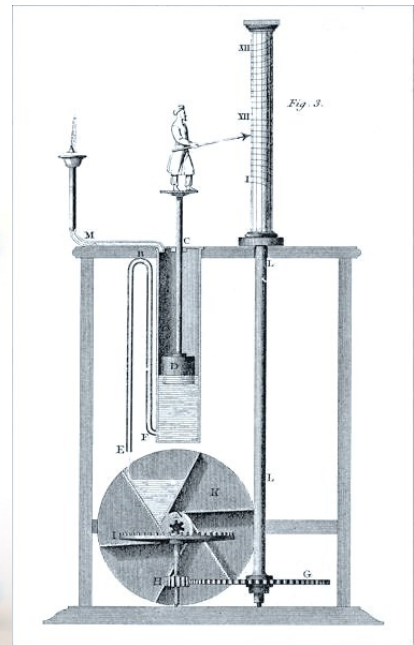


<https://zapytajfizyka.fuw.edu.pl/>



Zegary

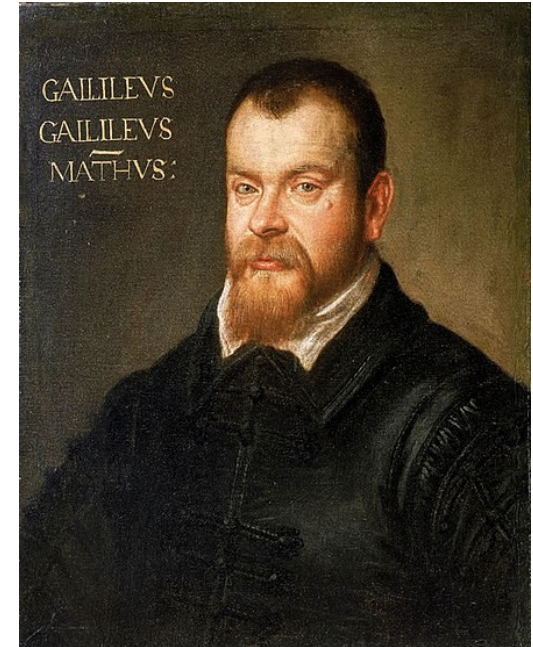
- Problem pomiaru odcinków czasu krótszych niż dzień jest stary jak świat. Wszystkie rozwiązania od starożytności aż do XVII w. opierały się na zjawiskach ciągłych, na przepływie czegoś
 - zegary słoneczne, klepsydry, zegary wodne, świece...
- Zegar nowoczesny musi **tykać**!
 - najlepiej regularnie, oparty na jakimś zjawisku periodycznym – **oscylator**
 - jak najbardziej niezależnie od otoczenia
- Przykład mamy w rękach – tętno (?)





Galileusz

- W 1581 roku, Galileusz, wtedy student medycyny, odkrył **izochronizm** wahadła mierząc okres wahań kościelnych żyrandoli przy pomocy własnego pulsu
 - Okres wahań nie zależy od amplitudy.
Ale uwaga, tylko dla małych wychyleń!
- Galileusz eksperymentował z wahadłami i zaprojektował zegar, który opierał się na izochronicznym ruchu wahadła. Zegar wg tego pomysłu jednak nie powstał
- Inne wielkie odkrycie: księżyc Jowisza.
Galileusz zmierzył okresy obiegu tych księżyców i zauważył, że ich układ może służyć jako uniwersalny zegar



Galileo Galilei, 1564 - 1642
(Domenico Tintoretto, 1605-7)



Oscylator harmoniczny

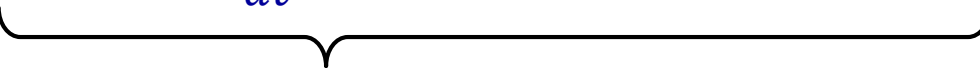
Mechanika klasyczna

prawo Newtona

$$ma \equiv m \frac{d^2x}{dt^2} = F(x)$$

oscylator harmoniczny

$$F(x) = -k x$$



$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m} x = -\omega^2 x$$

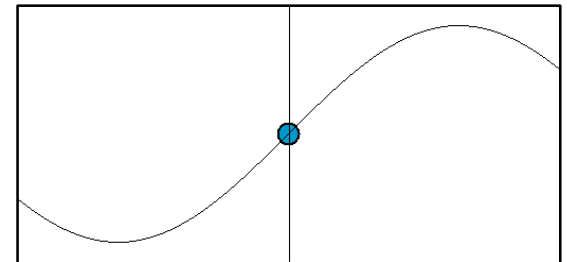
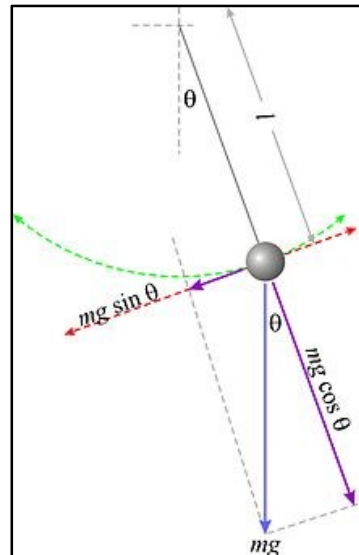


$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi), \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Ale dla wahadła mamy:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{g}{l} \sin \theta \approx -\frac{g}{l} \theta$$

tylko dla małych
kątów $\sin \theta \approx \theta$





Christiaan Huygens

➤ W 1657 roku Huygens zbudował pierwszy zegar wahadłowy i go opatentował

- także jako pierwszy obliczył okres wahadła dla małych wychyleń:

wahadło matematyczne: $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$

wahadło fizyczne: $T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}}$

I – moment bezwładności
dla punktu o masie m : $I = m l^2$

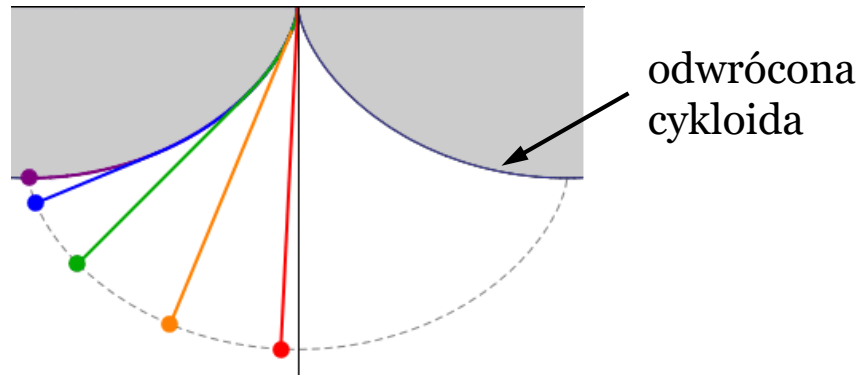


Christiaan Huygens, 1629 - 1695
(Caspar Netscher, 1671)

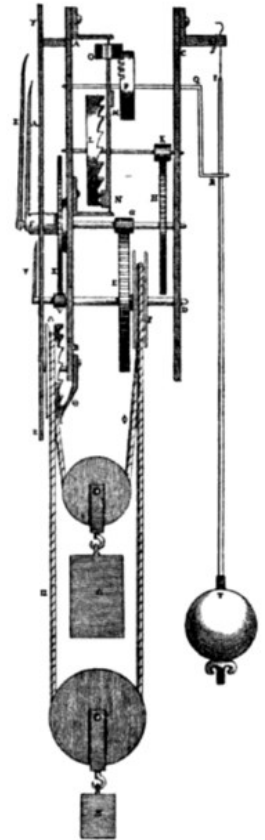


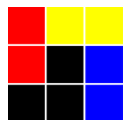
Christiaan Huygens

- Huygens wiedział, że ruch wahadła nie jest ściśle izochroniczny. Wymyślił też, co zrobić, żeby okres wahań nie zależał od amplitudy
 - wahadło musi poruszać się po cykloidzie



- Zegary Huygensa były ok. 60 razy dokładniejsze od używanych wcześniej, ± 15 s/dzień
- Zegary wahadłowe były najdokładniejszymi chronometrami przez prawie 300 lat, do ok. 1930 roku





Po co nam dokładny zegar?

- 22 października 1707 cztery duże okręty *Royal Navy* rozbiły się na skałach wysp Scilly (ok. 50 km na zachód od Kornwalii). Zginęło prawie 2000 marynarzy – była to jedna z największych katastrof w historii marynarki brytyjskiej



- jedną z przyczyn był duży błąd w wyznaczeniu długości geograficznej
- W 1714 roku parlament brytyjski uchwalił *Longitude Act 1714*. Wyznaczono w nim duże nagrody za rozwiązanie problemu długości geograficznej

- £ 20 000 jeśli błąd będzie mniejszy niż 0.5°
Na równiku 0.5° dł. g. to odległość 56 km

potrzebny zegar, którego błąd w czasie podróży nie przekroczy 2 min.



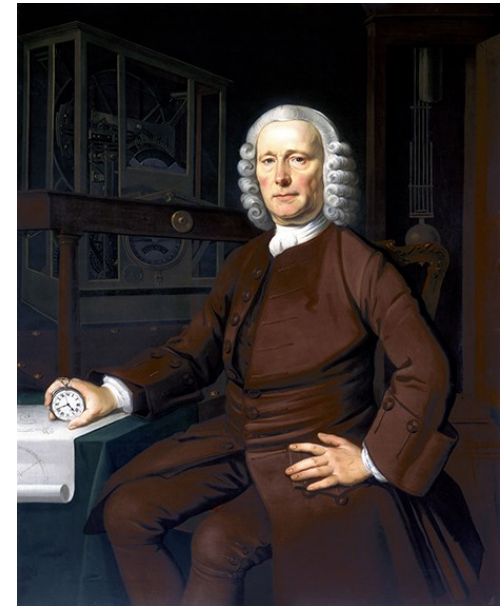
John Harrison

- John Harrison był cieślą i zegarmistrzem samoukiem. Wprowadził wiele istotnych innowacji:
 - łożysko kulkowe
 - bimetal
 - kamienie szlachetne jako łożyska
- Do konkursu przystąpił w 1730 r. Pierwszy model, (H1) ważący 35 kg i zajmujący szafę o boku 1,2 m ukończył w 1735 r.; dokładność **kilka s/dzień**
- Model H4 ważył już 1.5 kg i miał 13 cm średnicy; odbył podróż z Portsmouth na Jamajkę w 1761. Po 81 dniach jego błąd wyniósł 5 s. (1'15" dł.g.) Harrison otrzymał główną nagrodę

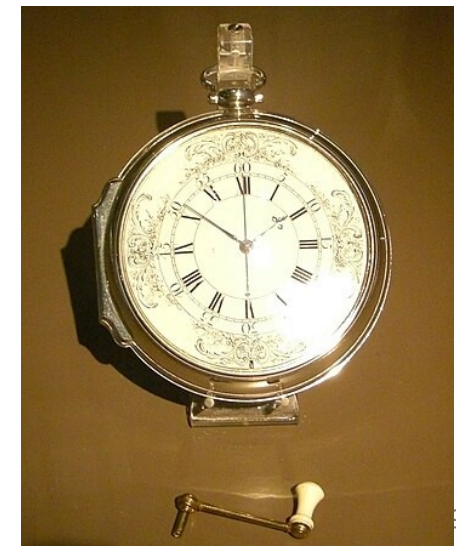
Bardzo polecam:



Dava Sobel „*W poszukiwaniu długości geograficznej*”



John Harrison, 1693 - 1776
(Thomas King, 1767)





Zegar kwarcowy

- W 1880 roku bracia Jacques i Pierre Curie odkryli piezoelektryczność, m.in. w kwarcu
- Pierwszy zegar wykorzystujący oscylator kwarcowy został opracowany przez Warrena Marrisona w 1927 r.
- W powszechnie dziś stosowanych zegarach stosuje się specjalnie wycięty kryształ kwarcu, który oscyluje z częstotścią $32\,768\text{ Hz}$ ($= 2^{15}$). Typowa dokładność to **5 – 10 s/miesiąc**
- Najbardziej zaawansowane konstrukcje pracują przy wyższych częstotściach, np. $8\,388\,608\text{ Hz}$ ($= 2^{23}$) i osiągają dokładność ok. **1 s/rok**
- W latach 1930 – 1960 standard czasu oparty był na zegarach kwarcowych





Przejścia atomowe

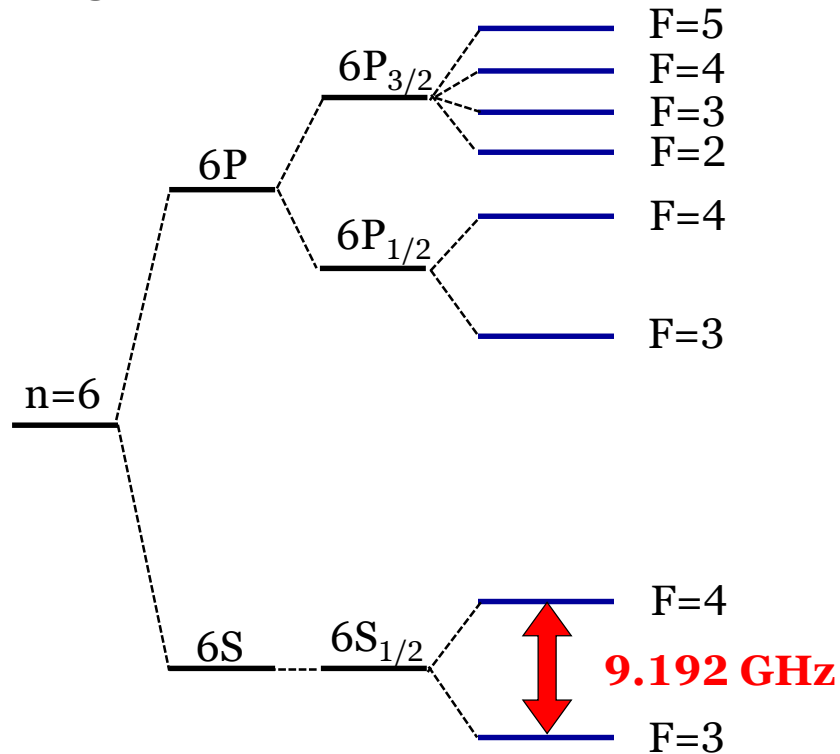
- Już James Clerc Maxwell wysunął pomysł, żeby do pomiaru czasu wykorzystać drgania pola w fali elektromagnetycznej. W swoim słynnym traktacie o elektryczności i magnetyźmie (1873) pisał, że taka uniwersalna jednostka czasu byłaby lepsza, niż ta pochodząca z obrotu Ziemi
- Prace nad wykorzystaniem przejść między stanami atomowymi rozpoczęły się pod koniec lat 30-tych XX w. Pierwszy dokładny zegar na atomach cezu powstał w 1955 r. w Londynie (Louis Essen i Jack Parry)
 - jego dokładność była już na poziomie 10^{-10} , czyli **1s/300 lat**
- Podczas przejścia atomu między dwoma stanami emitowana/pochłaniana jest fala e-m. Jej częstość jest bardzo dobrze określona i **uniwersalna!**



^{133}Cs

➤ Schemat stanów atomu cezu ($Z=55$)

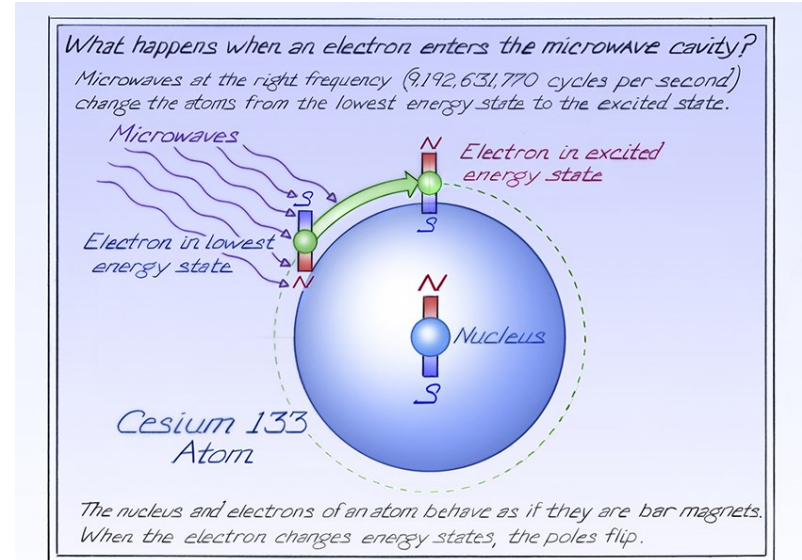
Uwaga, nie w skali!



Bohr

struktura
subtelna
fine splitting

struktura
nadsubtelna
hyperfine splitting



Jądro atomu $^{133}_{55}\text{Cs}$ ma spin **$7/2$**

Spin nieparzystego elektronu
ustawia się na dwa sposoby
względem spinu jądra

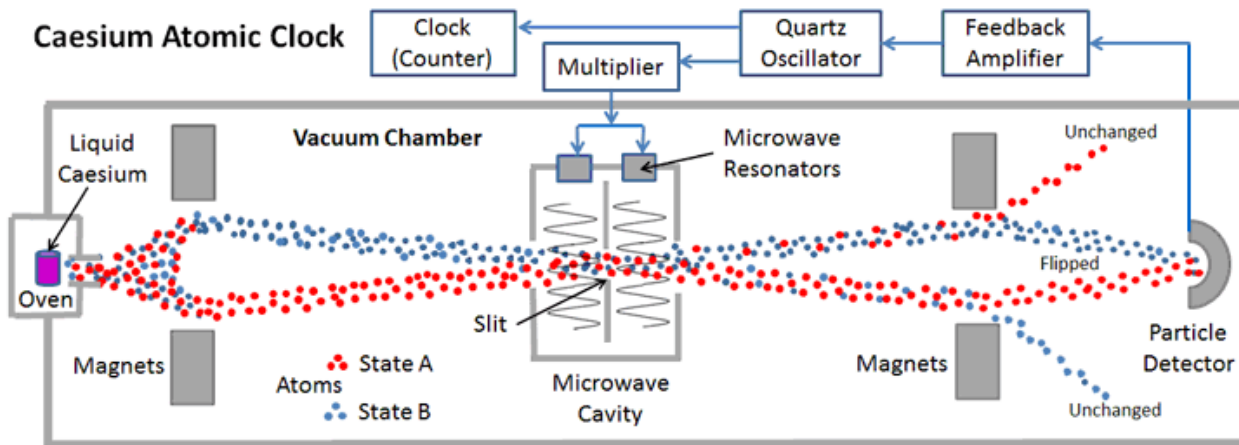
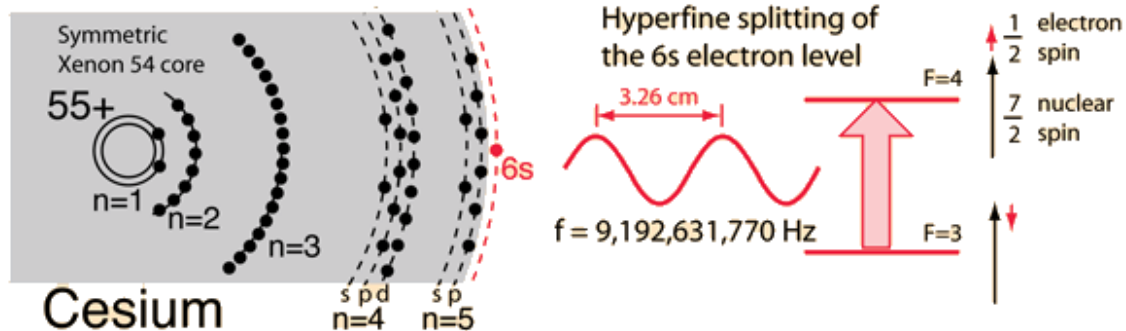
$$7/2 + 1/2 = 4$$

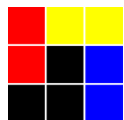
$$7/2 - 1/2 = 3$$



Zegar atomowy

➤ Zasada działania atomowego zegara cezowego





Zegary atomowe

- Do 1967 r. definicja sekundy opierała się na ruchu Ziemi wokół Słońca.
Nowa definicja:

Sekunda to czas równy 9 192 631 770 okresom promieniowania odpowiadającego przejściu między poziomami $F = 3$ i $F = 4$ struktury nadsubtelnej stanu podstawowego $S_{1/2}$ atomu cezu ^{133}Cs

- Na tej samej zasadzie działają też inne zegary atomowe, np. z ^{87}Rb .
Każdy satelita systemu GPS ma na pokładzie zegary cezowe i rubidowe
⇒ **nawigacja!**
- Najlepsze zegary cezowe mają dokładność 10^{-16} , czyli 1s/300 milionów lat
- Jeszcze lepsze wyniki osiąga się wykorzystując przejścia optyczne, o dużo większej energii, co jest możliwe dzięki laserom. Zegar na linii 578 nm (518 THz) w ^{171}Yb zbliżył się do precyzji 10^{-18} (1s/3 x 10^{10} lat)



Zegary jądrowe?

- Jądra atomowe także mają stany wzbudzone, między którymi zachodzą przejścia e-m. (gamma). W zasadzie, przejście jądrowe mogłoby służyć jako wzorzec częstości zegara

Zalety:

- jądro jest dużo mniej podatne na wpływ otoczenia niż elektrony orbitalne,
- atomy można gęściej upakować – nie musi to być rozrzedzony gaz,
- z reguły przejścia jądrowe mają dużo większą energię (częstość),

Problem:

- nie potrafimy wymuszać przejść o energiach większych niż optyczne (nie ma takich laserów)

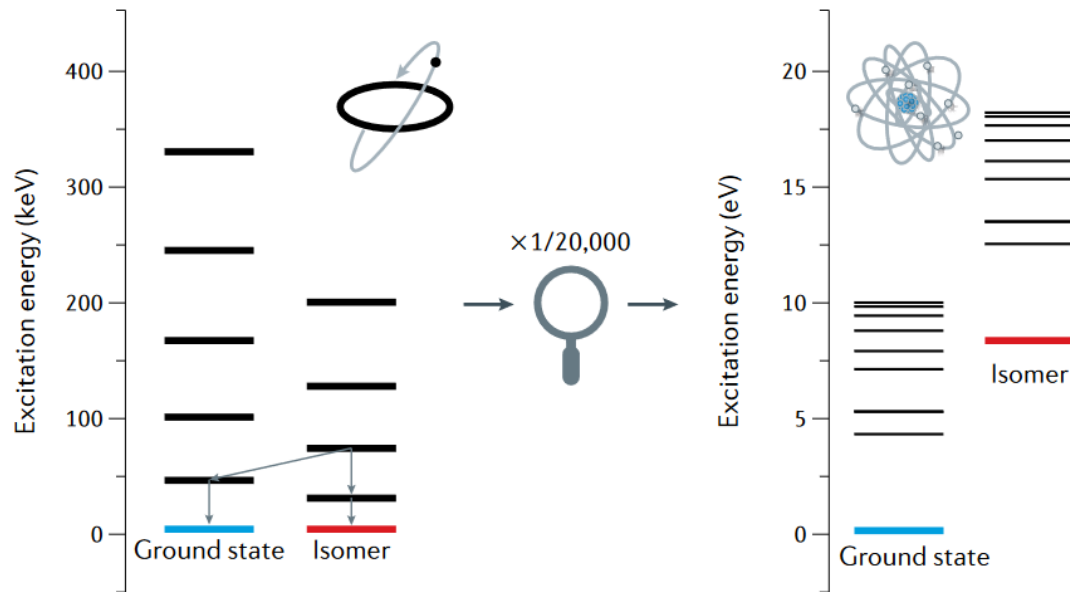
- Natura przygotowała nam niespodziankę!

Jądro ^{229}Th ma stan wzbudzony o bardzo małej energii



Izotop toru ^{229}Th

- Izotop $^{229}_{90}\text{Th}$ jest radioaktywny – emituje cząstki α , ale z bardzo długim czasem połowicznego zaniku, $T_{1/2} = 7932$ lata
- w 1976 r. wysunięto sugestię, że pierwszy stan wzbudzony tego jądra ma energię < 100 eV. Tak mała wartość jest bardzo trudna do obserwacji metodami fizyki jądrowej



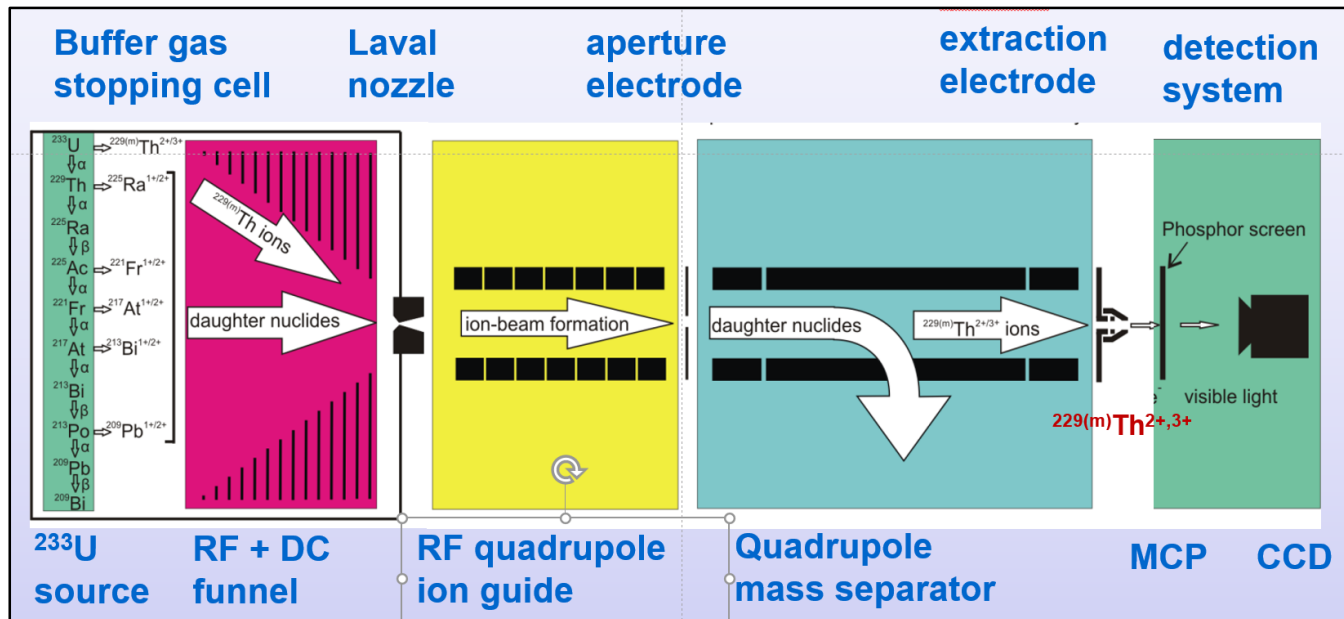
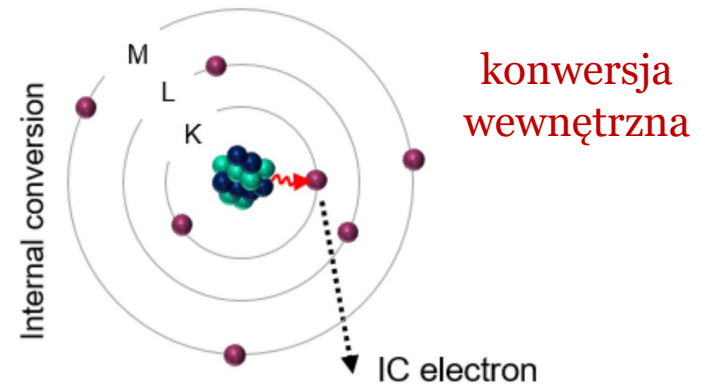
- Dopiero po 40 latach udało się wykryć ten stan

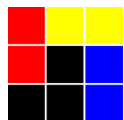


Izotop toru ^{229}Th

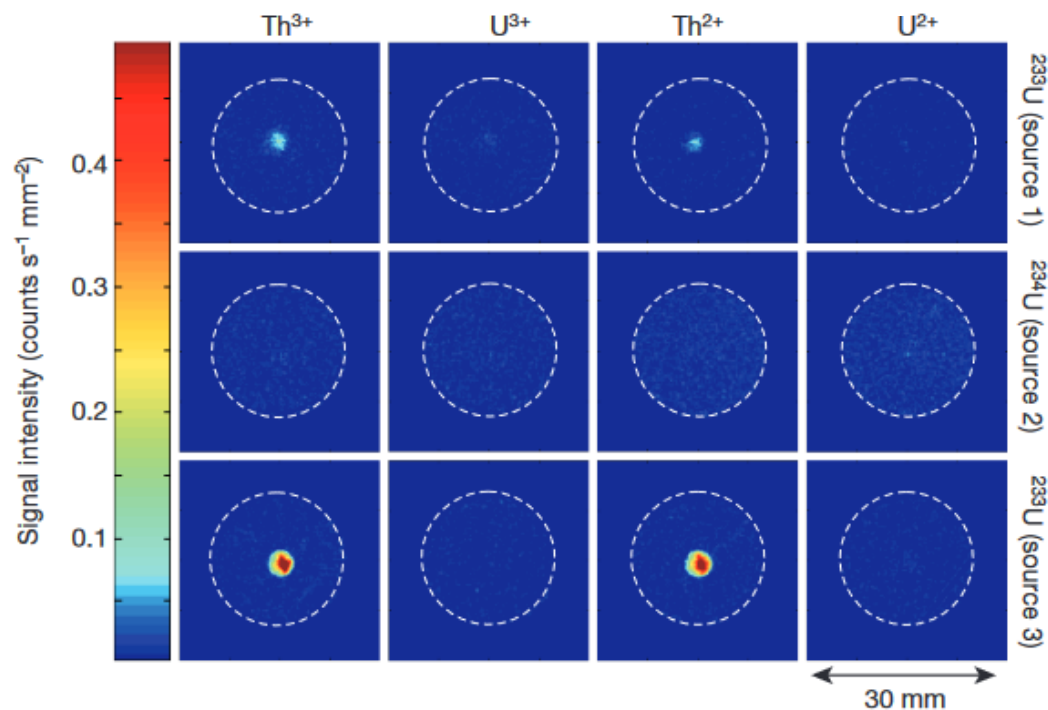
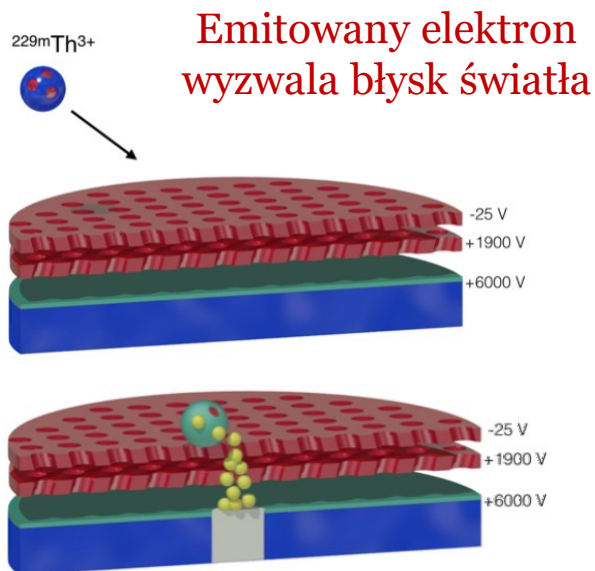
► Eksperyment w Monachium (LMU) (2016)

Z						
92	^{229}U β^+	^{230}U α	^{231}U e- capture	^{232}U α	^{233}U α	^{234}U Stable
	^{228}Pa β^+	^{229}Pa e- capture	^{230}Pa β^+	^{231}Pa α	^{232}Pa β^-	^{233}Pa β^-
90	^{227}Th α	^{228}Th α	^{229}Th α	^{230}Th α	^{231}Th β^-	^{232}Th Stable
	^{226}Ac β^-	^{227}Ac β^-	^{228}Ac β^-	^{229}Ac β^-	^{230}Ac β^-	^{231}Ac β^-
	138		140		N	





Pierwsza obserwacja ^{229m}Th



➔ Wyniki:

- oczekiwany stan ^{229m}Th istnieje!
- energia wzbudzenia w przedziale $6.3 - 18.3 \text{ eV}$
- czas połowicznego zaniku $T_{1/2} = 7 \mu\text{s}$ (IC !)
- czas zaniku dla emisji fotonu $> 10 \text{ min}$

Następne, inne eksperymenty określiły tę energię na ok. 8 eV



Radiacyjny rozpad $^{229\text{m}}\text{Th}$

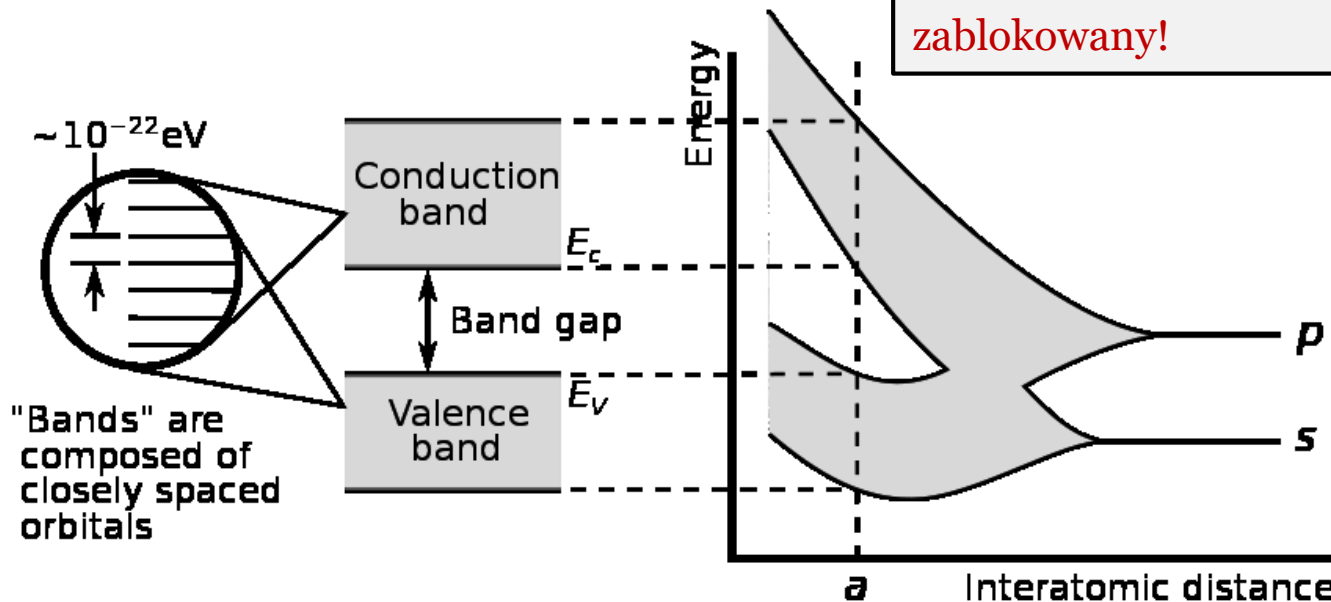
➤ Jak zobaczyć radiacyjne przejście z $^{229\text{m}}\text{Th}$?

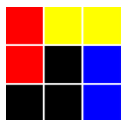
Trzeba zablokować emisję elektronów konwersji

➡ Dwa sposoby:

- oderwać kilka elektronów
- **wbić do kryształu o dużej przerwie energetycznej**

Elektrony w kryształach mogą zajmować stany tylko w dozwolonych przedziałach (pasmach) energii. Jeśli **przerwa** między pasmami będzie **większa niż energia elektronu konwersji**, to będzie on zablokowany!



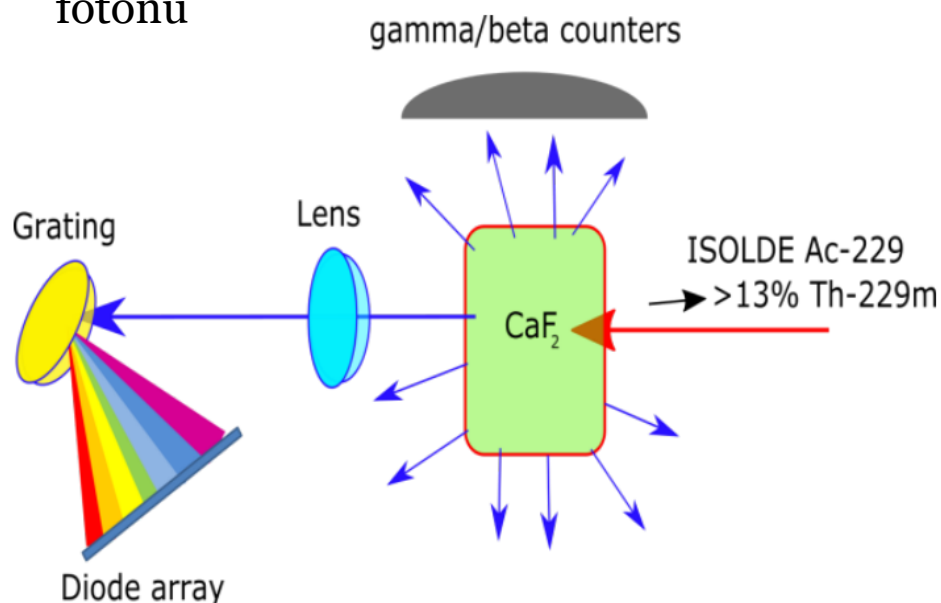


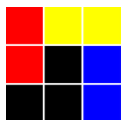
Radiacyjny rozpad $^{229\text{m}}\text{Th}$

➤ Eksperyment w CERN-ISOLDE (2022)

	^{231}U e- capture	^{232}U α	^{233}U α	^{234}U Stable
	^{230}Pa β^+	^{231}Pa α	^{232}Pa β^-	^{233}Pa β^-
	^{229}Th α	^{230}Th α	^{231}Th β^-	^{232}Th Stable
	^{228}Ac β^-	^{229}Ac β^-	^{230}Ac β^-	^{231}Ac β^-
	^{227}Ra β^-	^{228}Ra β^-	^{229}Ra β^-	^{230}Ra β^-
	^{226}Fr β^-	^{227}Fr β^-	^{228}Fr β^-	^{229}Fr β^-

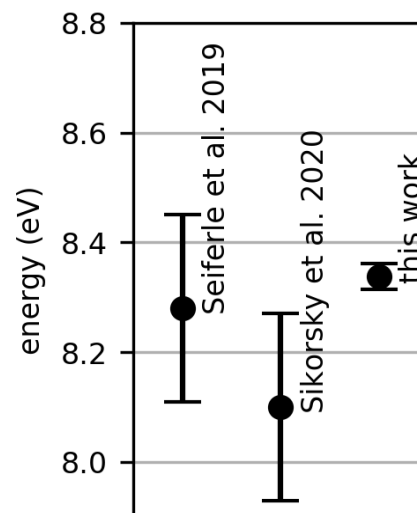
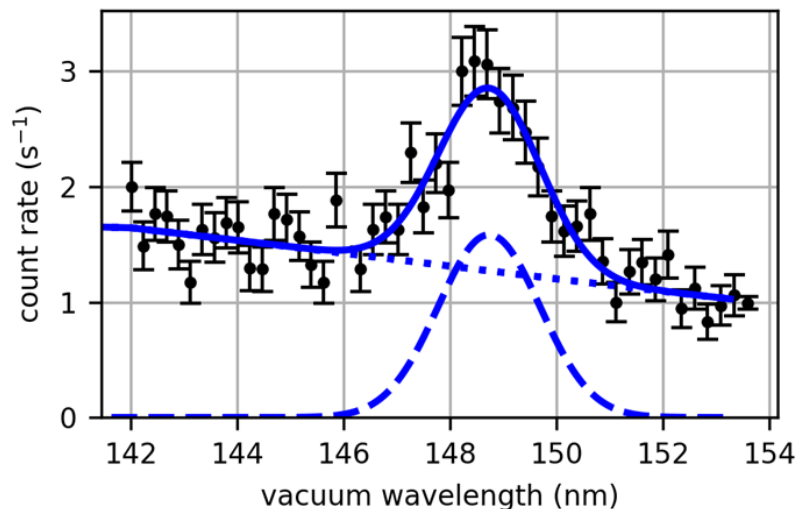
- w laboratorium ISOLDE w CERN wytworzono wiązkę jonów ^{229}Fr i ^{229}Rn o energii 30 keV, które wbijano w kryształy CaF_2 i MgF_2 ($\Delta E = 12$ eV)
- w wyniku przemian β , powstawał $^{229\text{m}}\text{Th}$
- konwersja wewnętrzna była zablokowana. Przejście do stanu podstawowego mogło zajść tylko z emisją fotonu





Radiacyjny rozpad $^{229\text{m}}\text{Th}$

➤ Zaobserwowano linię w widmie optycznym!



➔ Wyniki:

- energia izomeru: $8.338(24)$ eV
- czas połowicznego zaniku $T_{1/2} = 670$ s

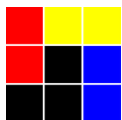
➤ Droga do spektroskopii laserowej została otwarta! Eksperymenty są w toku

Oczekuje się, że zegar oparty na $^{229\text{m}}\text{Th}$ może mieć dokładność 10^{-19}



Kilka uwag na koniec ...

- Postęp w budowie dokładnych zegarów jest ściśle związany z rozwojem fizyki – mechanika, elektromagnetyzm, atomy, jądra, ...
- Wiele ośrodków pracuje z ^{229}Th i z innymi izomerami jądrowymi, nowe wyniki (zegar?) oczekiwane w najbliższych latach
- Precyzja zegarów atomowych może się wydawać absurdalna. Ale:
 - dokładnie mierzymy zmiany obrotu Ziemi
 - coraz lepiej testujemy Ogólną Teorię Względności
 - ulepszamy dokładność GPS (cm?)
 - zmiana wysokości o 1 cm w ziemskim polu g zmienia częstość zegara o czynnik 10^{-18} → geodezja relatywistyczna?
 - czy stałe fizyczne są naprawdę stałe? (np. α)
 - ...?



... i jeszcze reklama

Zapraszamy na DOKO 2024, 23 marca!

<https://doko.mimuw.edu.pl/>

DOKO Dzień Odkrywców Kampusu Ochota

UNIwersytet Warszawski
Kampus Ochota
SOBOTA 23.03.2024

START GODZ. 10:00

TEMATY PLAN ZAJĘĆ LOGOWANIE

WYKŁADY WARSZTATY POKAZY ATRAKCJE

DOKO'24 UW - JESTEŚMY RAZEM JUŻ 10 LAT!

Zapraszamy na imprezę urodzinową z okazji dziesiątych urodzin DOKO!!!

Jak to na urodzinach - będzie uroczystość, smacznie i z fajerwerkami! W tym roku również po raz pierwszy towarzyszyć nam będzie nowy lokator Kampusu Ochota - Wydział Medyczny wraz z przygotowanymi dla Was lekarskimi atrakcjami.

Śledźcie stronę i nasze fb, przeglądajcie systematycznie wpisywane zajęcia i przebiegajcie w szerokim wyborze naukowych niespodzianek.

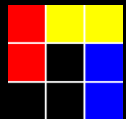
Zapisy indywidualne na zajęcia ruszają 18 MARCA O GODZ. 6:00!

Już teraz przyjmujemy mailowo zgłoszenia od GRUP ZORGANIZOWANYCH.

Pamiętajcie, że do zdobycia Indeksu Wzorowego Słuchacza konieczna jest obecność na Multiwykładzie! :)

<https://www.fuw.edu.pl/~pfutzner/index.html>

pfutzner@fuw.edu.pl



Dziękuję!

