

Fizyka jądrowa w XXI wieku

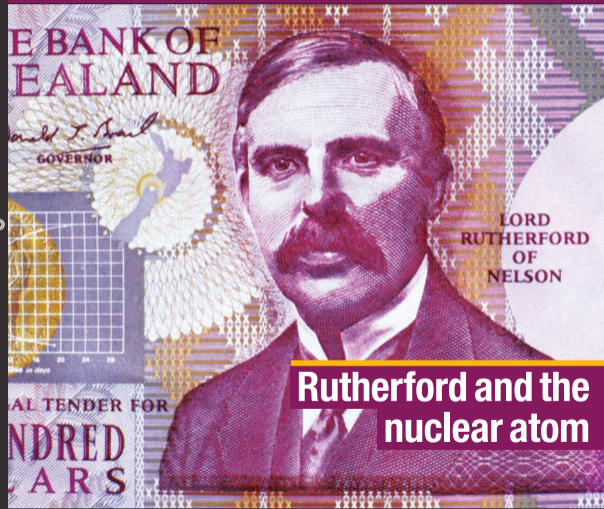
Monika Piersa-Siłkowska
(CERN, ISOLDE)

Program w CERN dla polskich nauczycieli
Genewa, 16 marca 2023

INTERNATIONAL JOURNAL OF HIGH-ENERGY PHYSICS

CERN COURIER

VOLUME 51 NUMBER 4 MAY 2011



**Rutherford and the
nuclear atom**

1911: Odkrycie dokonane przez Rutherforda daje początek fizyce jądrowej



INTERNATIONAL JOURNAL OF HIGH-ENERGY PHYSICS

CERN COURIER

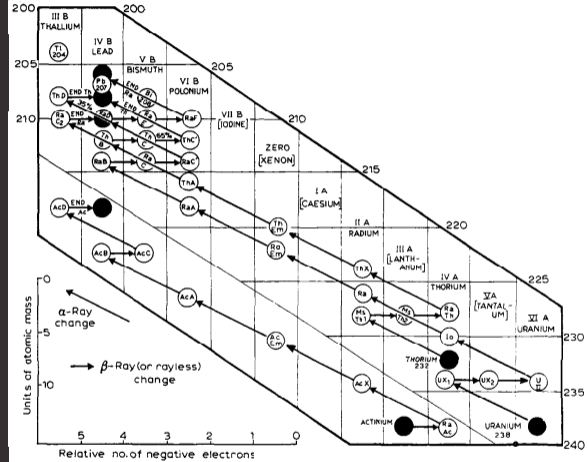
VOLUME 51 NUMBER 4 MAY 2011



1911: Odkrycie dokonane przez Rutherforda daje początek fizyce jądowej



1913: Soddy wprowadza pojęcie izotopów i rozpoczyna „układankę 2D”, (masa atomowa *versus* liczba elektronów), którą dziś kontynuujemy



Czego uczymy się kontynuując „układankę” Soddiego?

Jakie są granice występowania jąder atomowych?

Jak siły jądrowe zależą od stosunku Z/N ?

Jak opisać wzbudzenia jąder?

Jakie kształty mogą przyjmować jądra?

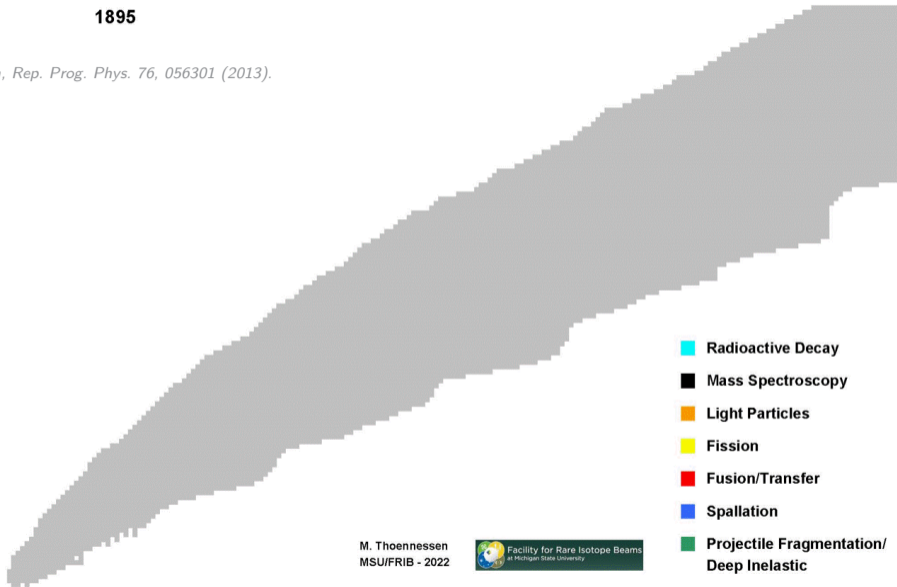
Czy możliwy jest opis wszystkich jąder poprzez strukturę powłokową i jak struktura powłokowa zmienia się w obszarze mapy nuklidów?

Jak zjawiska kolektywne w jądrze wyjaśnić na gruncie ruchu indywidualnych nukleonów?

Czy halo neutronowe i skóra neutronowa występują na całym obszarze mapy nuklidów?

1895

M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. 76, 056301 (2013).

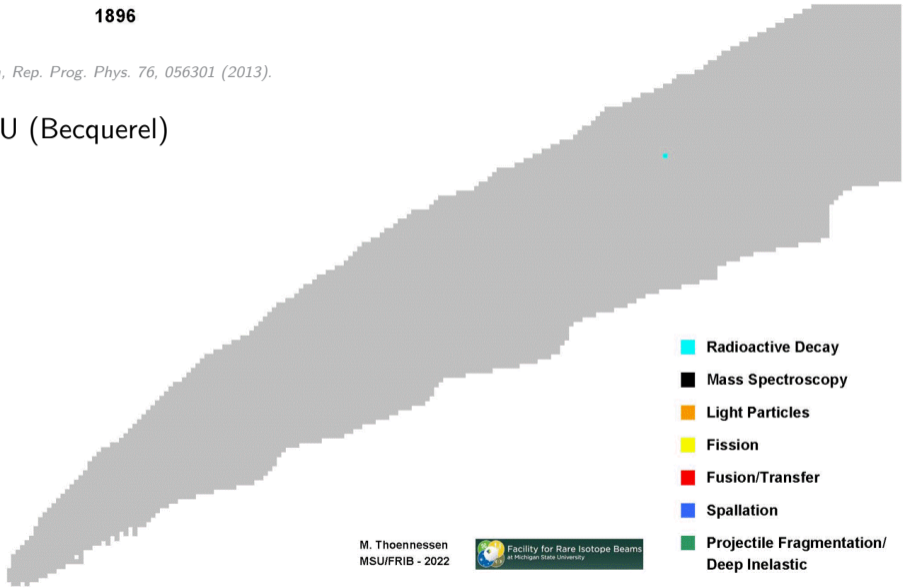


- Radioactive Decay
- Mass Spectroscopy
- Light Particles
- Fission
- Fusion/Transfer
- Spallation
- Projectile Fragmentation/
Deep Inelastic

1896

M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. 76, 056301 (2013).

1896: ^{238}U (Becquerel)



- Radioactive Decay
- Mass Spectroscopy
- Light Particles
- Fission
- Fusion/Transfer
- Spallation
- Projectile Fragmentation/
Deep Inelastic

M. Thoennessen
MSU/FRIB - 2022



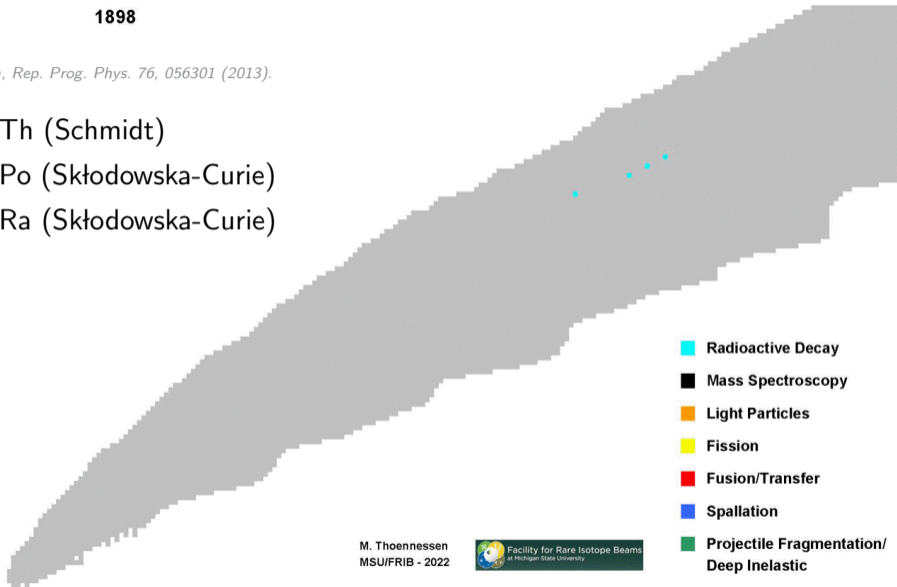
1898

M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. 76, 056301 (2013).

1898: ^{132}Th (Schmidt)

1898: ^{210}Po (Skłodowska-Curie)

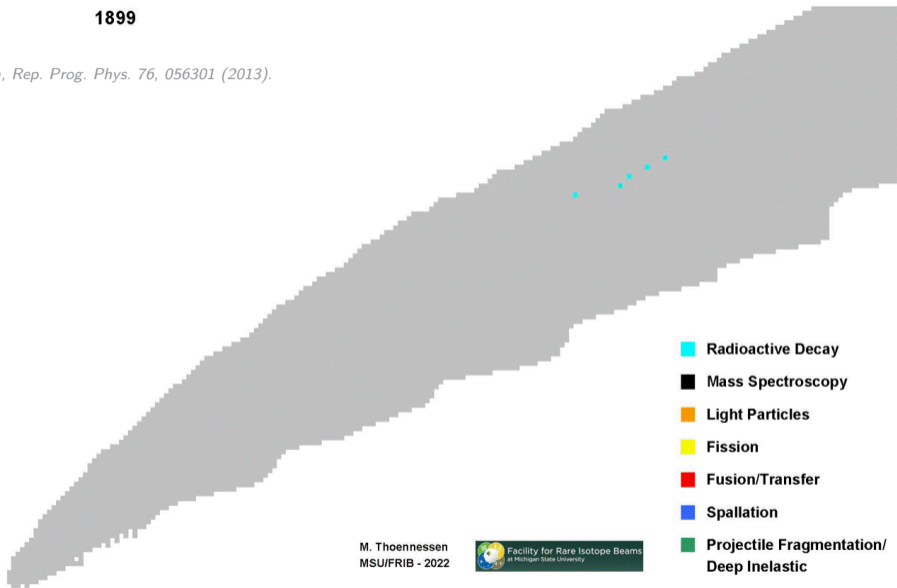
1898: ^{226}Ra (Skłodowska-Curie)



- Radioactive Decay
- Mass Spectroscopy
- Light Particles
- Fission
- Fusion/Transfer
- Spallation
- Projectile Fragmentation/
Deep Inelastic

1899

M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. 76, 056301 (2013).

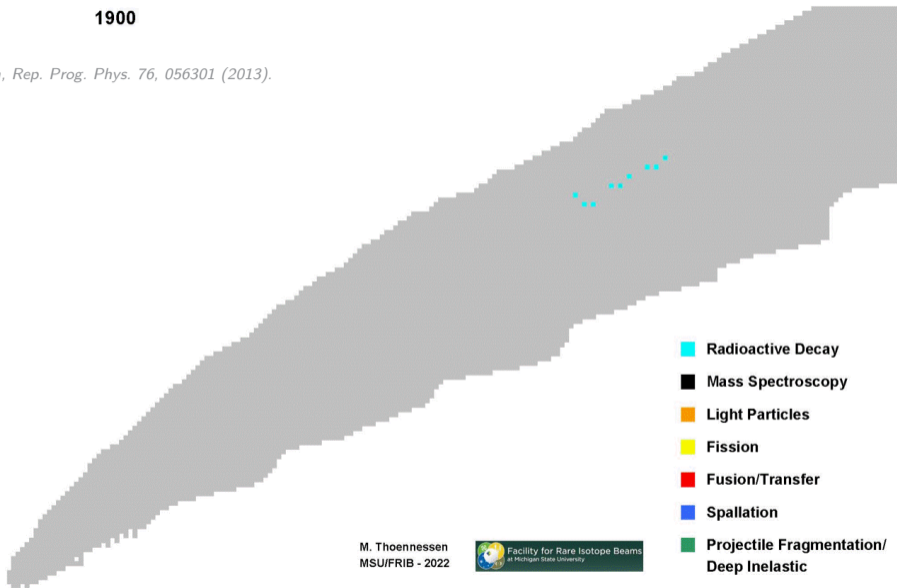


M. Thoennessen
MSU/FRIB - 2022



1900

M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. 76, 056301 (2013).

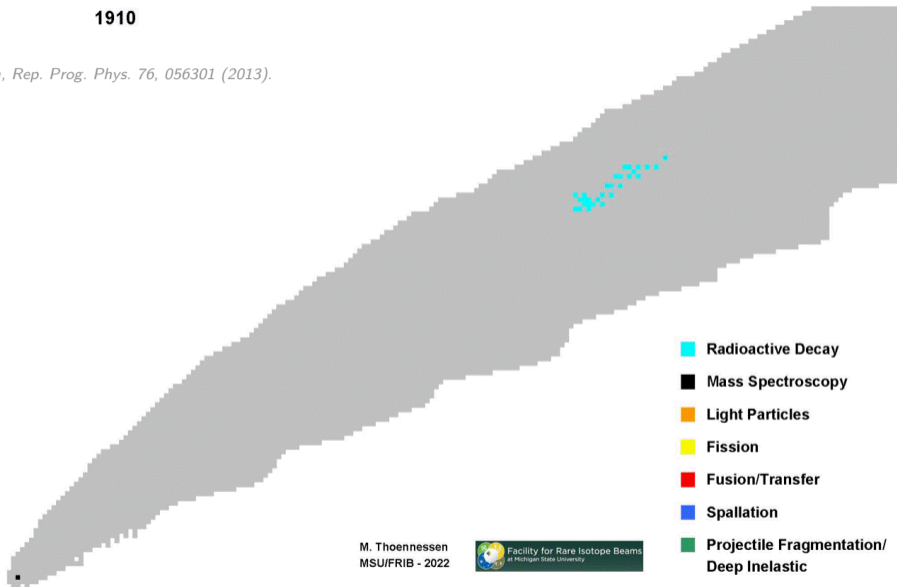


M. Thoennessen
MSU/FRIB - 2022



1910

M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. 76, 056301 (2013).

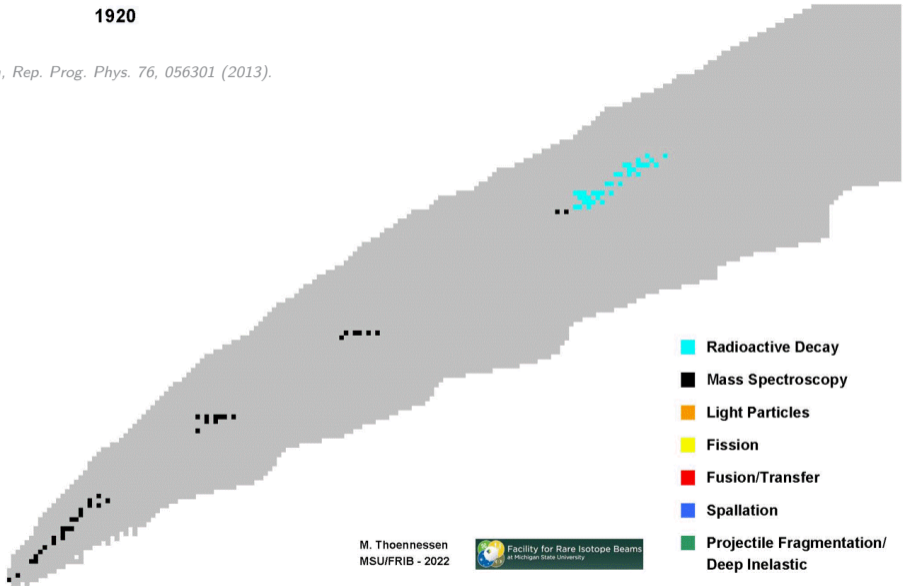


M. Thoennessen
MSU/FRIB - 2022



1920

M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. 76, 056301 (2013).

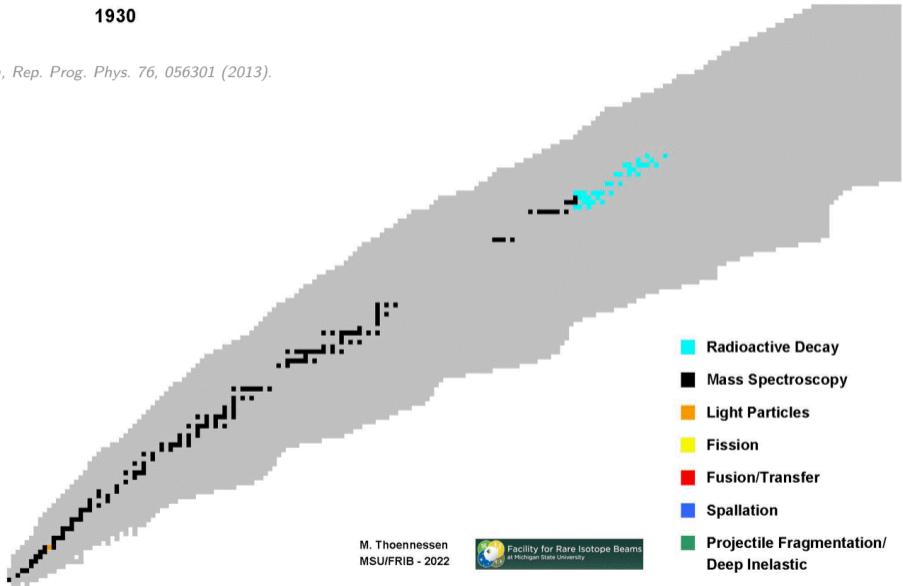


M. Thoennessen
MSU/FRIB - 2022



1930

M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. 76, 056301 (2013).

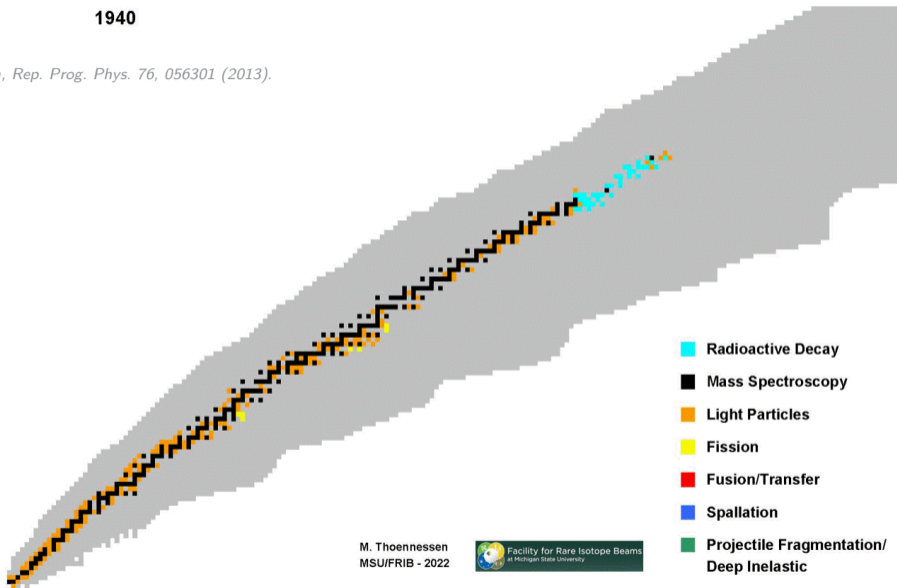


M. Thoennessen
MSU/FRIB - 2022



1940

M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. 76, 056301 (2013).

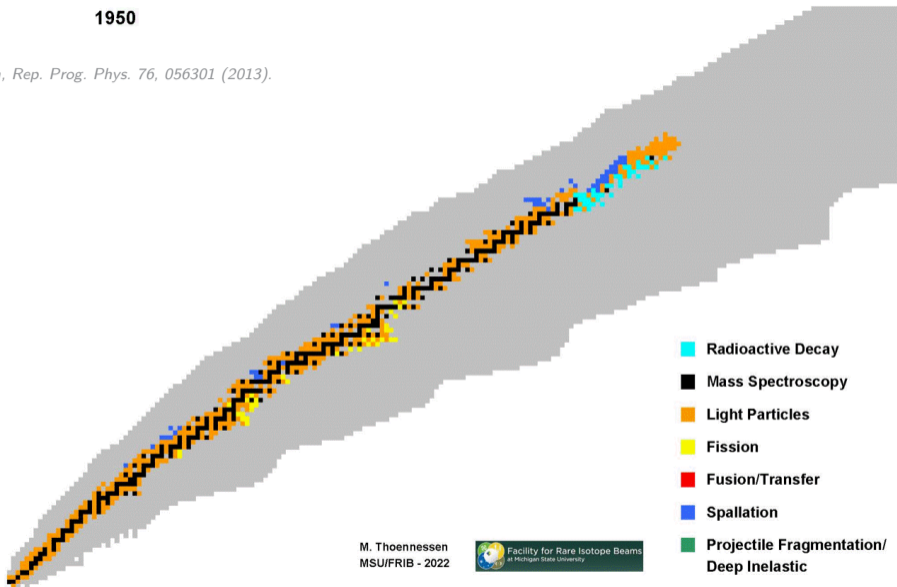


M. Thoennessen
MSU/FRIB - 2022



1950

M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. 76, 056301 (2013).

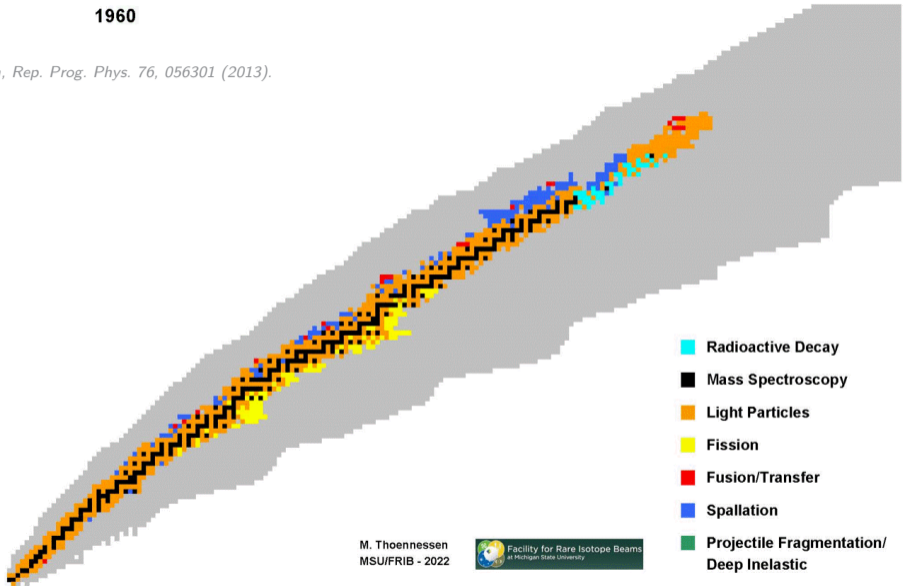


M. Thoennessen
MSU/FRIB - 2022



1960

M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. 76, 056301 (2013).



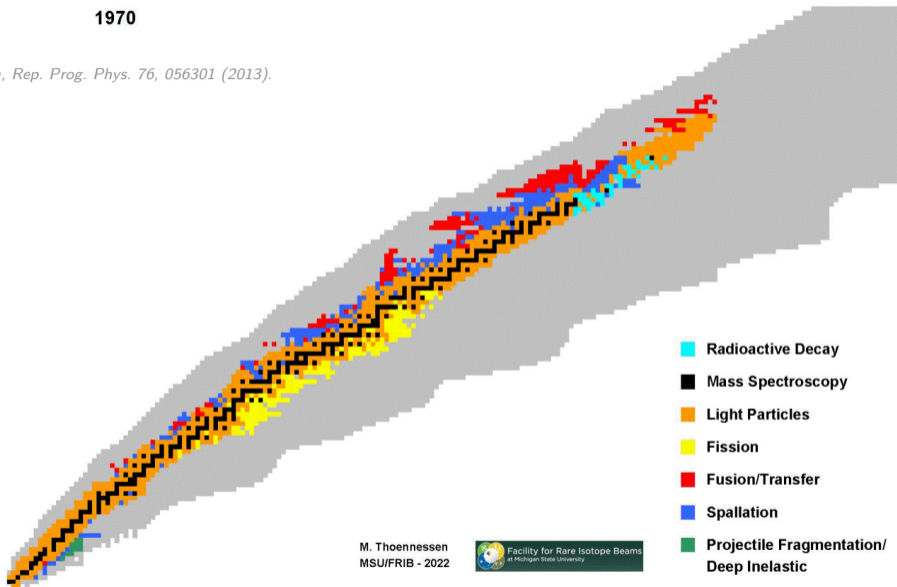
M. Thoennessen
MSU/FRIB - 2022



- Radioactive Decay
- Mass Spectroscopy
- Light Particles
- Fission
- Fusion/Transfer
- Spallation
- Projectile Fragmentation/
Deep Inelastic

1970

M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. 76, 056301 (2013).

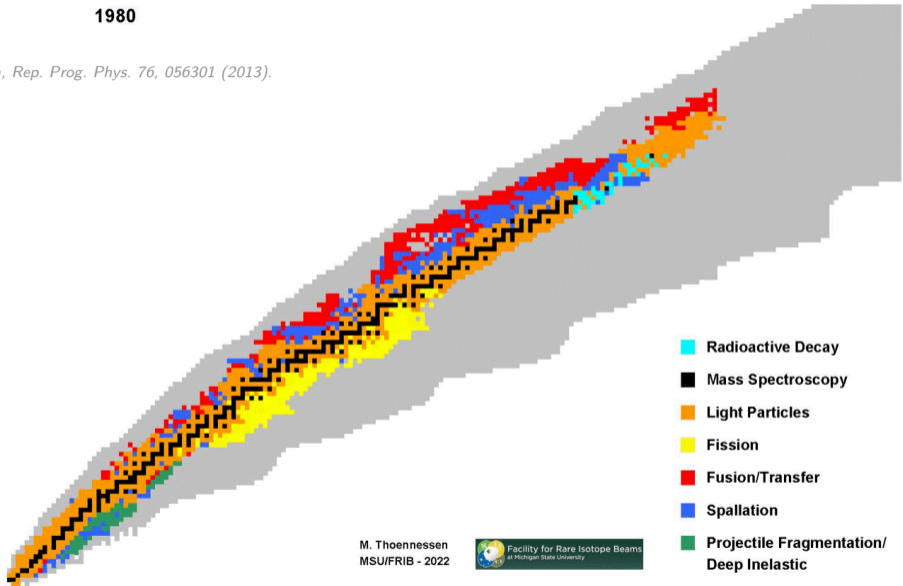


M. Thoennessen
MSU/FRIB - 2022



1980

M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. 76, 056301 (2013).



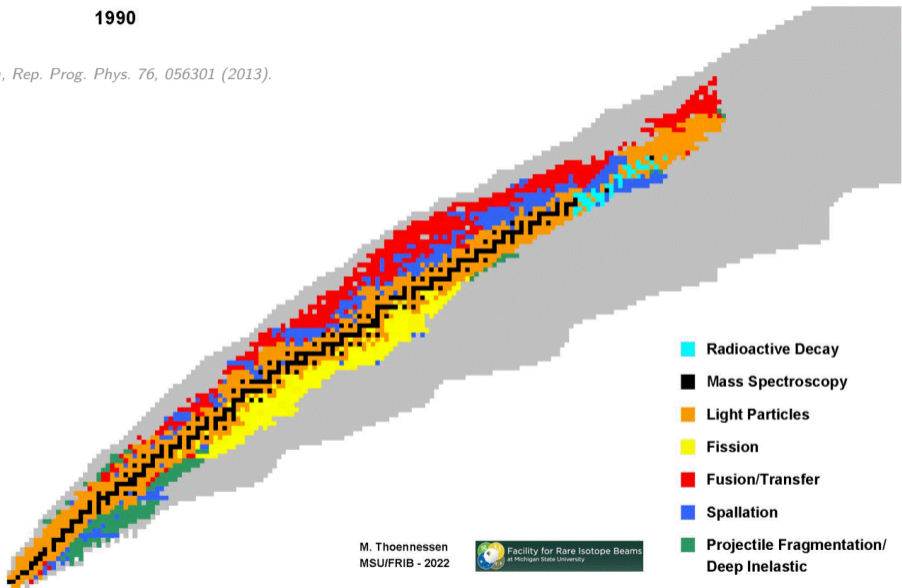
M. Thoennessen
MSU/FRIB - 2022



- Radioactive Decay
- Mass Spectroscopy
- Light Particles
- Fission
- Fusion/Transfer
- Spallation
- Projectile Fragmentation/
Deep Inelastic

1990

M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. 76, 056301 (2013).

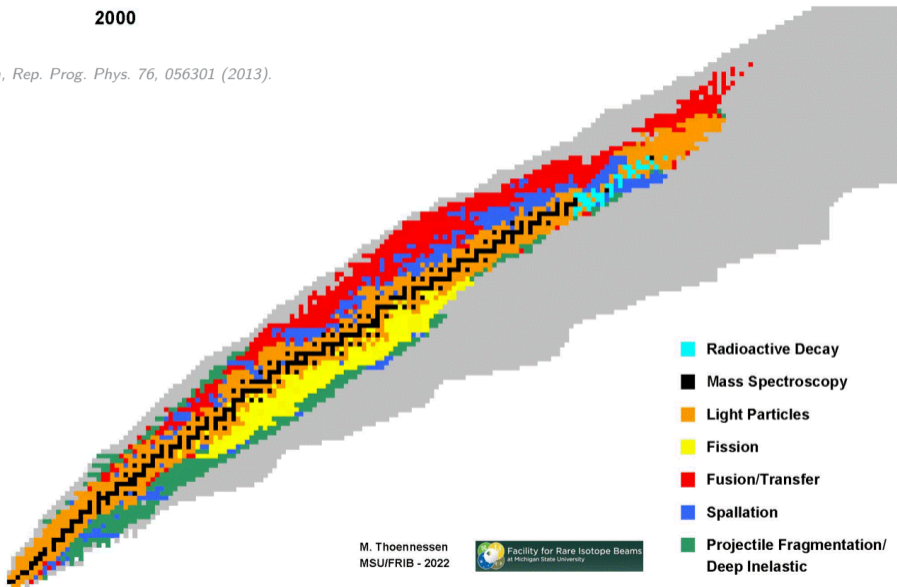


M. Thoennessen
MSU/FRIB - 2022



2000

M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. 76, 056301 (2013).

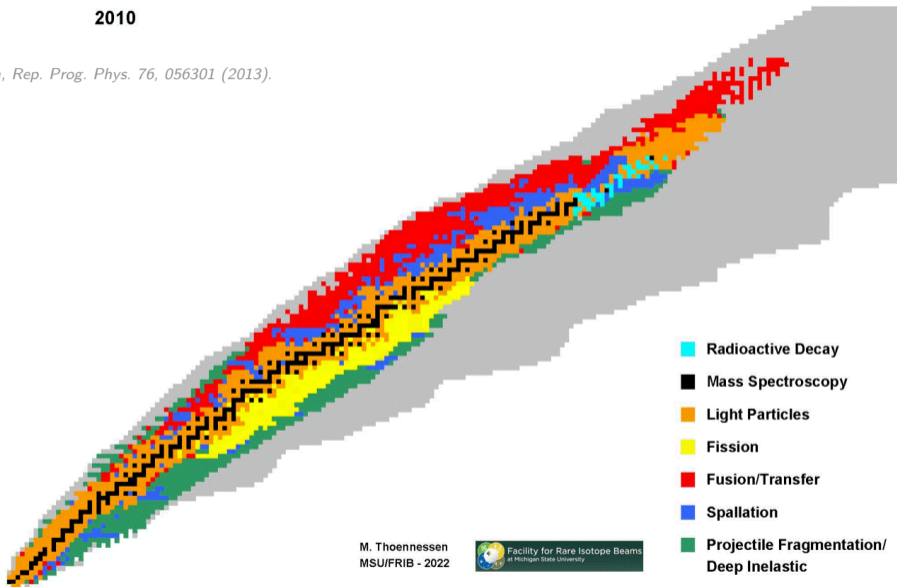


M. Thoennessen
MSU/FRIB - 2022



2010

M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. 76, 056301 (2013).

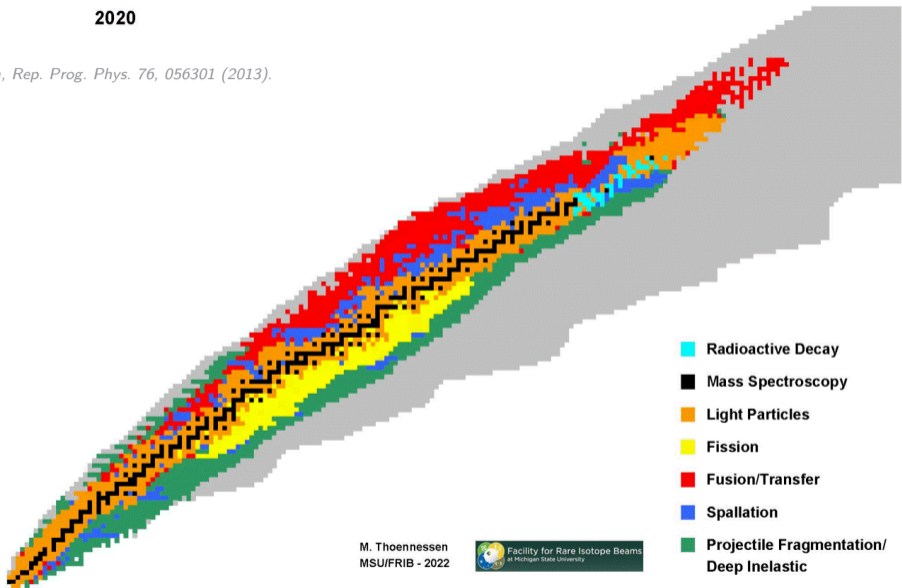


M. Thoennessen
MSU/FRIB - 2022



2020

M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. 76, 056301 (2013).

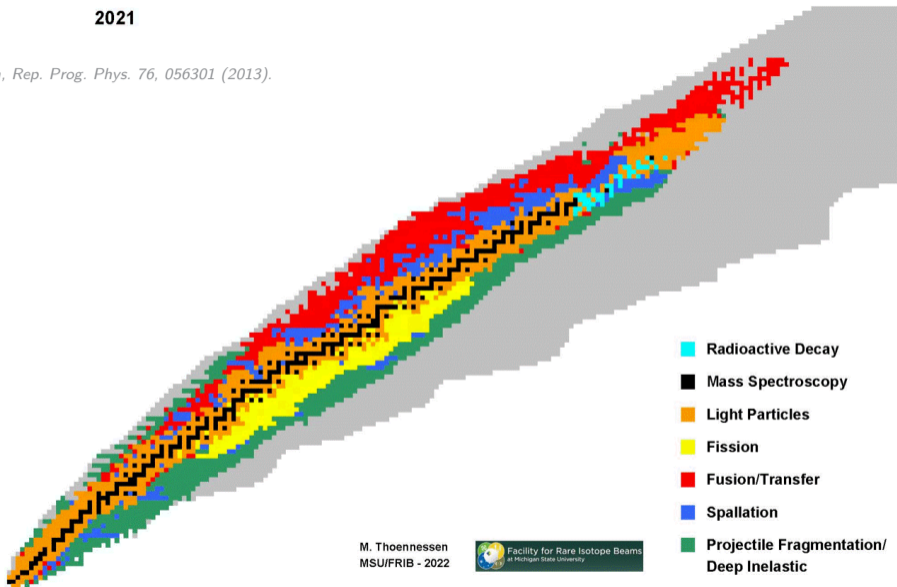


M. Thoennessen
MSU/FRIB - 2022



2021

M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. 76, 056301 (2013).

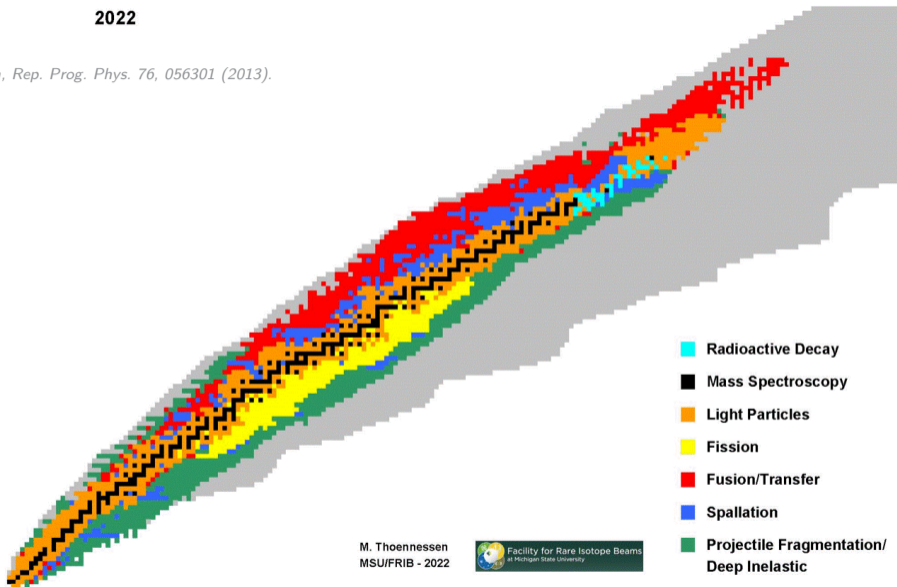


M. Thoennessen
MSU/FRIB - 2022



2022

M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. 76, 056301 (2013).



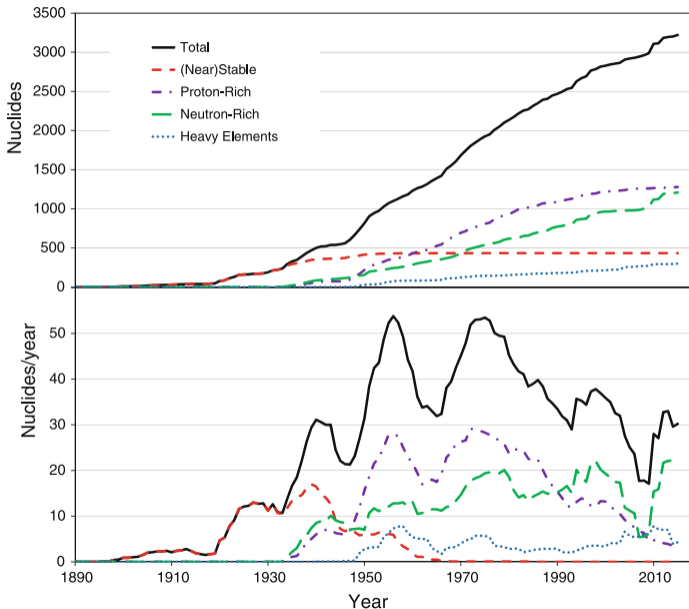
M. Thoennessen
MSU/FRIB - 2022



Tempo wypełniania mapy nuklidów

Łączna liczba
odkrytych nuklidów

Liczba odkrytych
nuklidów na rok
(średnia z 10 lat)

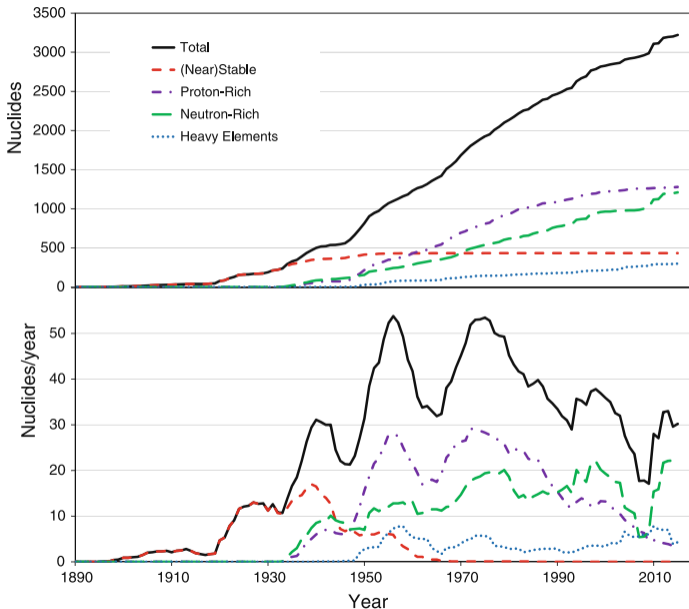


Tempo wypełniania mapy nuklidów

- Dziś znamy 3338 nuklidów
- 11 nowych raportowano w 2022
- Stabilne i bliskie stabilności zostały odkryte przed 1960
- Różna dynamika identyfikacji kolejnych izotopów

Przykład:

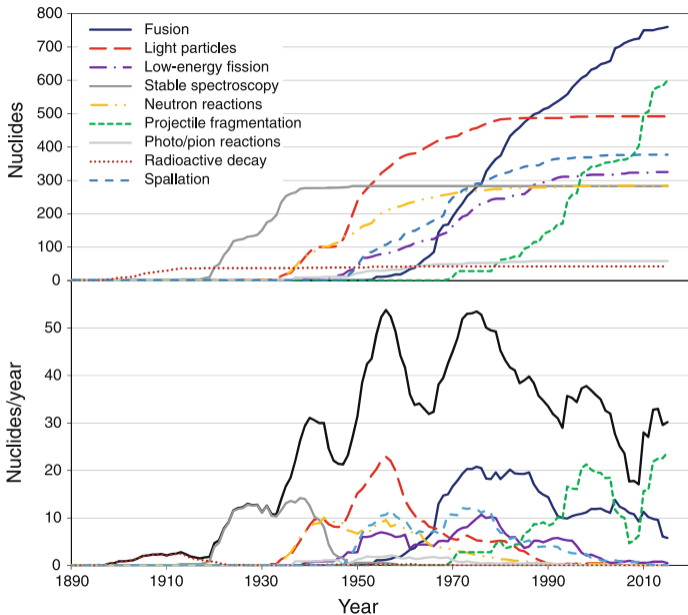
60 lat oczekiwania na odkrycie ^{213}Pb
po identyfikacji lżejszego ^{212}Pb
oraz cięższego ^{214}Pb



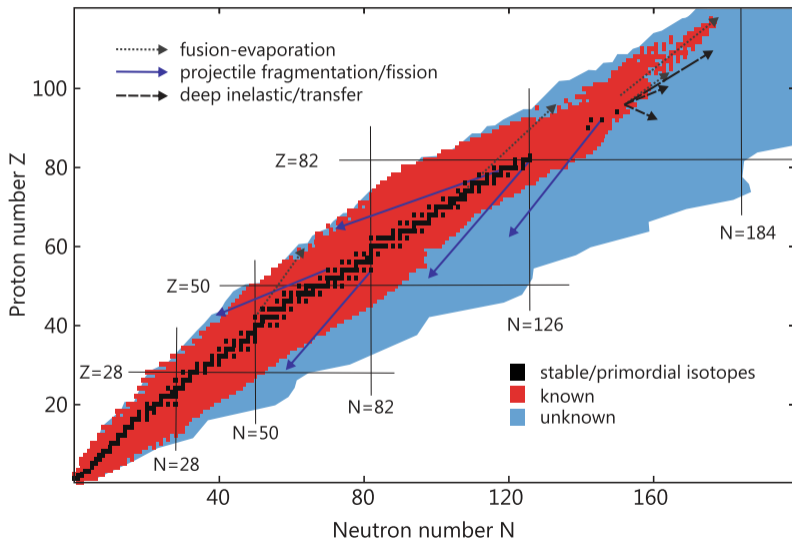
Metody wypełniania mapy nuklidów

Łączna liczba
odkrytych nuklidów

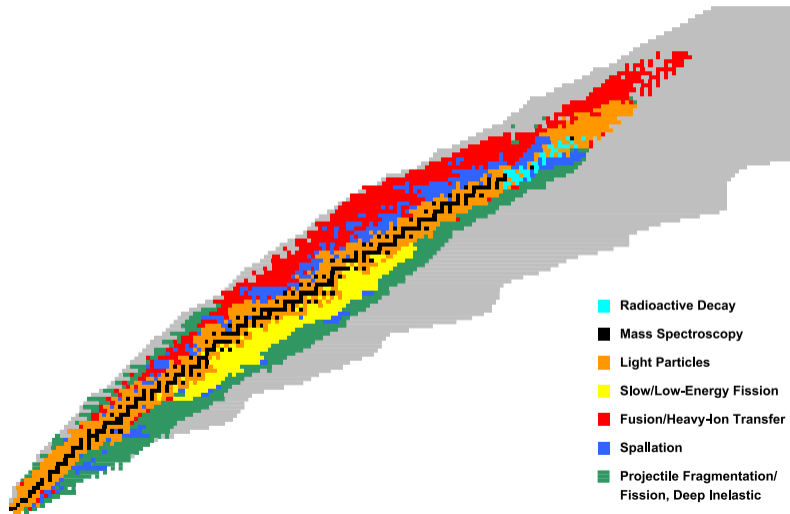
Liczba odkrytych
nuklidów na rok
(średnia z 10 lat)



Jak będziemy odkrywać kolejne (egzotyczne) nuklidy?

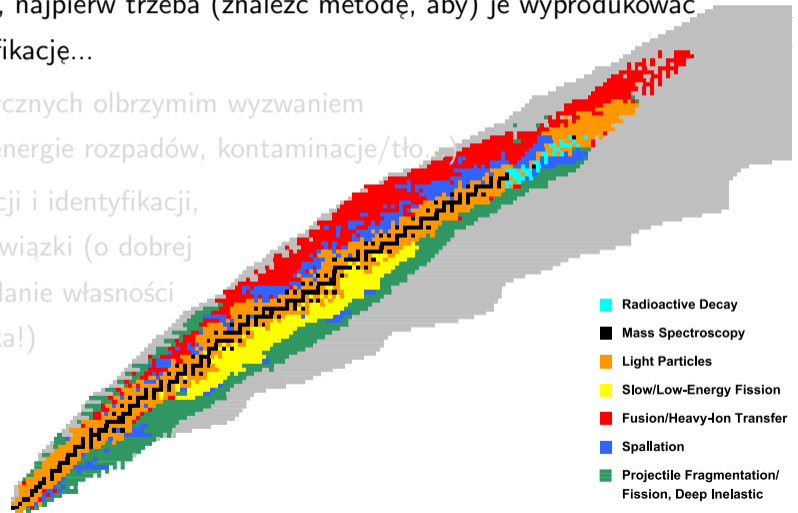


Dlaczego (samo) odkrywanie jest ważne?



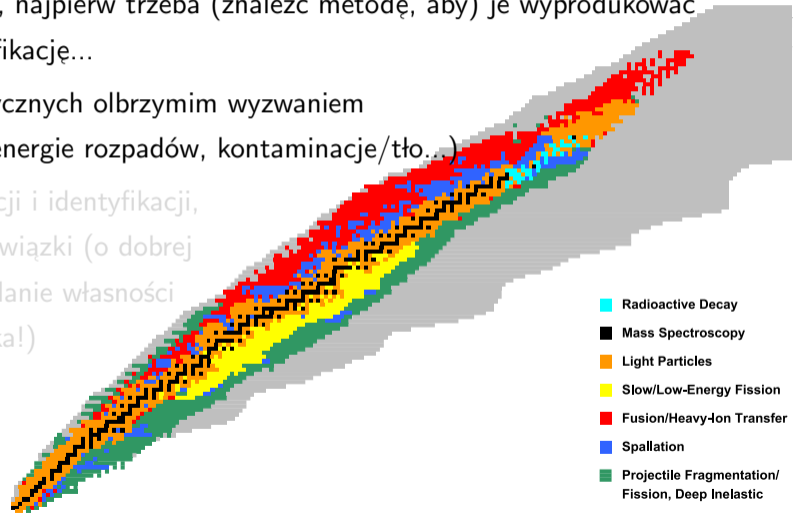
Dlaczego odkrywanie jest takie ważne?

- Żeby je zbadać i zrozumieć, najpierw trzeba (znaleźć metodę, aby) je wyprodukować oraz potwierdzić ich identyfikację...
- Pierwsze eksploracje egzotycznych olbrzymim wyzwaniem (krótkie czasy życia, duże energie rozpadów, kontaminacje/tło...)
- Ulepszamy techniki produkcji i identyfikacji, aby dostarczać intensywne wiązki (o dobrej jakości) umożliwiające zbadanie własności jąder atomowych (statystyka!)



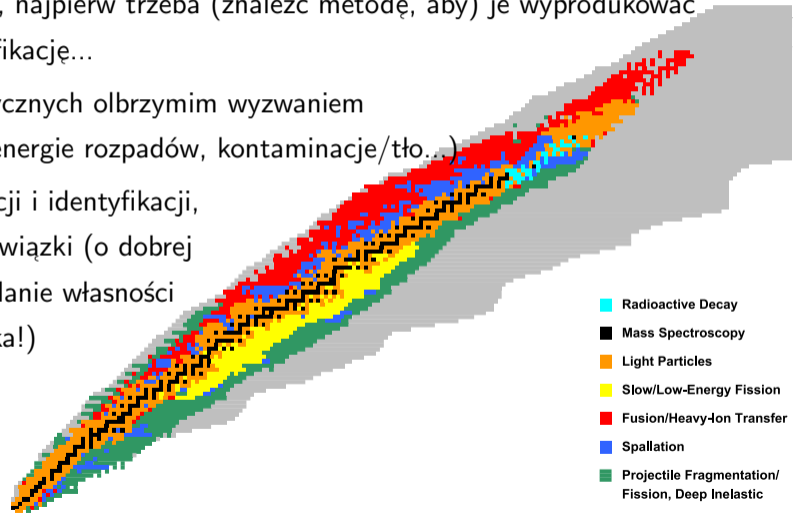
Dlaczego odkrywanie jest takie ważne?

- Żeby je zbadać i zrozumieć, najpierw trzeba (znaleźć metodę, aby) je wyprodukować oraz potwierdzić ich identyfikację...
- Pierwsze eksploracje egzotycznych olbrzymim wyzwaniem (krótkie czasy życia, duże energie rozpadów, kontaminacje/tło...)
- Ulepszamy techniki produkcji i identyfikacji, aby dostarczać intensywne wiązki (o dobrej jakości) umożliwiające zbadanie własności jąder atomowych (statystyka!)





Dlaczego odkrywanie jest takie ważne?

- Żeby je zbadać i zrozumieć, najpierw trzeba (znaleźć metodę, aby) je wyprodukować oraz potwierdzić ich identyfikację...
- Pierwsze eksploracje egzotycznych olbrzymim wyzwaniem (krótkie czasy życia, duże energie rozpadów, kontaminacje/tło...)
- Ulepszamy techniki produkcji i identyfikacji, aby dostarczać intensywne wiązki (o dobrej jakości) umożliwiające zbadanie własności jąder atomowych (statystyka!)



Gdzie odkryto najczęściej izotopów? Kto odkrył ich najczęściej?

Laboratoria		Główni* odkrywcy:		Współodkrywcy*:	
1. Berkeley (US):	640	1. F. W. Aston:	205	1. H. Geissel	277
2. Darmstadt (DE):	445	2. M. Bernas:	110	2. M. Pfützner 	231
3. Dubna (RU):	223	3. J. Kurcewicz: 	60	3. T. Kubo	223
4. Cambridge (GB):	218				
5. RIKEN (JP):	196				
6. Argonne (US):	114				
7. CERN (CH) :	111				
8. GANIL (FR):	84				

* Pierwszy autor publikacji

* Autor/współautor publikacji

Nuklid uznany za odkryty jeśli zidentyfikowana jego masa oraz ładunek i jest to raportowane w recenzowanym czasopiśmie

Identyfikacja izotopu pierwszym krokiem ku zrozumieniu jego własności

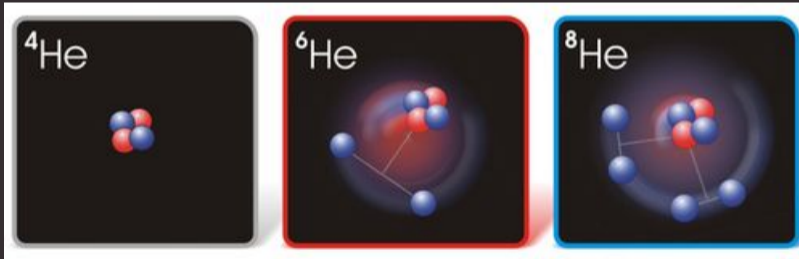
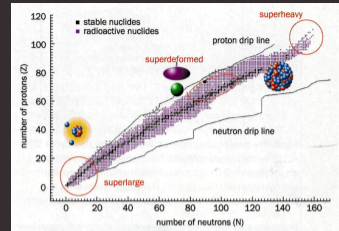
Not everyone agrees that this ranking is the best way to capture the science of the field. Krzysztof Rykaczewski (🇵🇱), a nuclear physicist at Oak Ridge National Laboratory in Tennessee, who according to Thoennessen's list has discovered 60 isotopes, would like to see a ranking include not only discoveries, but also the first person to study the properties and nuclear structure of the atoms.

"Identifying is only the first step," he says.

E. Reich, Isotope ranking reveals leading labs. Nature (2011).

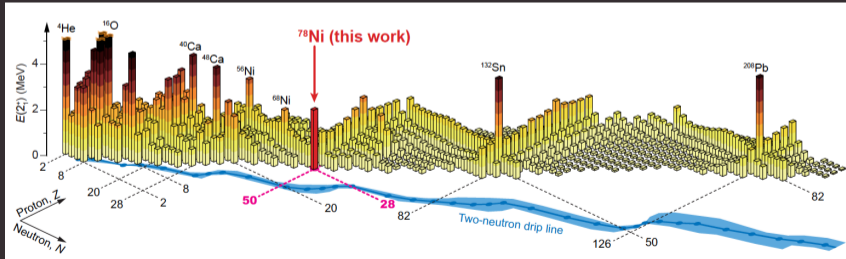
Struktura jąder atomowych:

Super-duże jądra atomowe na dole mapy nuklidów

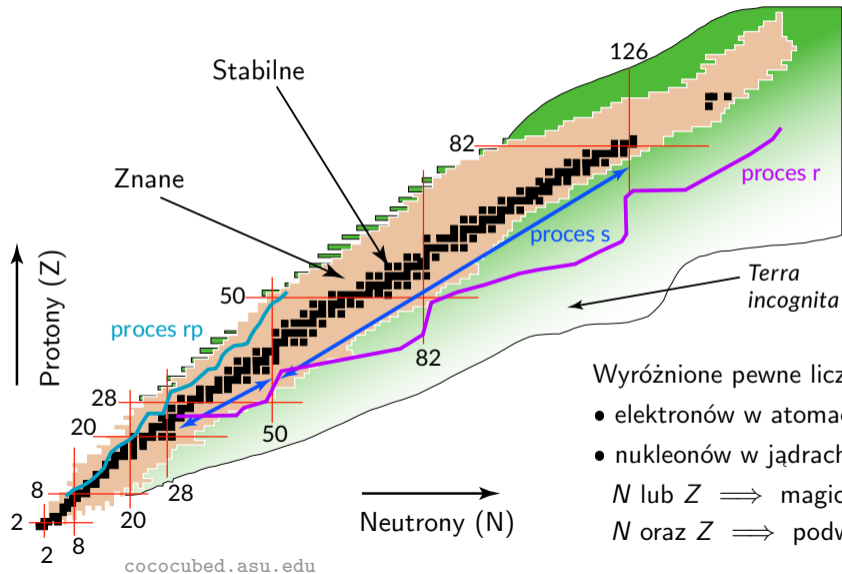


Struktura jąder atomowych:

Poszukujemy magiczności daleko od ścieżki stabilności



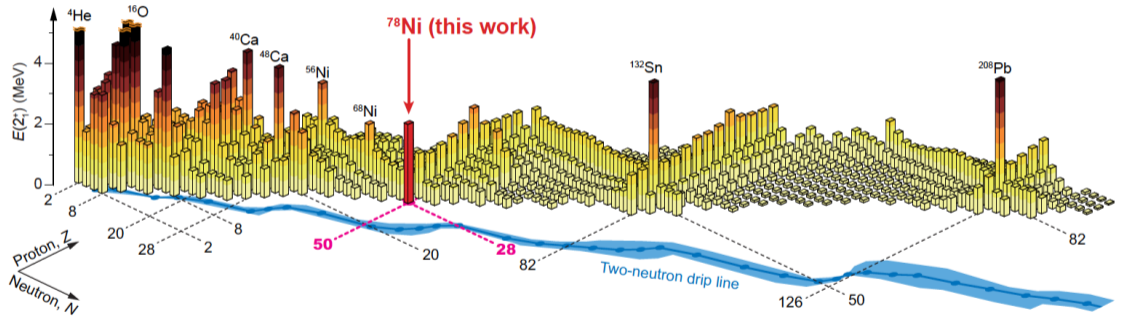
Liczby magiczne i podwójnie magiczne



Wyróżnione pewne liczby (konfiguracje):

- elektronów w atomach \implies gazy szlachetne
- nukleonów w jądrach atomowych,
 N lub $Z \implies$ magiczne
 N oraz $Z \implies$ podwójnie magiczne

Liczby magiczne i podwójnie magiczne



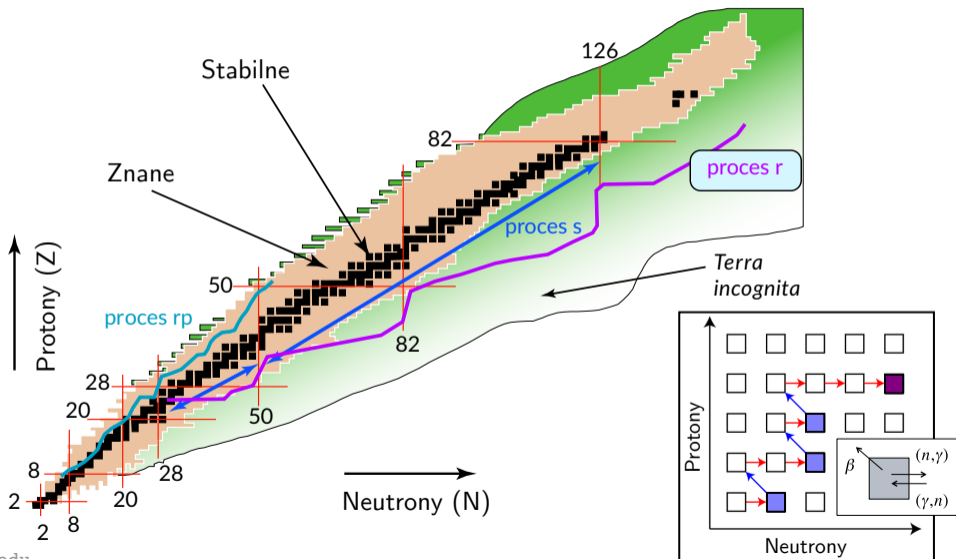
*Struktura jąder atomowych
oraz astrofizyka jądrowa:*

Dostarczamy danych
do astrofizycznych symulacji,
aby zrozumieć nukleosyntezę

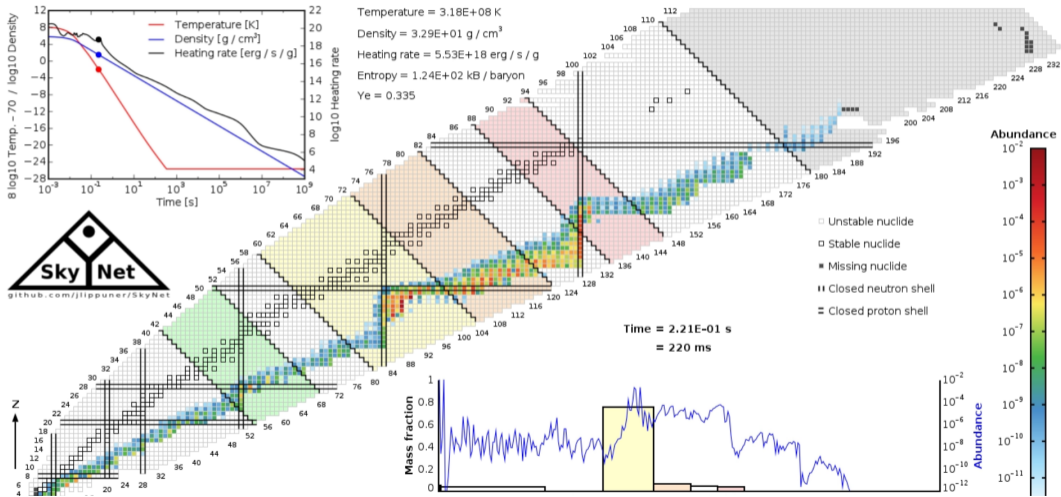


*Artist's depiction of a neutron star collision after inspiral. (Credit: NASA/Swift/Dana Berry)
<https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20171016>*

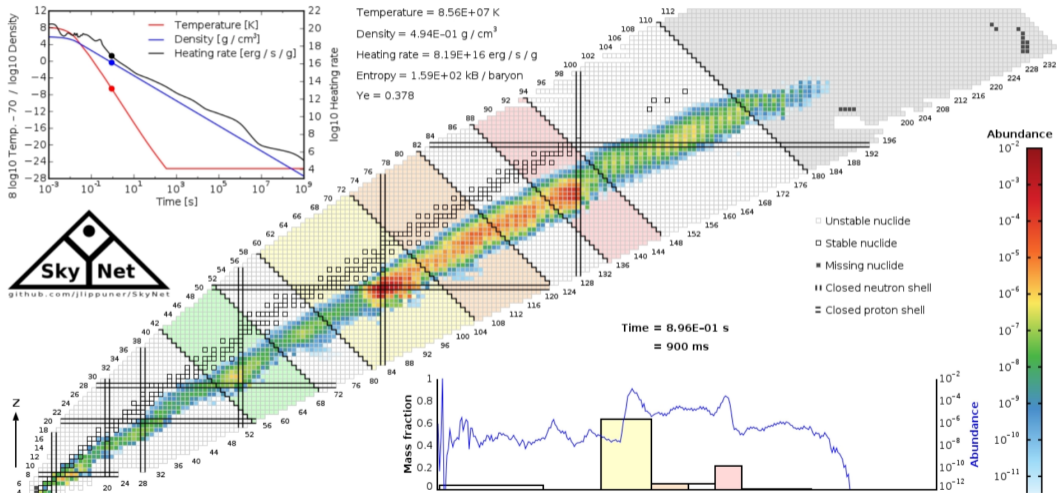
Ścieżka procesu r a własności rozpadów



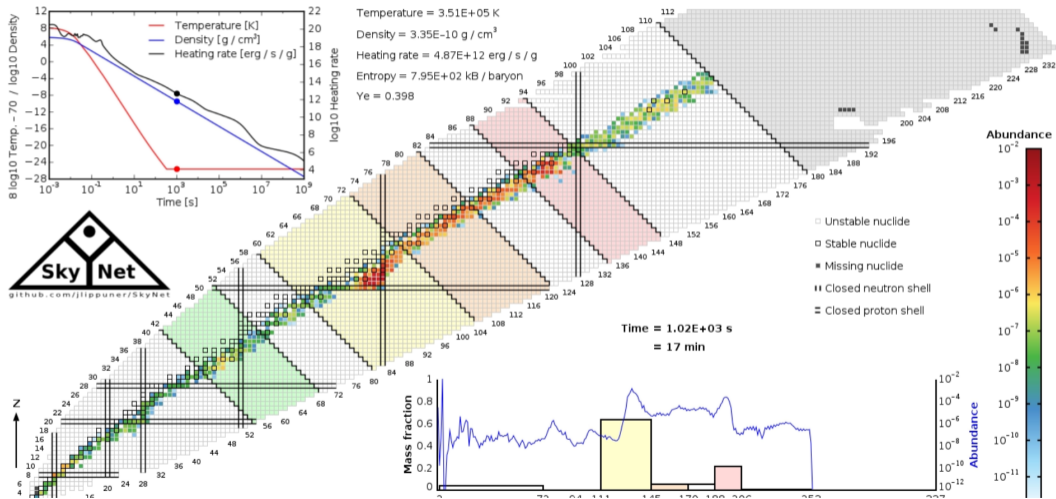
Symulacja przebiegu astrofizycznego procesu r



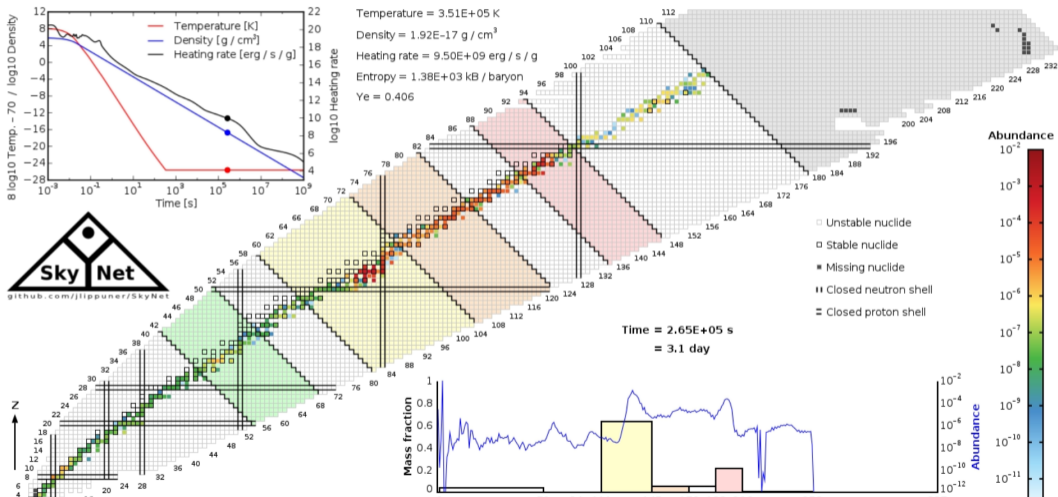
Symulacja przebiegu astrofizycznego procesu r



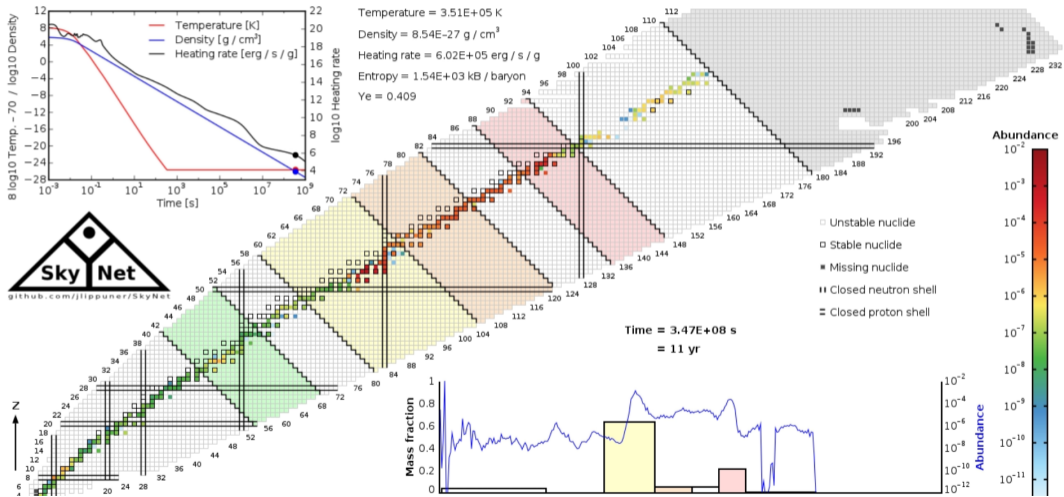
Symulacja przebiegu astrofizycznego procesu r



Symulacja przebiegu astrofizycznego procesu r



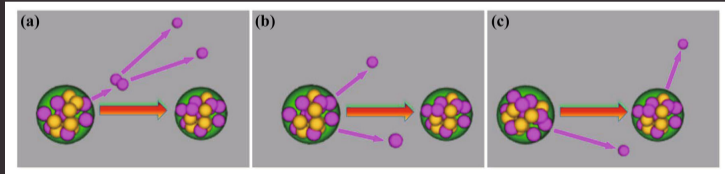
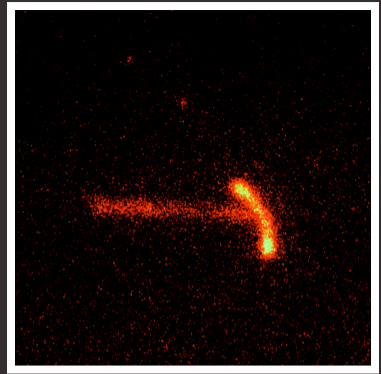
Symulacja przebiegu astrofizycznego procesu r



Symulacja przebiegu astrofizycznego procesu r

Struktura jąder atomowych:

Odkrywamy nowe rodzaje promieniotwórczości i dokumentujemy to na zdjęciach



Górny rys.: K. Miernik *et al.*, PRL 99, 192501 (2007).;

Dolny rys.: L. Zhou *et al.*, Nucl. Sci. Tech 33, 105 (2022).

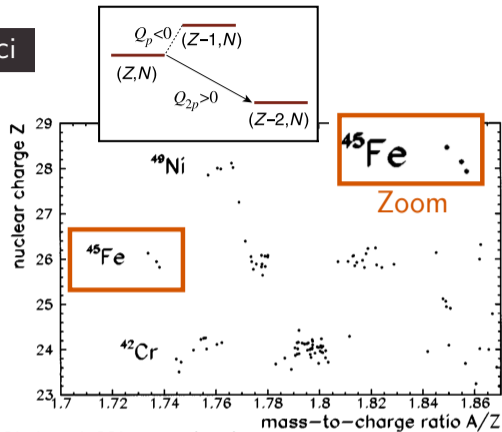
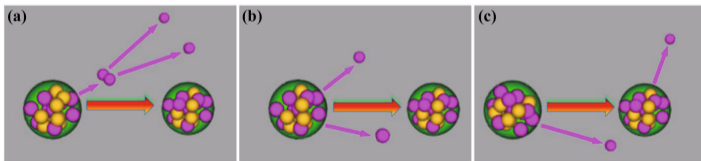
Poszukiwania nowego rodzaju promieniotwórczości

Samorzutna emisja dwóch protonów

- Przewidziana już w 1960
- Kandydaci: ekstremalnie neutronowo-deficytowi, dla których emisja $2p$ energetycznie dozwolona, ale emisja $1p$ już nie...
- Produkcja 3 jąder ^{45}Fe raportowana w 1996 (fragmentacja ^{58}N przyspieszonych do 80% c)

Mechanizmy rozpadów typu $2p$:

- protony wyrzucane jako diproton (zbliżone kąty ich emisji),*
- trójciałowy – rdzeń i dwa jednocześnie wyrzuczone protony (duże kąty pomiędzy)*
- dwuciałowy – sekwencyjna emisja $1p \times 2$*



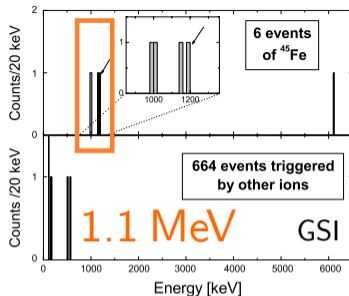
B. Blank et al., PRL 77, 2893 (1996).

Odkrycie nowego rodzaju promieniotwórczości

Samorzutna emisja dwóch protonów

Doświadczalna identyfikacja w 2002 roku

- Dokonali jej fizycy z UW (prof. M Pfützner *et al.*)
(17 maja 2002, eksperyment w GSI, 5 rozpadów ^{45}Fe)




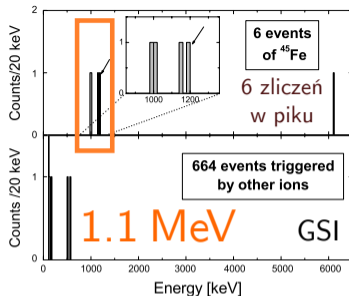
M. Pfützner et al., EPJA 14, 279 (2002).

Odkrycie nowego rodzaju promieniotwórczości

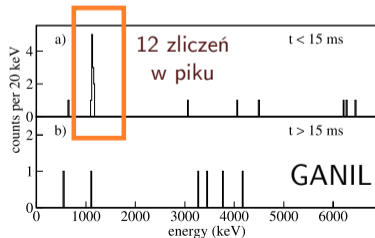
Samorzutna emisja dwóch protonów

Doświadczalna identyfikacja w 2002 roku

- Dokonali jej fizycy z UW (prof. M Pfützner *et al.*)  (17 maja 2002, eksperyment w GSI, 5 rozpadów ^{45}Fe)
- Kilka dni później, grupa kierowana przez Francuzów potwierdza odkrycie (21 maja 2002, eksperyment w GANIL, 22 rozpadów ^{45}Fe)
- Nie daje rozstrzygnięcia odnośnie mechanizmu (dwu- czy trój-ciałowy?)
 - potrzebne korelacje między emitowanymi protonami!




M. Pfützner *et al.*, EPJA 14, 279 (2002).



J. Giovinazzo *et al.*, PRL 89, 102501 (2002).

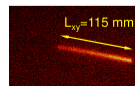
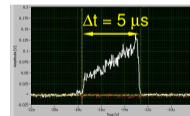
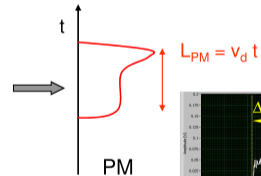
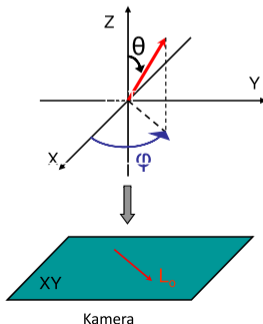
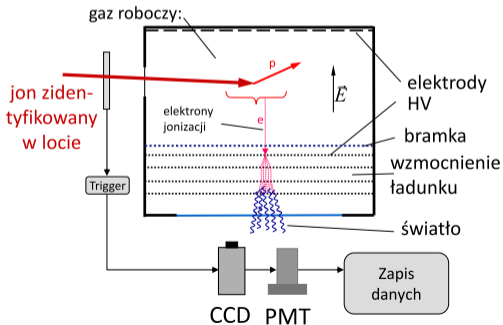
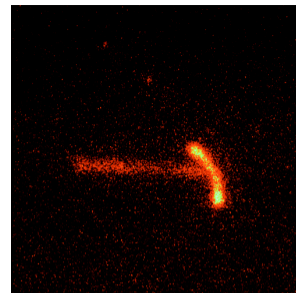
Rozstrzygnięcie przynosi zdjęcie!

Gdzie? NSCL, Michigan State University, USA (2007)

Kto? Fizycy z UW  *et al.*

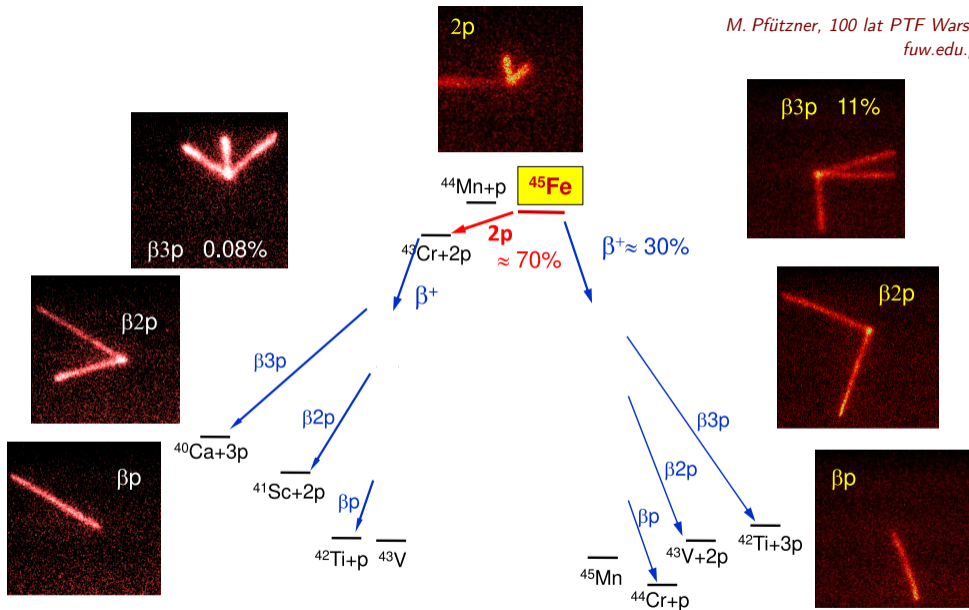
Co? $^{58}\text{Ni} @ 161 \text{ MeV/u} + \text{natNi} \rightarrow ^{45}\text{Fe}$

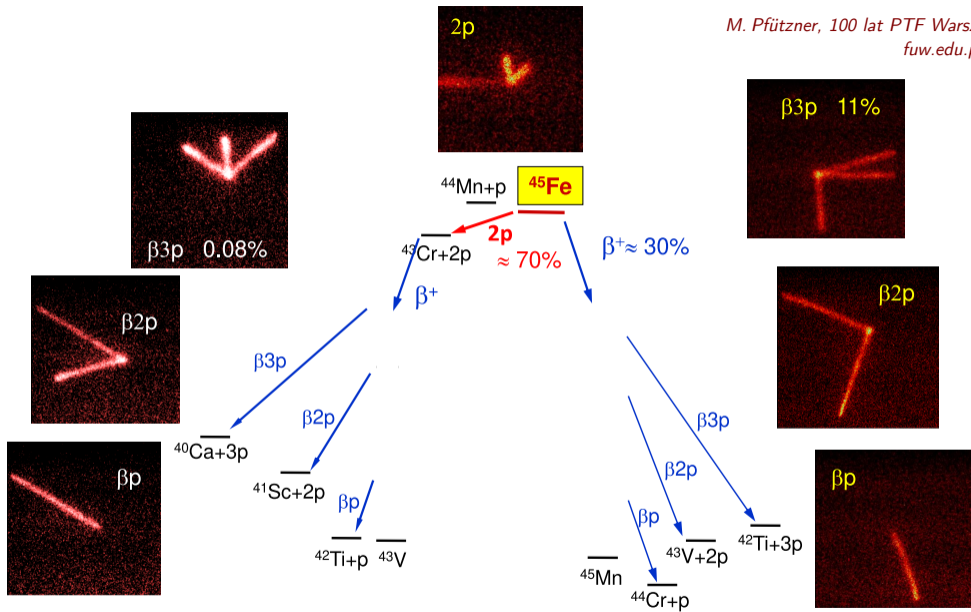
Czym? Detektor gazowy z odczytem optycznym (Warszawska OTPC)



K. Miernik *et al.*, PRL 99, 192501 (2007).

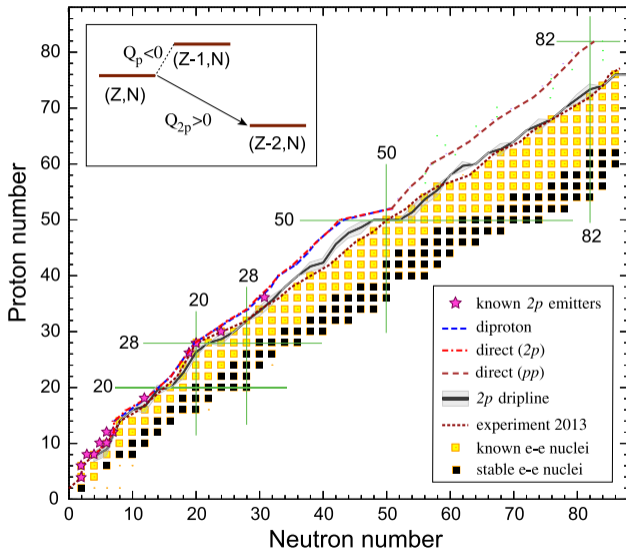
M. Pfützner, 100 lat PTF, Warszawa (2020).
fuw.edu.pl/~pftzner/





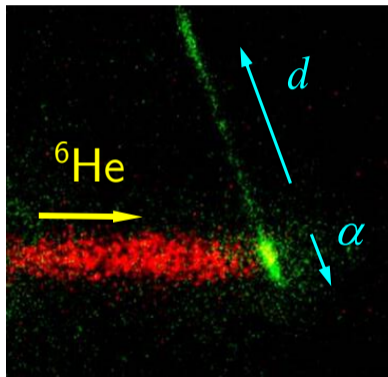
Progres w badaniu promieniotwórczości $2p$

... Nuklidy w zasięgu badań eksperymentalnych



Warszawska OTPC fotografowała także w CERN-ISOLDE

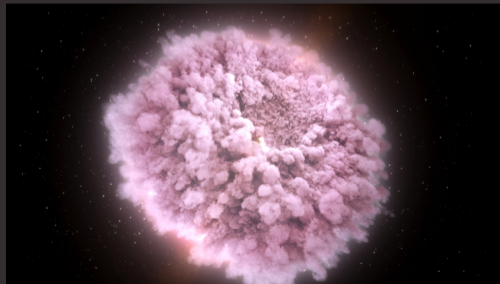
- ▶ Robiła zdjęcia rozpadom ${}^6\text{He}$ (nie tylko)
- ▶ Podsumowanie pobytu w celu fotografowania ${}^6\text{He}$:
 - 106 godzin pracy
 - 32 000 zdarzeń do analizy
(większość zawierała cząstki α emitowane przez radionuklidy z otoczenia)
 - 2 000 „kandydatów” na rozpad ${}^6\text{He} \rightarrow \alpha + d$, dla nich procedura rekonstrukcji zdarzeń,
 - zrekonstruowano 1800 rozpadów: wyznaczono ich energie oraz kąty emisji!



Rozpad β ${}^6\text{He}$ z emisją $d + \alpha$ (widoczny na fotografii)
zachodzi z prawdopodobieństwem $\approx 10^{-6}$!

Astrofizyka jądrowa:

Próbujemy dowiedzieć się czegoś
o gwiazdach neutronowych
muskając nuklidy za ich skórkę



Górny rys.: energy.gov/science/np/articles/clues-neutron-stars-scientists-probe-lead-nucleis-thin-neutron-skin;

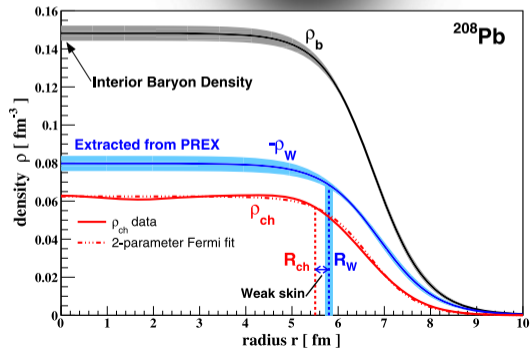
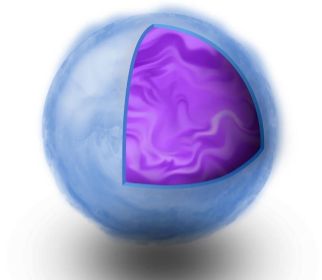
Dolny rys.: „The hot, dense cloud of debris from the neutron stars produced the kilonova’s visible and infrared light.” [svs.gsfc.nasa.gov/12949]

Cięższe nuklidy mają nadwyżkę neutronów

Rozważmy stabilny ^{208}Pb ($Z = 82$, $N = 126$)

- Gdzie są upakowane 44 nadmiarowe neutrony?
- Tworzą zewnętrzną „skórkę” otaczającą rdzeń
 $R_n - R_p = 0.283 \pm 0.071$ fm (średnica atomu ≈ 100 pm)
- Zmierzenie rozkładu neutronów wyzwaniem!
Protony mają ładunek, więc łatwiej...

Eksperyment eksploatował łamanie parzystości w elastycznym rozpraszaniu spolaryzowanych elektronów na ^{208}Pb (dla neutronów wymiana bozonów Z^0 ; asymetria ujawnia rozkład neutronów)

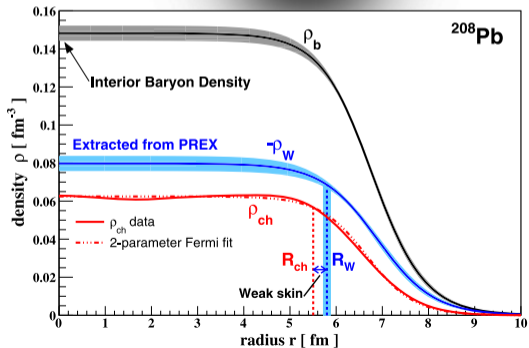
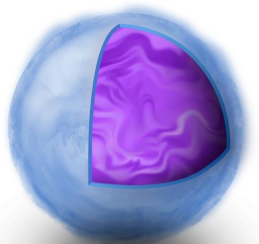


Cięższe nuklidy mają nadwyżkę neutronów

Rozważmy stabilny ^{208}Pb ($Z = 82$, $N = 126$)

- Gdzie są upakowane 44 nadmiarowe neutrony?
- Tworzą zewnętrzną „skórkę” otaczającą rdzeń
 $R_n - R_p = 0.283 \pm 0.071$ fm (średnica atomu ≈ 100 pm)
- Zmierzenie rozkładu neutronów wyzwaniem!
Protony mają ładunek, więc łatwiej...

*Eksperyment eksploatował łamanie parzystości
w elastycznym rozpraszaniu spolaryzowanych elektronów
na ^{208}Pb (dla neutronów wymiana bozonów Z^0 ;
asymetria ujawnia rozkład neutronów)*

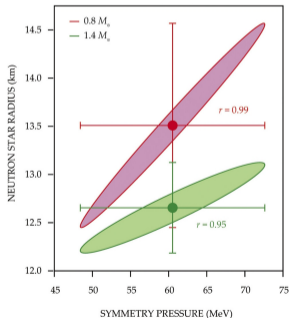
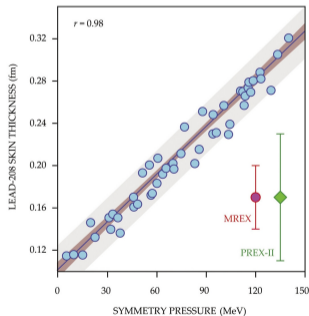
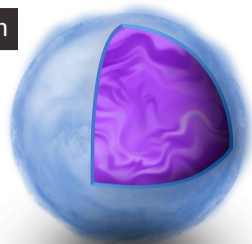


Skórka w stabilnym nuklidzie ujawnia strukturę gwiazd neutronowych

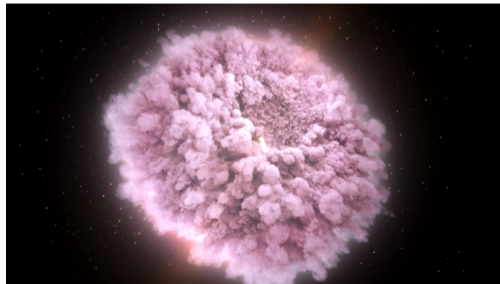
- Skórka w ^{208}Pb grubsza niż sądzono... Jaka gęstość nukleonów?

$$\rho_W^0 = -0.0796 \pm 0.0036(\text{exp}) \pm 0.0013(\text{th}) \text{ fm}^{-3}$$

- Rozkład neutronów w jądrze atomowym ($\approx \text{fm}$)
versus struktura gwiazd neutronowych ($\approx \text{km}$)



*Grubsza skórka neutronowa w ^{208}Pb
sugeruje większe promienie gwiazd neutronowych*



Mimo olbrzymiego postępu w technice eksperymentalnej i możliwościach komputerowych, szereg podstawowych pytań pozostaje bez odpowiedzi.

Jakie są granice występowania jąder atomowych?

Jak siły jądrowe zależą od stosunku Z/N ?

Jak zjawiska kolektywne w jądrze wyjaśnić na gruncie ruchu indywidualnych nukleonów?

Czy możliwy jest opis wszystkich jąder poprzez strukturę powłokową i jak struktura powłokowa zmienia się w obszarze mapy nuklidów?

Jak opisać wzbudzenia jąder?

Jakie kształty mogą przyjmować jądra?

Czy halo neutronowe i skóra neutronowa występują na całym obszarze mapy nuklidów?

Obecnie, do poszukiwania odpowiedzi na te pytania, do dyspozycji jest 3338 indywidualnych laboratoriów (i ta liczba wciąż rośnie).