



**Wyddział
Fizyki**

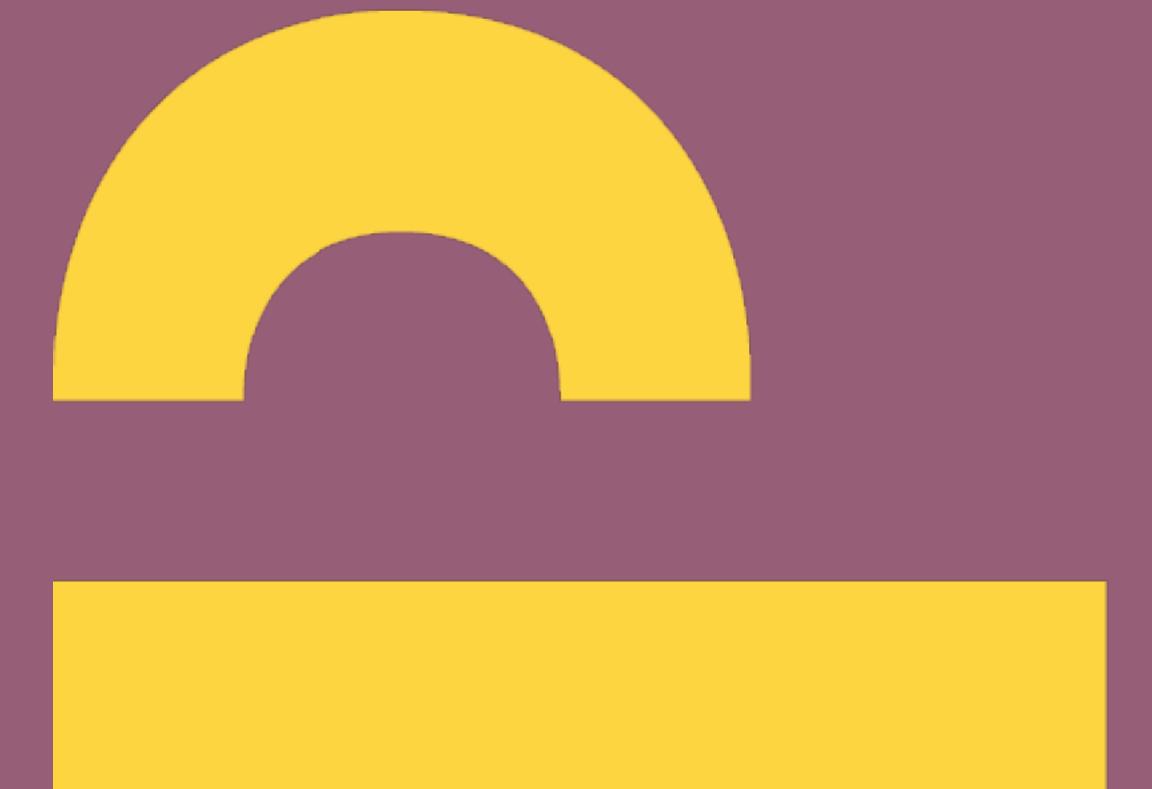
POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Skupianie wysokoenergetycznej wiązki elektronowej przy użyciu kryształów do celów radioterapii – studium wykonalności

Marta Monikowska

Promotor: dr inż. Marcin Patecki

**Politechnika
Warszawska**



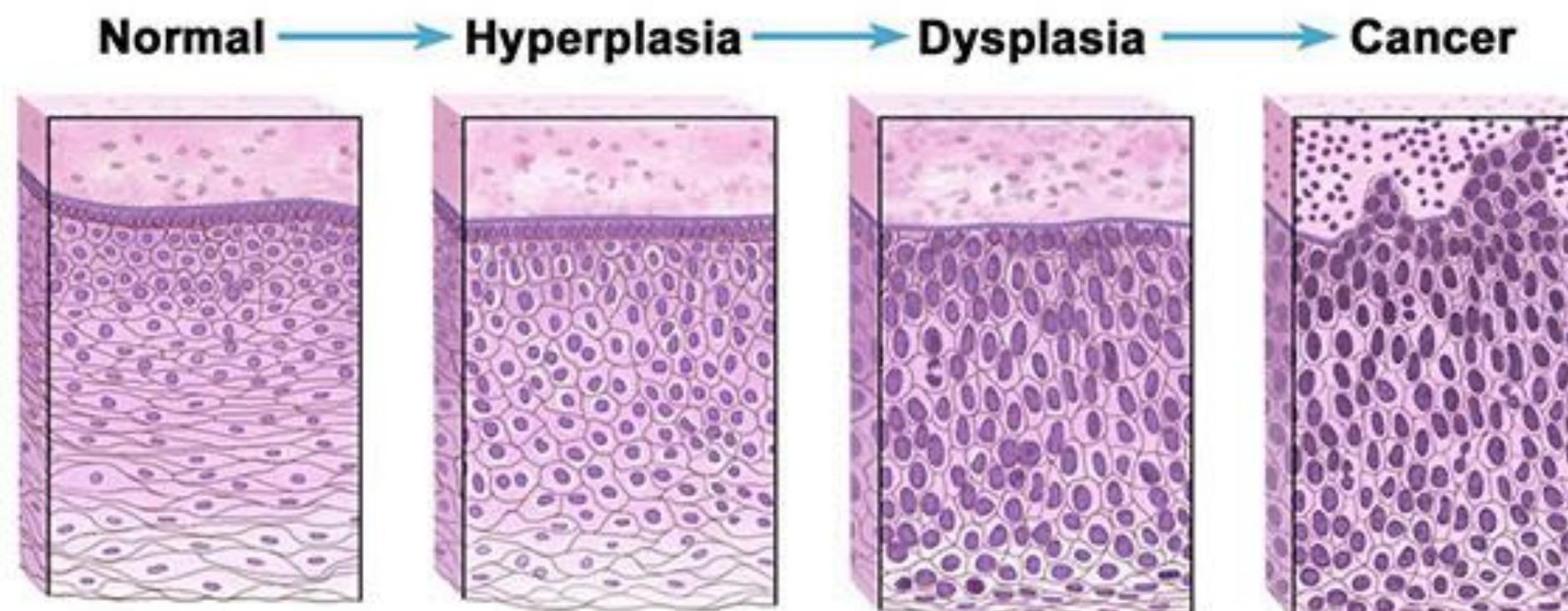
Plan prezentacji:

1. Wprowadzenie
2. Cel pracy
3. Moja motywacja
4. Zjawisko channelowania w kryształach
5. Środowisko programistyczne
6. Aktualny stan pracy
7. Dalsze plany

Nowotwory

Nowotwór jest chorobą materiału genetycznego.

Powstaje na skutek przekształcenia się normalnych, prawidłowych komórek ustroju w komórki nienormalne, czyli nowotworowe.



Rysunek 1. Rozwój nowotworu [1]

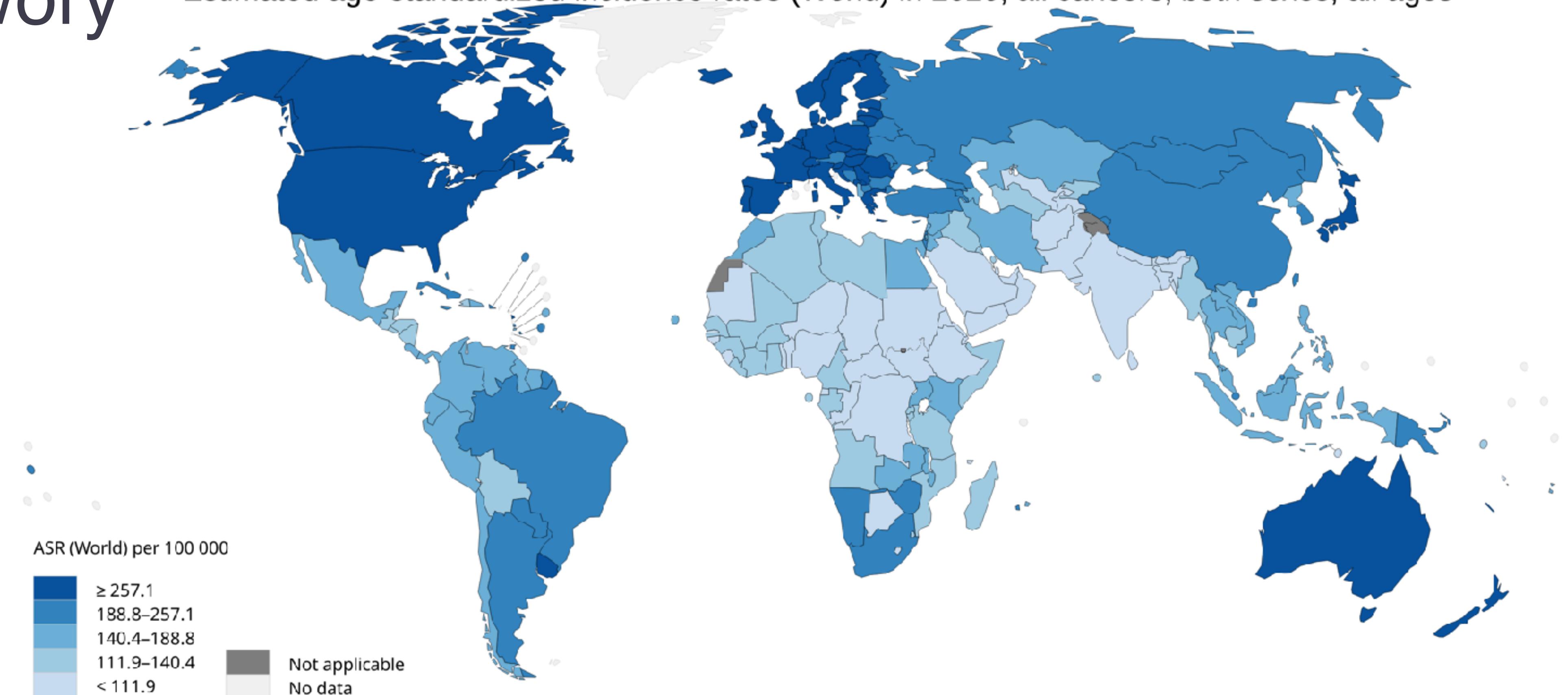
© 2014 Terese Winslow LLC
U.S. Govt. has certain rights



Rysunek 2. Najczęstsze nowotwory złośliwe [2]

Nowotwory

Estimated age-standardized incidence rates (World) in 2020, all cancers, both sexes, all ages



All rights reserved. The designations employed and the presentation of the material in this publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the World Health Organization / International Agency for Research on Cancer concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries. Dotted and dashed lines on maps represent approximate borderlines for which there may not yet be full agreement.

Data source: GLOBOCAN 2020
Map production: IARC
(<http://gco.iarc.fr/today>)
World Health Organization



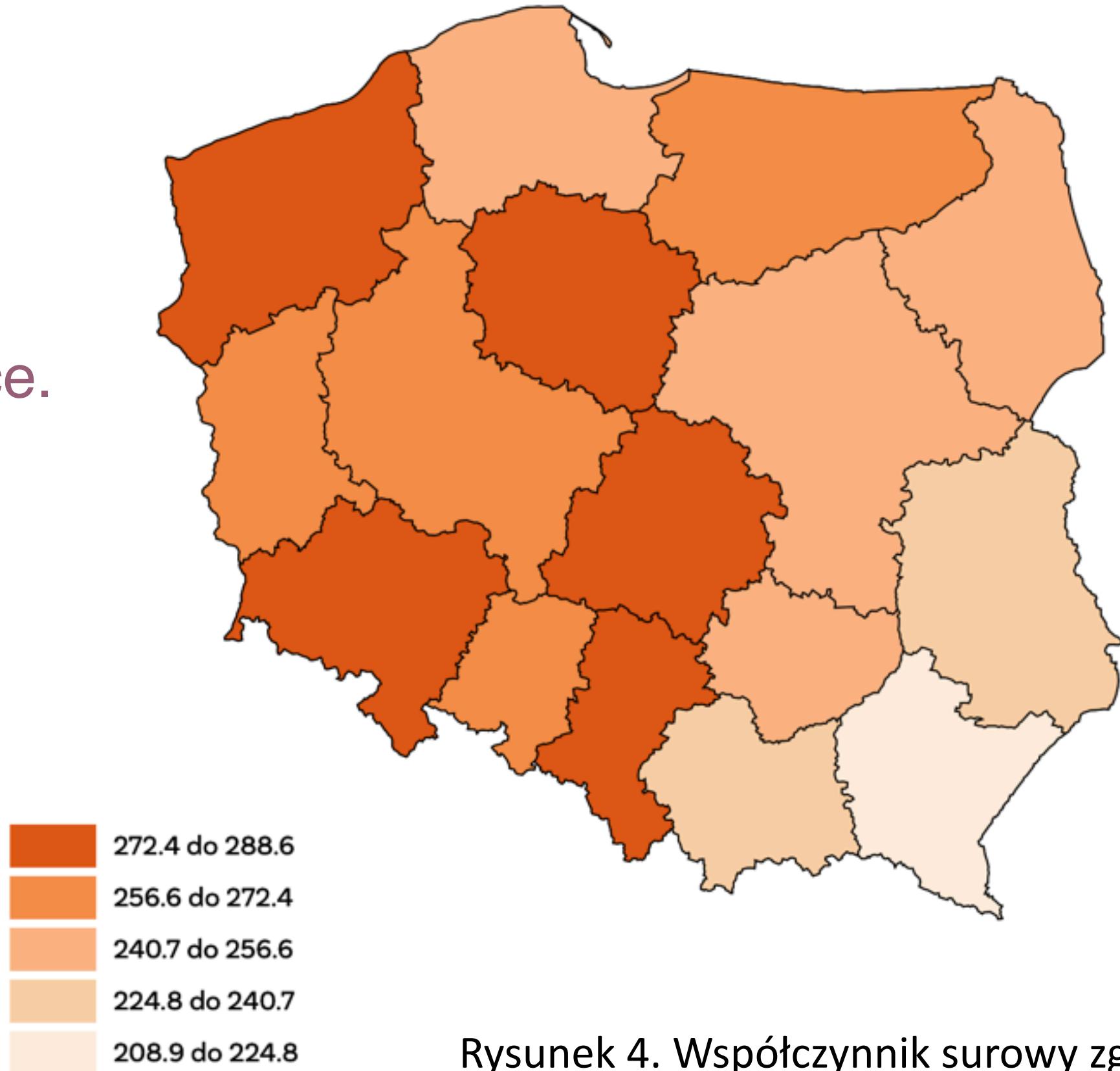
© International Agency for Research on Cancer 2020
All rights reserved

Nowotwory

Nowotwory złośliwe stanowią drugą przyczynę zgonów w Polsce.

W 2019 roku w Polsce w.g. Krajowego Rejestru Nowotworów:

- 171,2 tys. nowych zachorowań;
- 100,3 tys. zgonów z ich powodu. [2]



Rysunek 4. Współczynnik surowy zgonów [2]

100 tys.

to liczba zgonów rocznie
z powodu chorób
nowotworowych

1,17 mln

Polaków żyje z chorobą
nowotworową

440

osób na każde 100 tys
ma zdiagnozowany
nowotwór

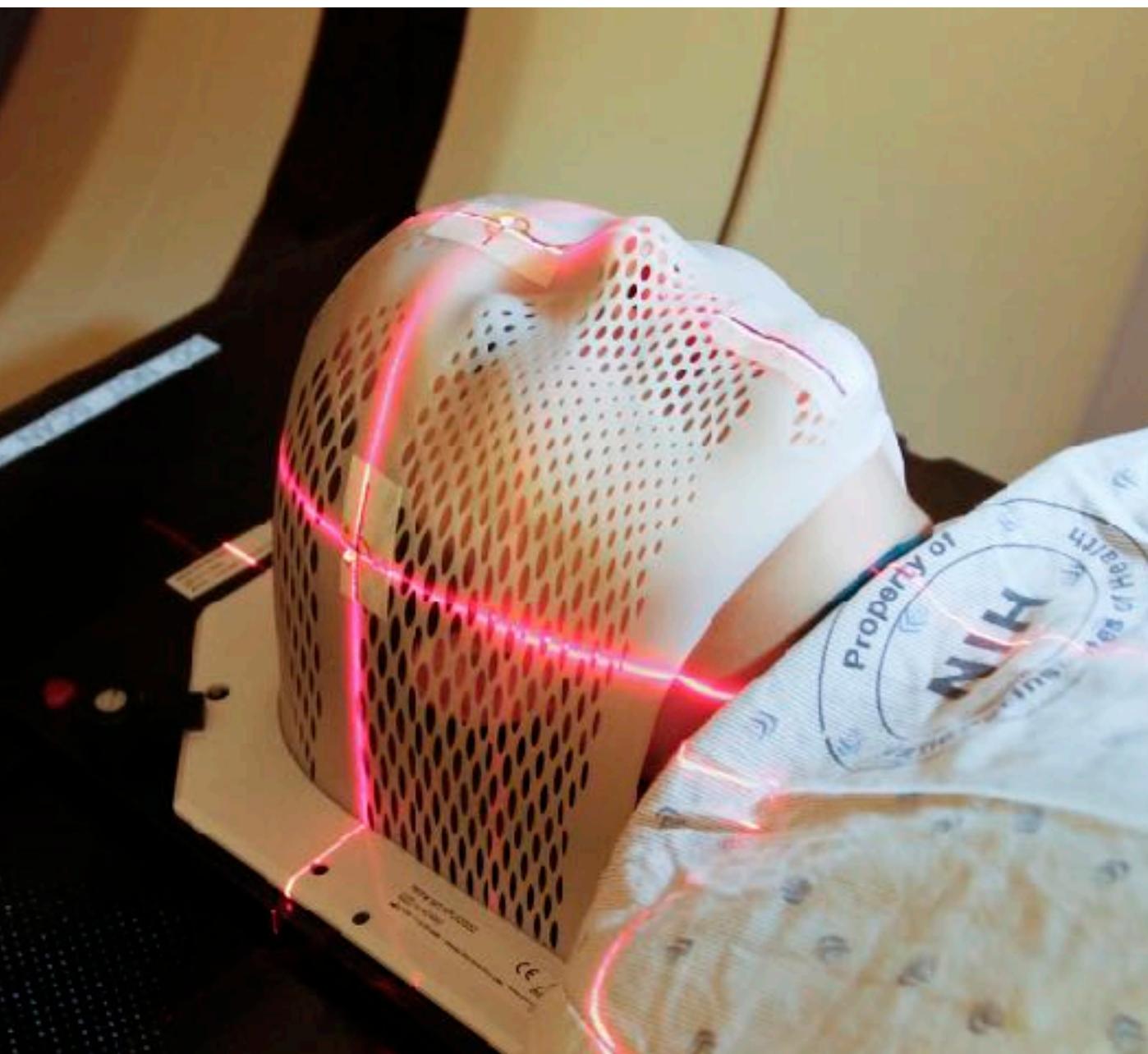
25%

Nowotwory są
przyczyną ponad 25%
zgonów w Polsce

Nowotwory

Najpopularniejsze metody leczenia nowotworów:

- Operacje 45%;
- Chemiczna terapia 28%;
- Radioterapia 27% [4].



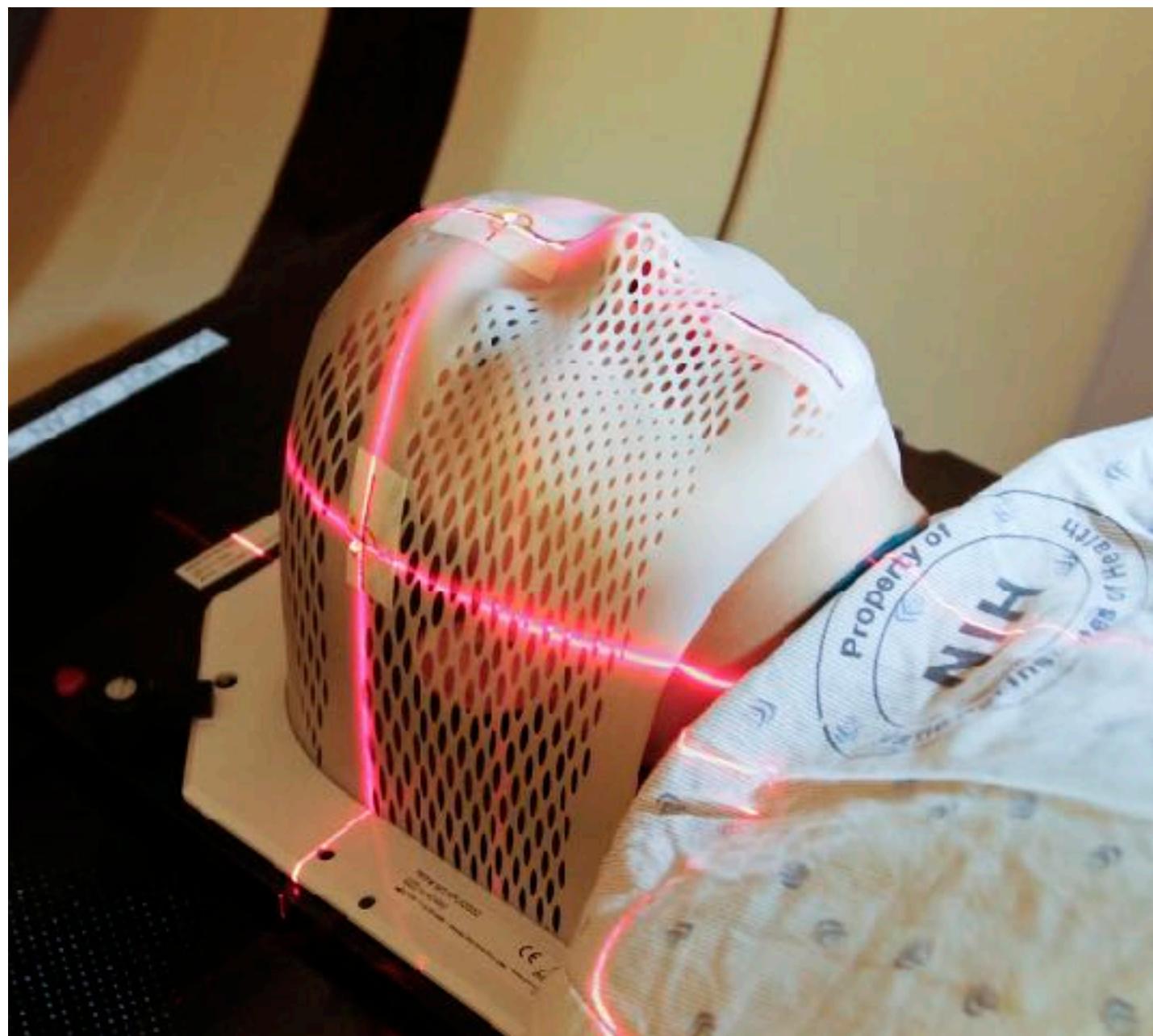
Rysunek 5. Radioterapia, operacja, chemiczna terapia - obrazy poglądowe [5]

Radioterapia

Metoda leczenia nowotworów wykorzystująca promieniowanie jonizujące.

Najczęściej stosowane metody radioterapii:

- Teleradioterapia - leczenie wiązkami zewnętrznymi;
- Brachyterapia - umieszczanie źródeł promieniotwórczych w obrębie guza nowotworowego lub jego sąsiedztwie.

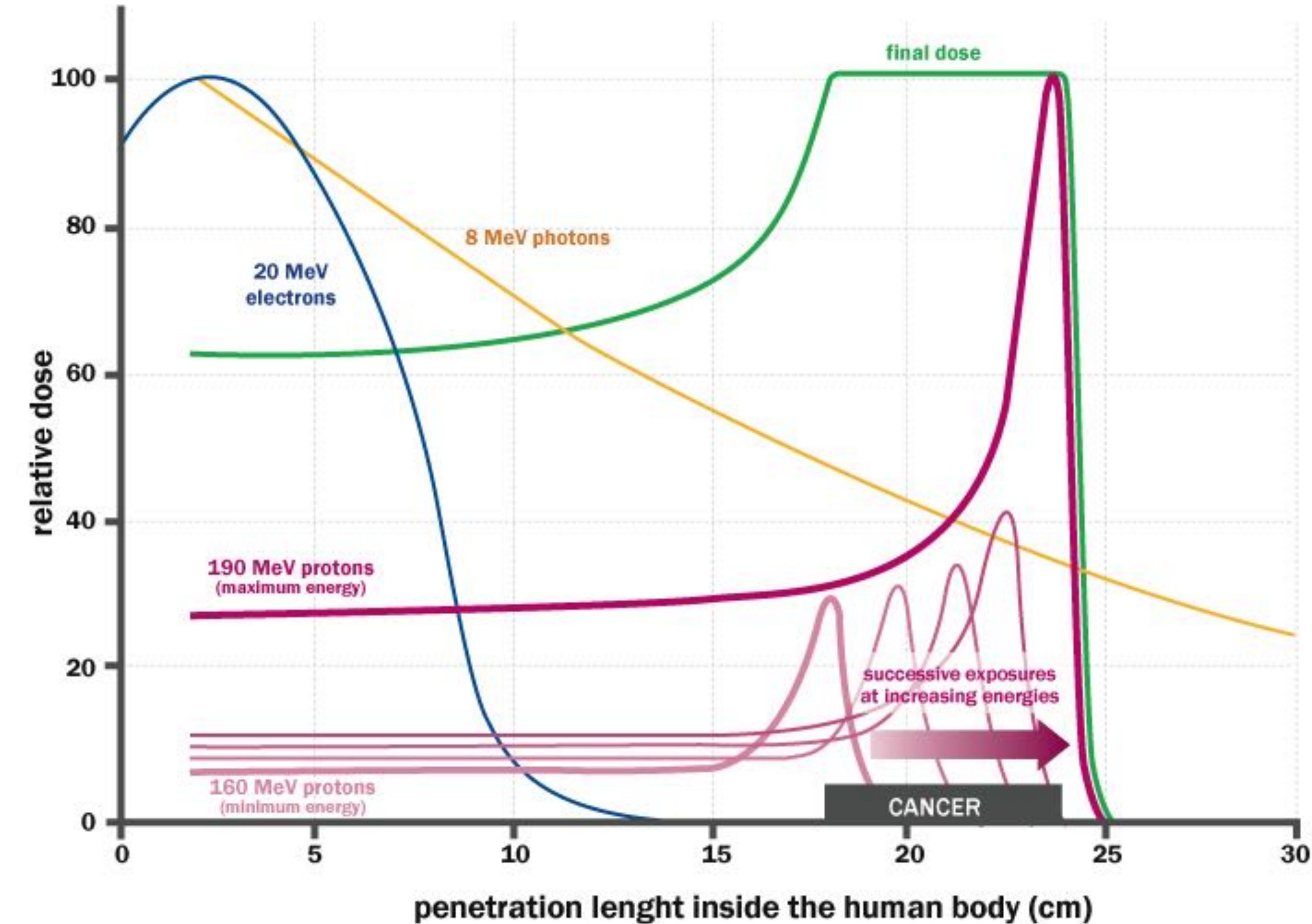
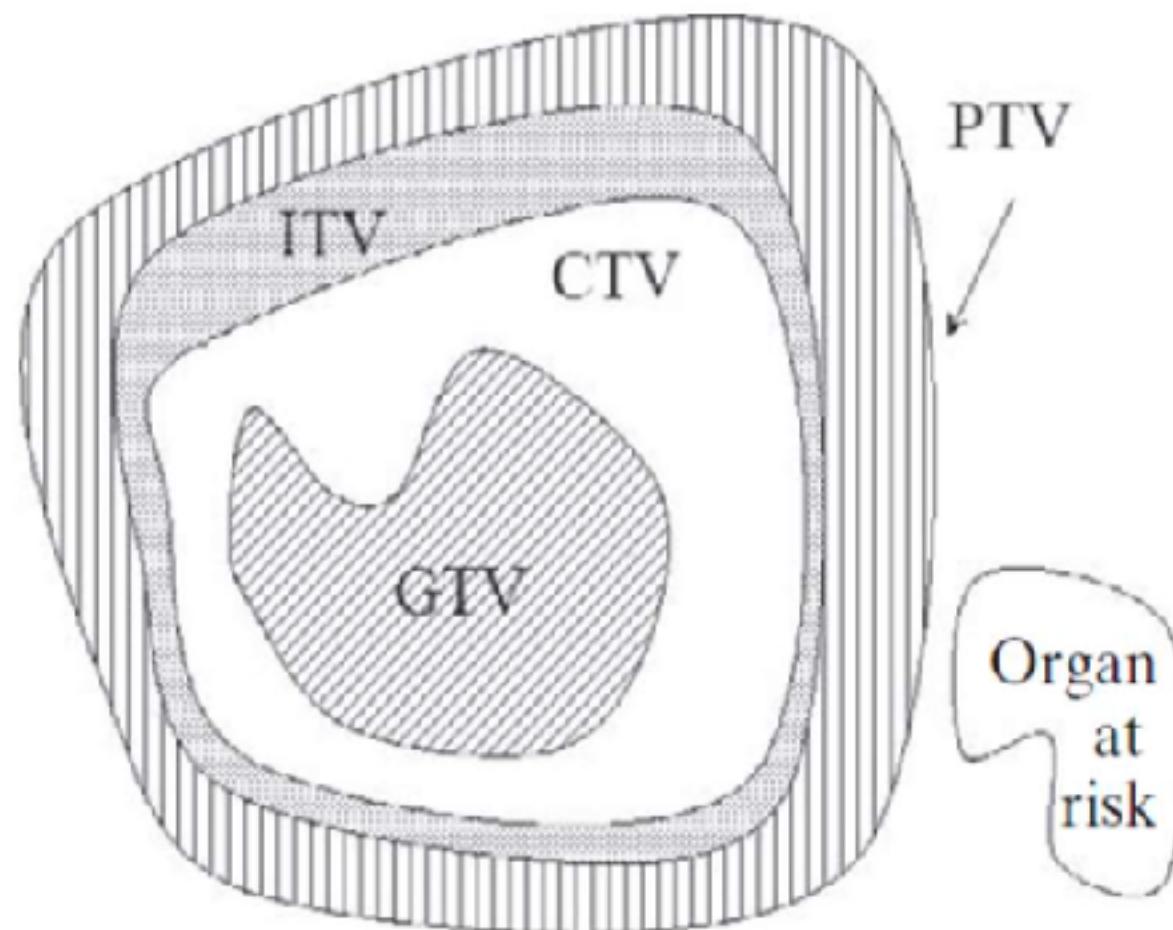


Rysunek 6. Radioterapia - obraz poglądowy [5]

Radioterapia

Najczęściej stosowane wiązki:

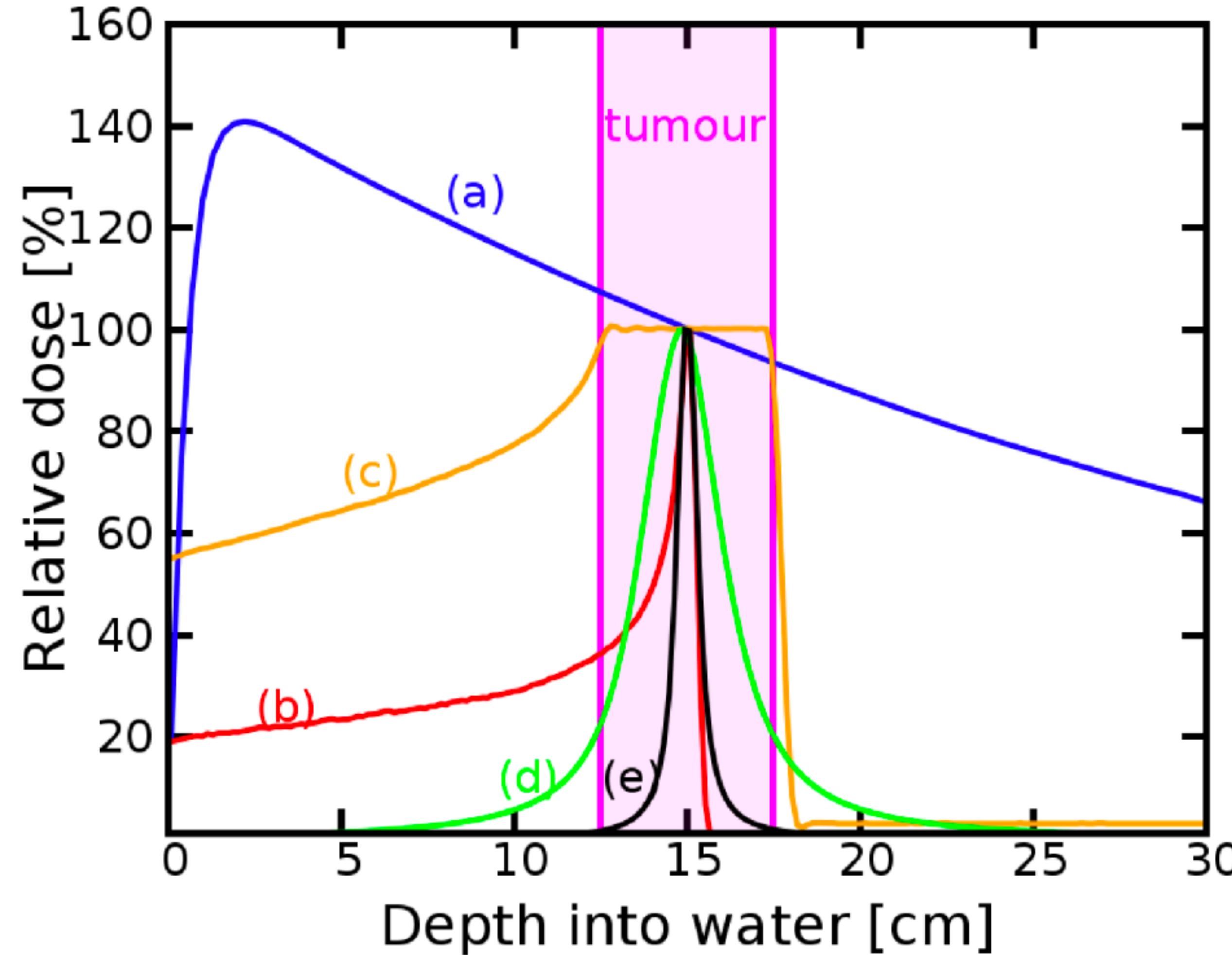
- Fotonowe;
- Hadronowe;
- Elektronowe.



Rysunek 8. Wykres rozchodzenia się dawki pochłoniętej w zależności od rodzaju cząstki i jej energii. [7]

Radioterapia

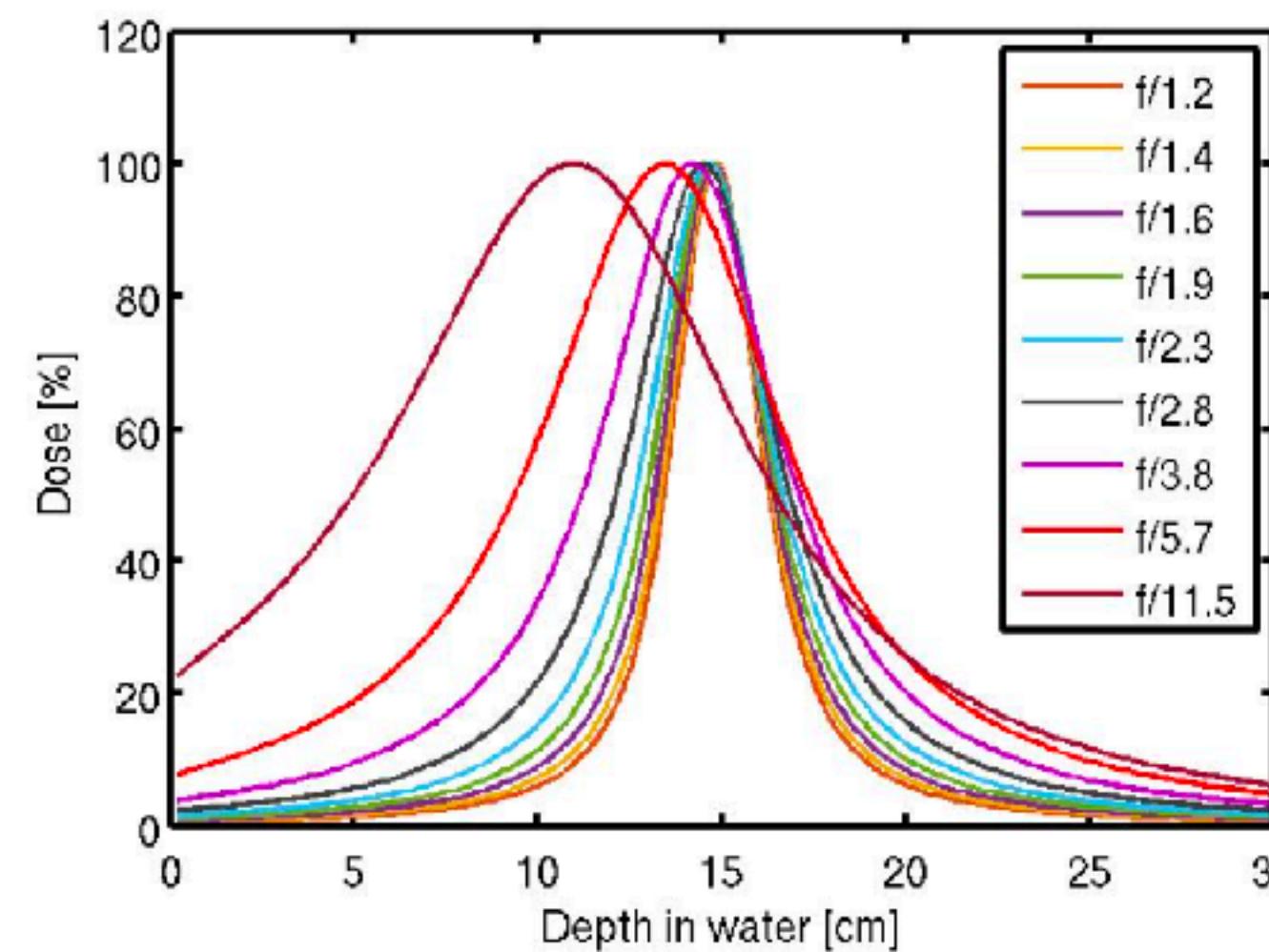
Wysokoenergetyczna wiązka elektronów na tle innych rodzajów radiacji w fantomie wodnym.



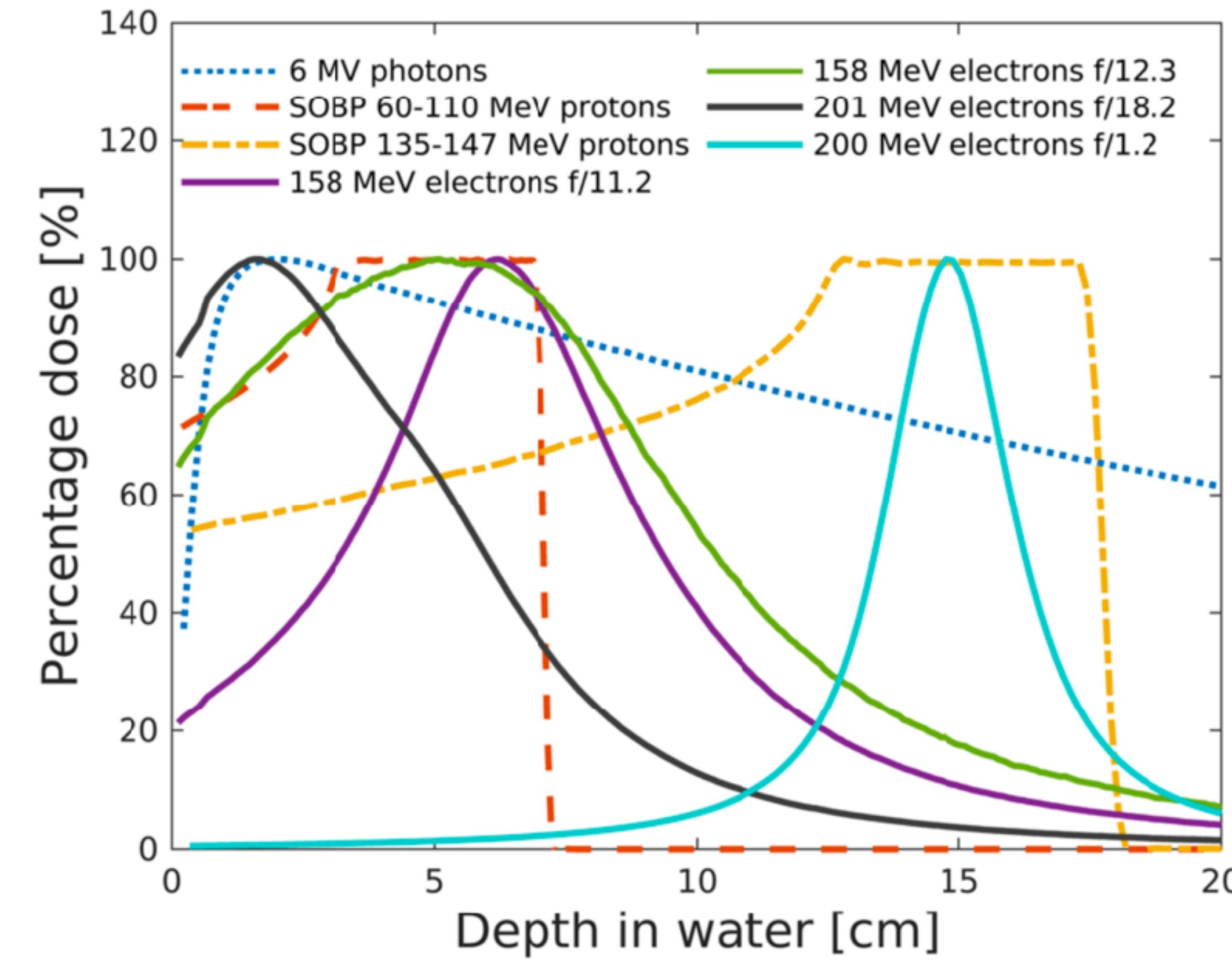
Rysunek 9. Wykres rozchodzenia się dawki pochłoniętej w zależności od rodzaju cząstki i jej energii, gdzie (a) fotony 6 MeV; (b) pik Bragga dla protonów o energii 148 MeV; (c) pik Bragga; (d) elektryny 200 MeV; (e) elektryny 2 GeV. [8]

Radioterapia

Wysokoenergetyczna wiązka elektronów na tle innych rodzajów radiacji w fantomie wodnym.



Rysunek 10. Wykres rozchodzenia się dawki pochłoniętej w fantomie wodnym dla wiązki elektronów o energii (a) 200 MeV w zależności od f/1.2-f/11.5. [8]

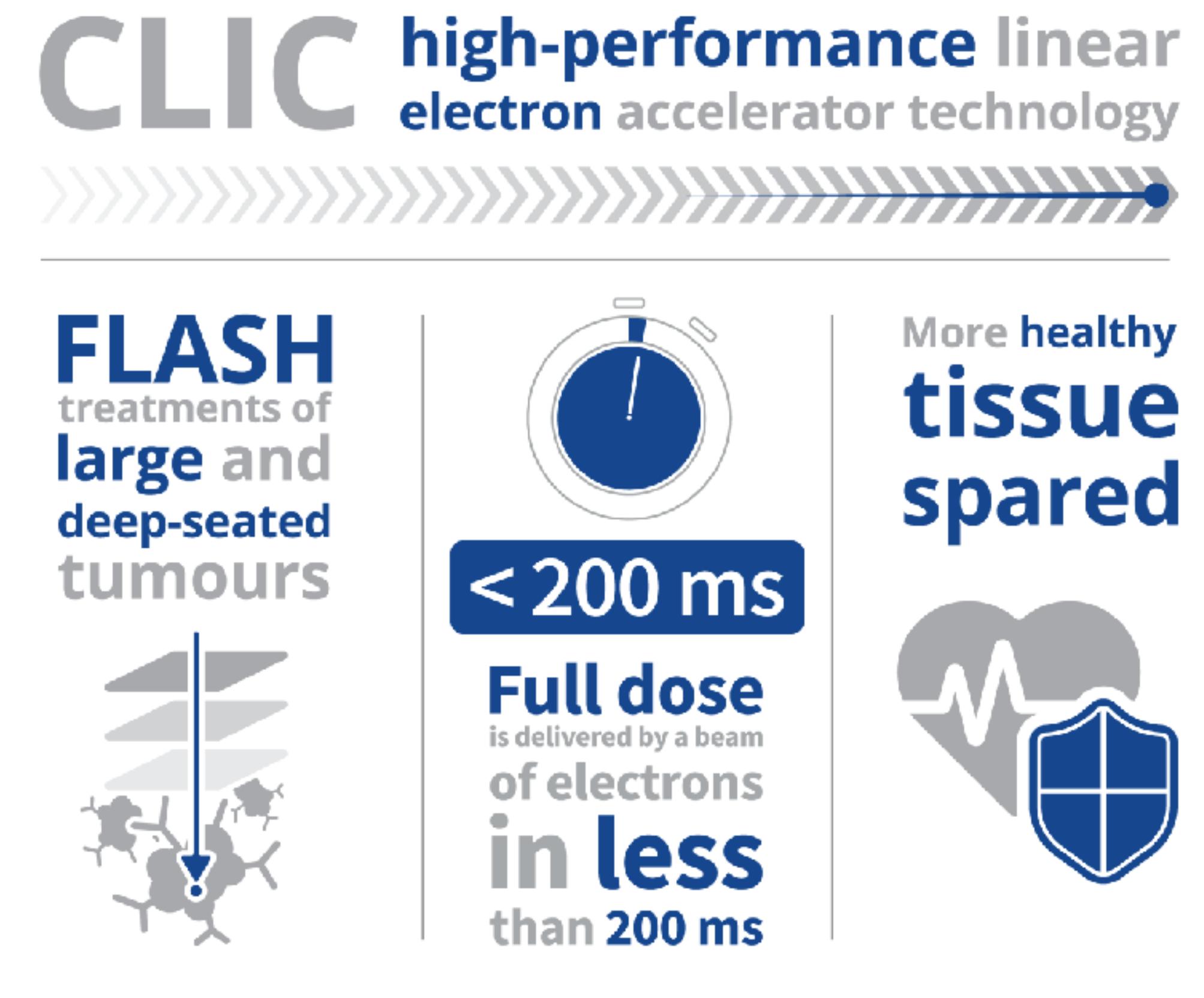


Rysunek 11. Wykres rozchodzenia się dawki pochłoniętej w fantomie wodnym dla różnych wiązek. [8]

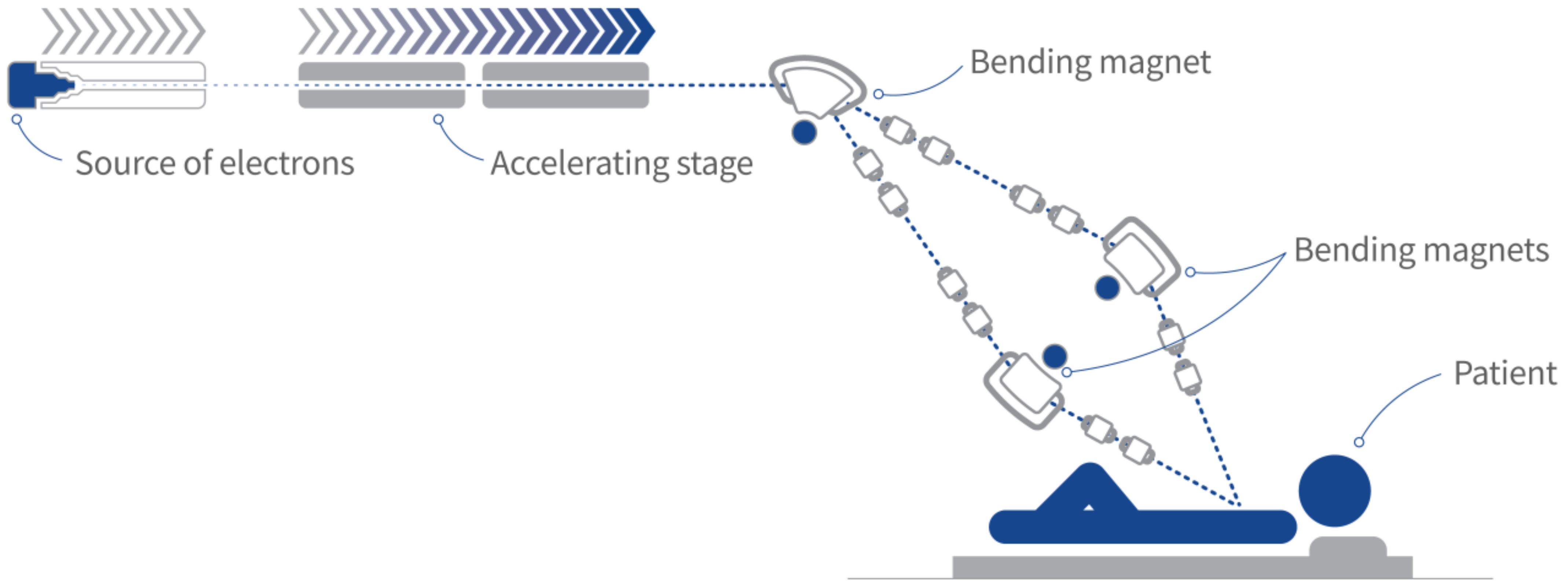
Radioterapia FLASH

Współpraca CERNu, Szpitala CHUV w Lozannie oraz THERYQ (grupy ALCEN).

- Wiązki elektronów o energiach 100 - 200 MeV;
- Radioterapia nowotworów znajdujących się na głębokości do 20 cm;
- Rozwiązanie bardziej przystępne cenowo niż terapia protonowa;
- Szybkość, dostarczanie pełnej dawki w mniej niż 200 ms;
- Większa ochrona zdrowych tkanek;
- Pierwsze testy kliniczne są przewidziane na 2025 rok. [10]



Radioterapia FLASH

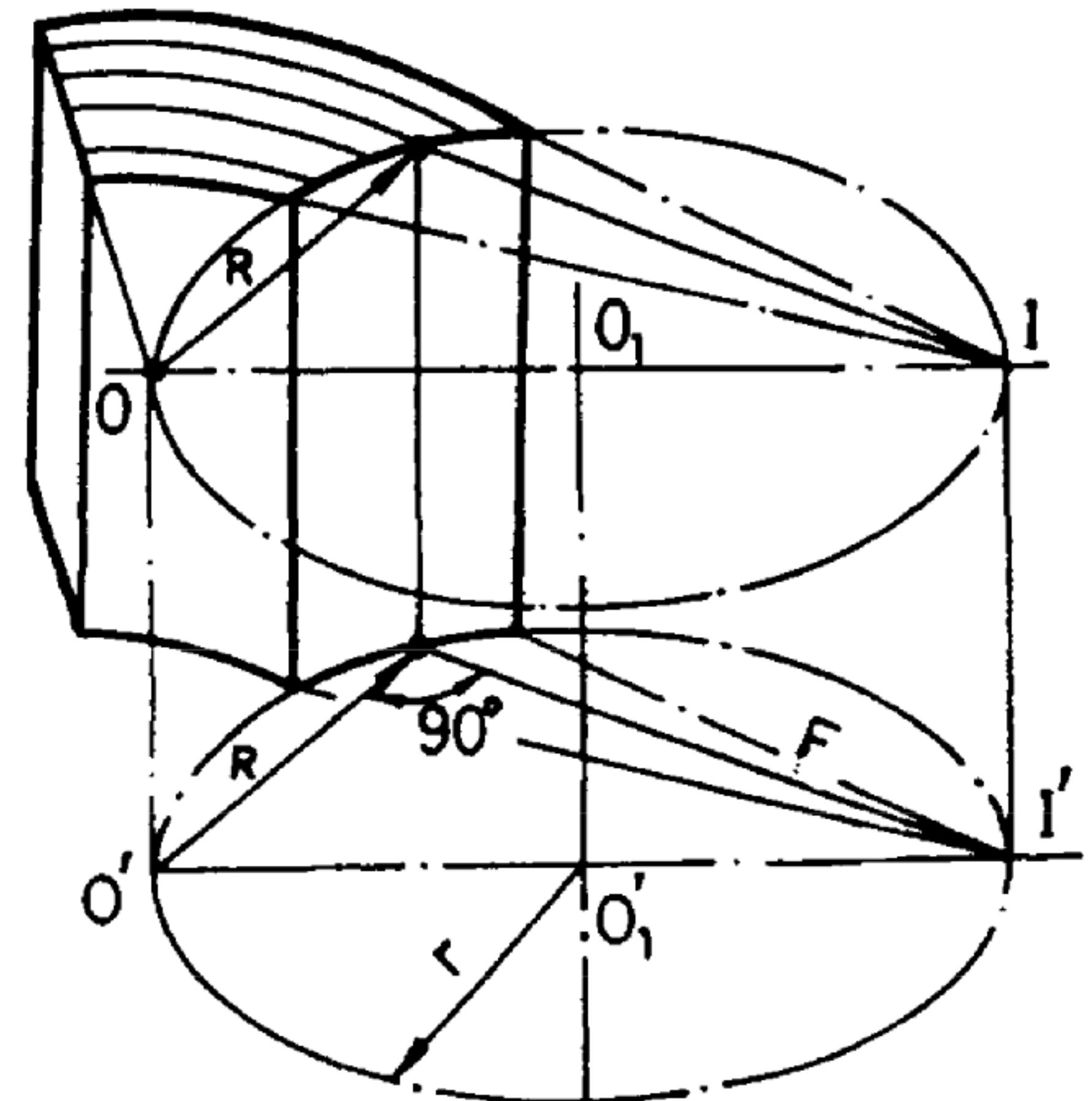


Rysunek 13. Schemat radioterapii FLASH [9]

Cel pracy

Studium wykonalności skupiania wysokoenergetycznej wiązki elektronowej przy użyciu kryształów do celów radioterapii.

1. Zapoznanie się z literaturą i podstawami fizycznymi omawianych procesów.
2. Określenie parametrów soczewki wykonanej z kryształu krzemu.
3. Analiza możliwości wykonania soczewki z innego materiału.
4. Symulacja numeryczna skupienia wiązki elektronów przy użyciu zaproponowanej soczewki w środowisku Geant4.



Rysunek 14. Kształt wiązki elektronów po przejściu przez kryształ [11]



**Wydział
Fizyki**

POLITECHNIKA WARSZAWSKA



Moja motywacja

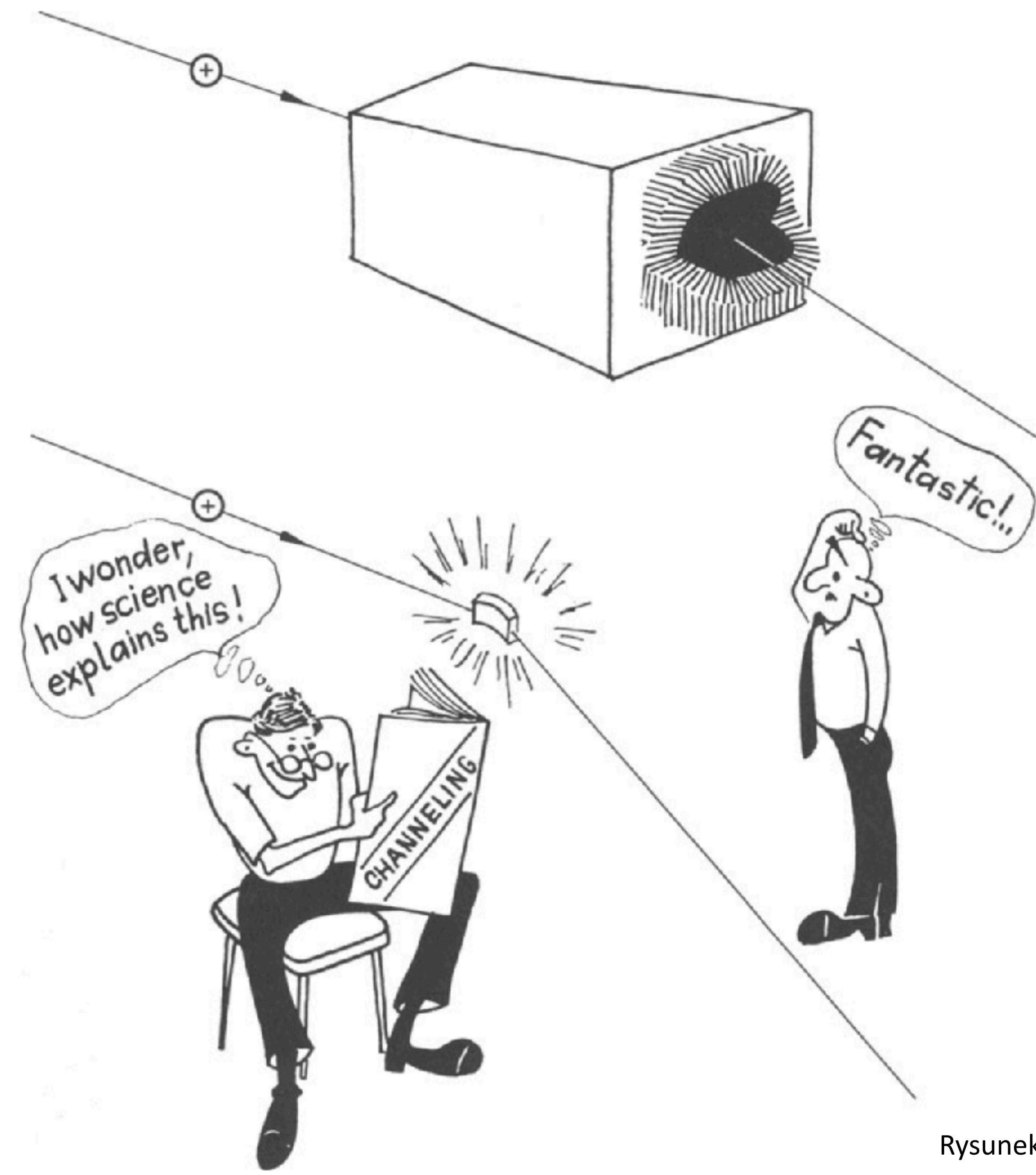


**Politechnika
Warszawska**

Channeling

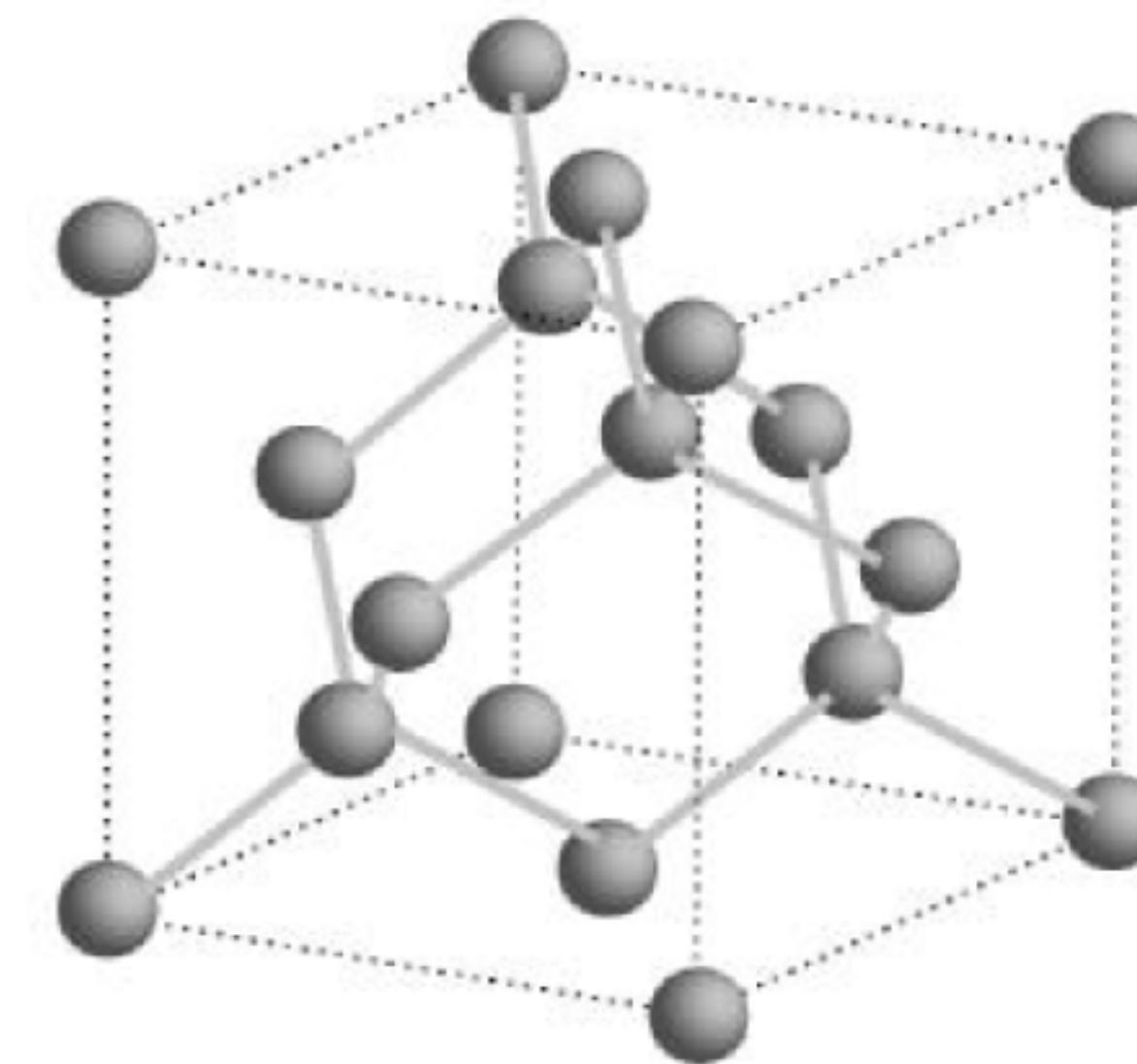
Magnes waga ~ kilkadziesiąt kg

Kryształ waga ~ kilka g

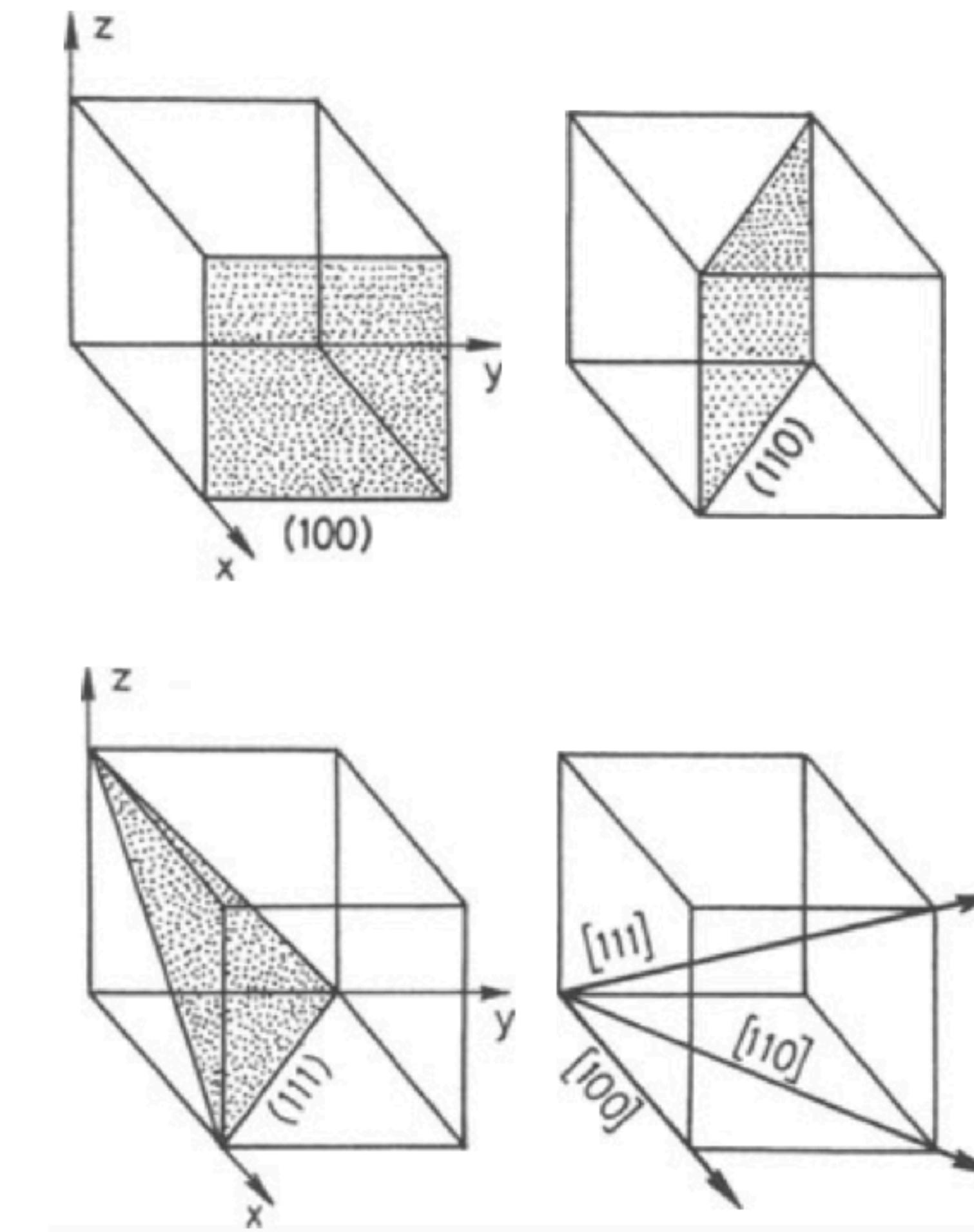


Channeling

Kryształy posiadają sieci i płaszczyzny krystaliczne.



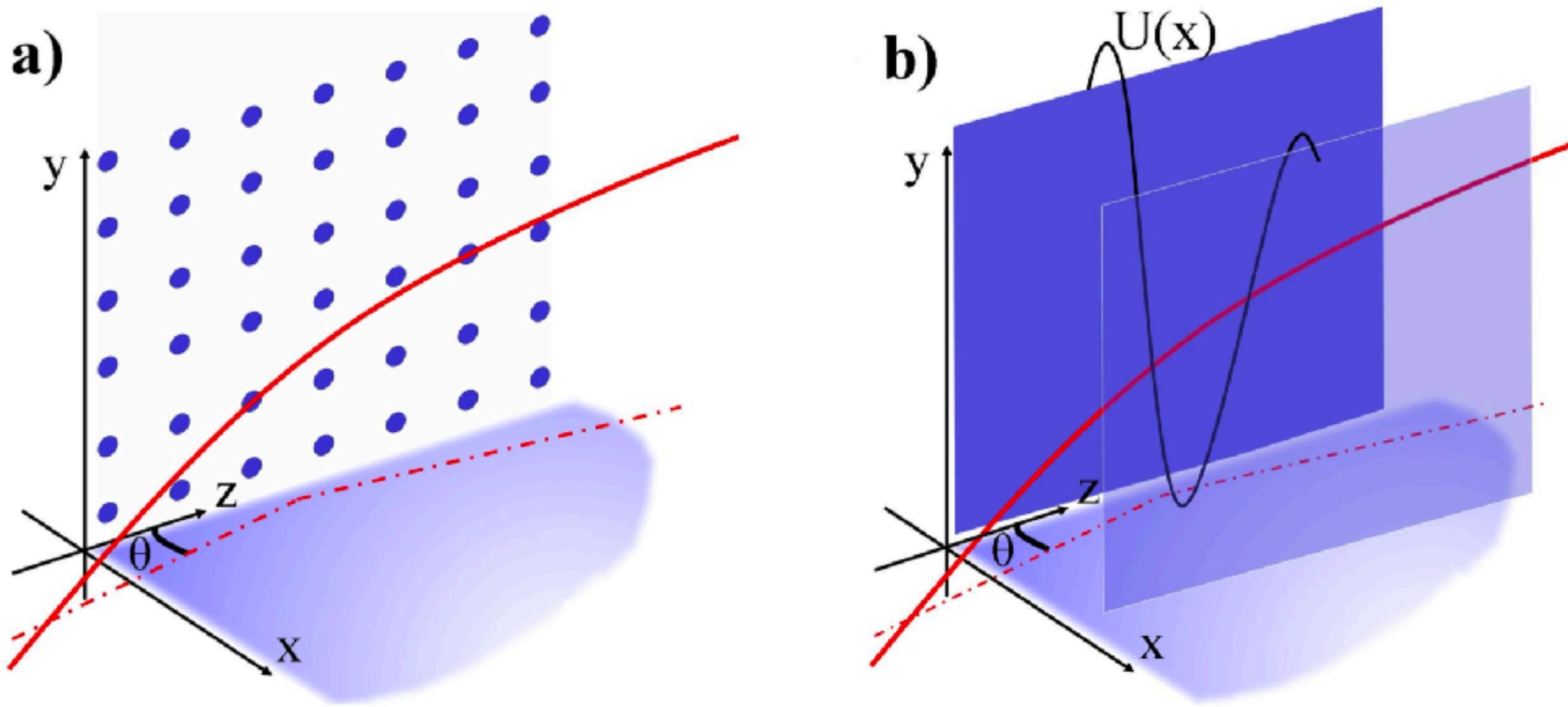
Rysunek 16. Sieć krystaliczna FCC [13]



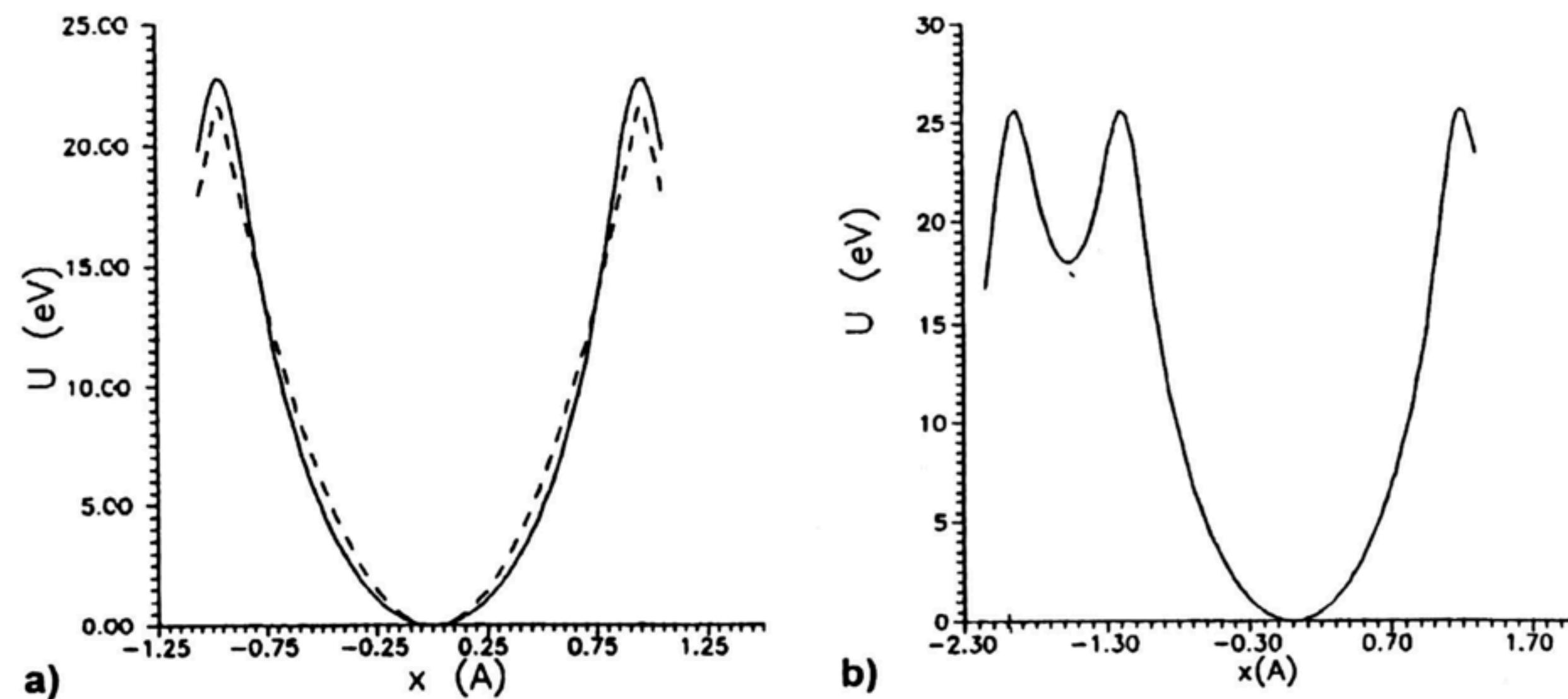
Rysunek 17. Główne płaszczyzny i osie krystalicznej sieci sześcienniej. [12]

Channeling

Prosty kryształ.



Rysunek 18. Graficzna ilustracja koncepcji channelingu planarnego. [13]

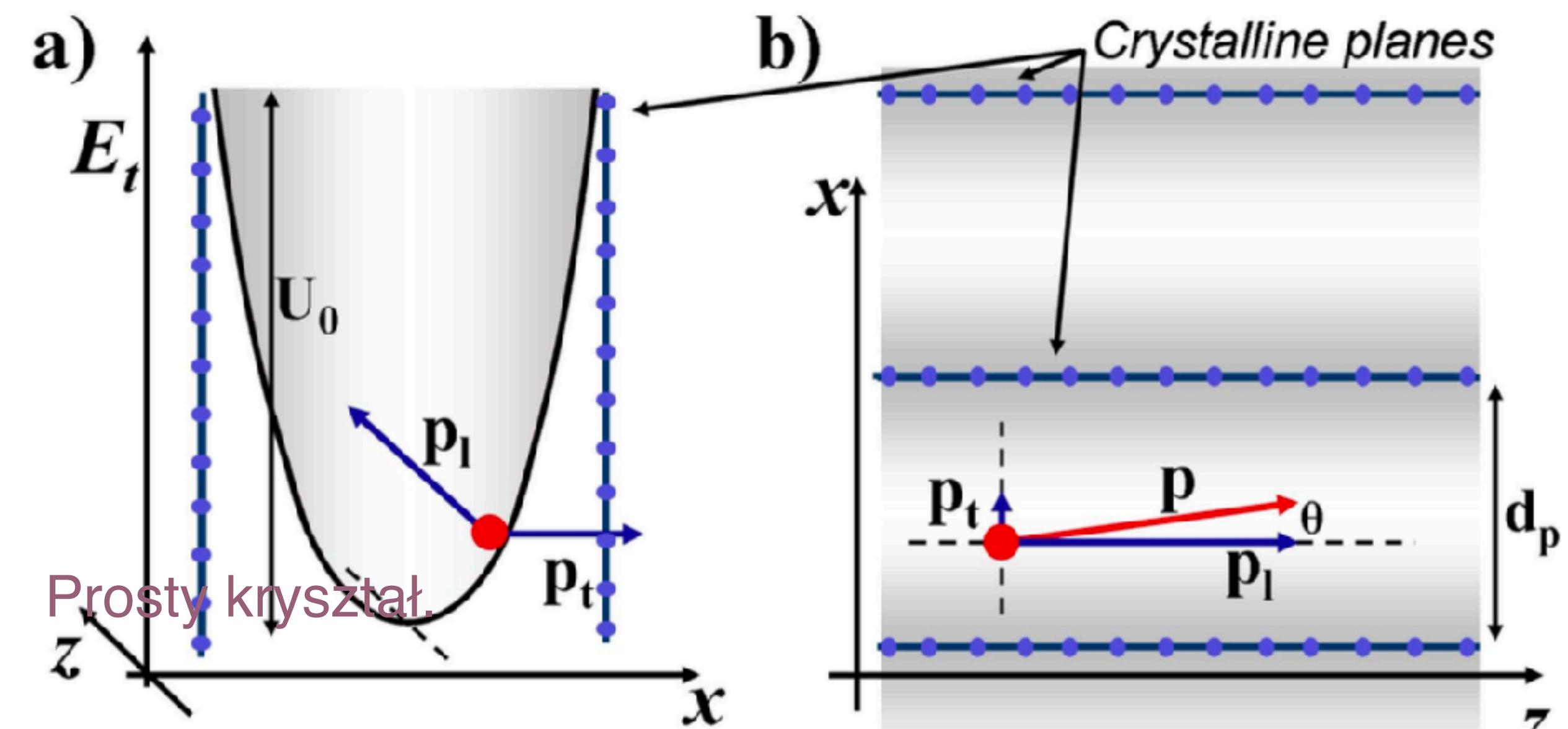
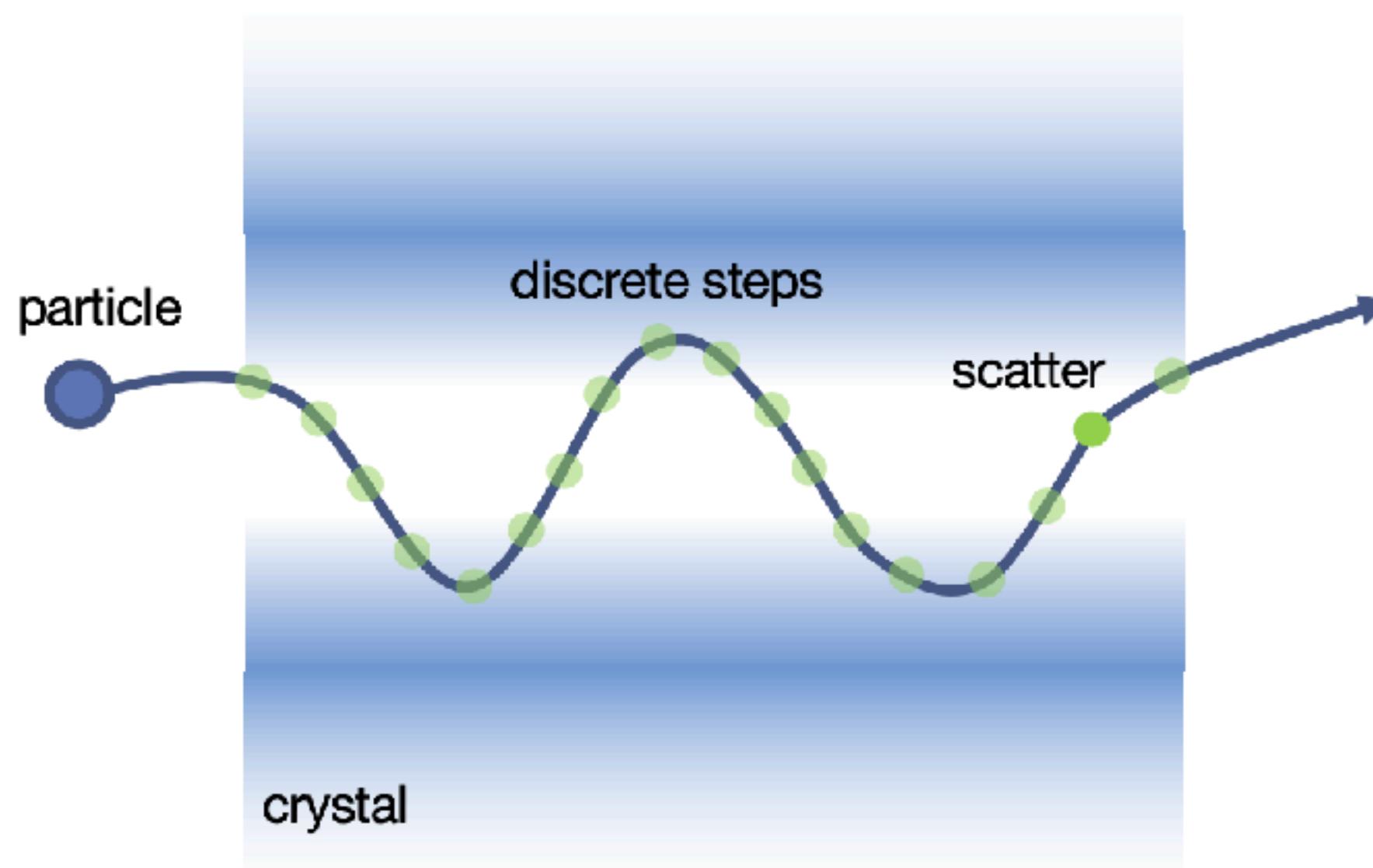


Rysunek 19. Potencjał widziany przez proton wchodzący między płaszczyzny krystaliczne pod małym kątem; a) płaszczyzna Si(110); b) płaszczyzna Si(111). [13]

Channeling

Prosty kryształ.

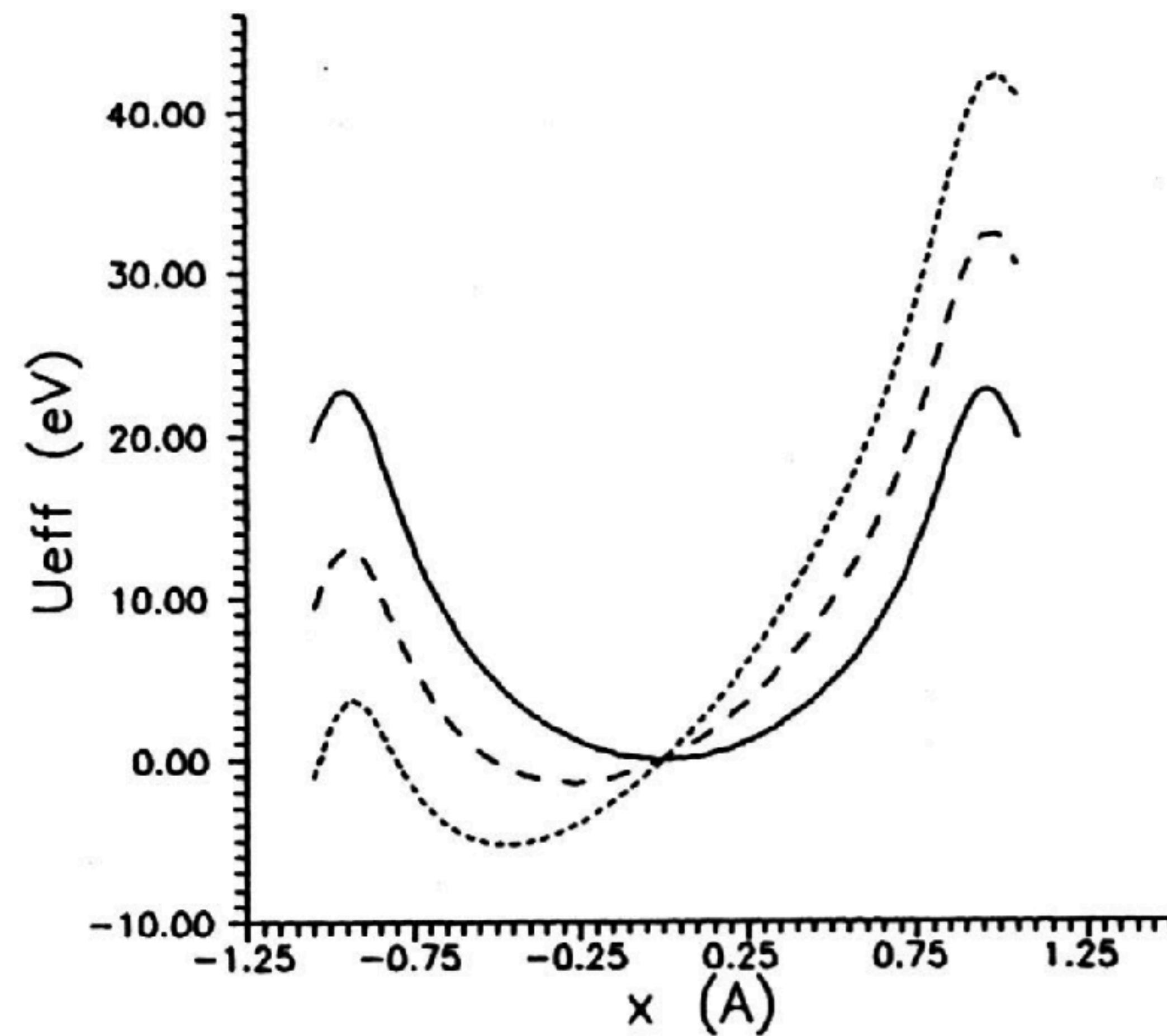
Rysunek 20. Trajektoria (channelowanie) cząstek dodatnio naładowanych między płaszczyznami krystalicznymi. [14]



Rysunek 21. Układ odniesienia dla protonów wchodzących pomiędzy płaszczyzny krystaliczne z pędem p (na czerwono, a składowe pokazane są na niebiesko). a) widok z przodu z harmonicznym przybliżeniem studni potencjału, b) widok z góry. [13]

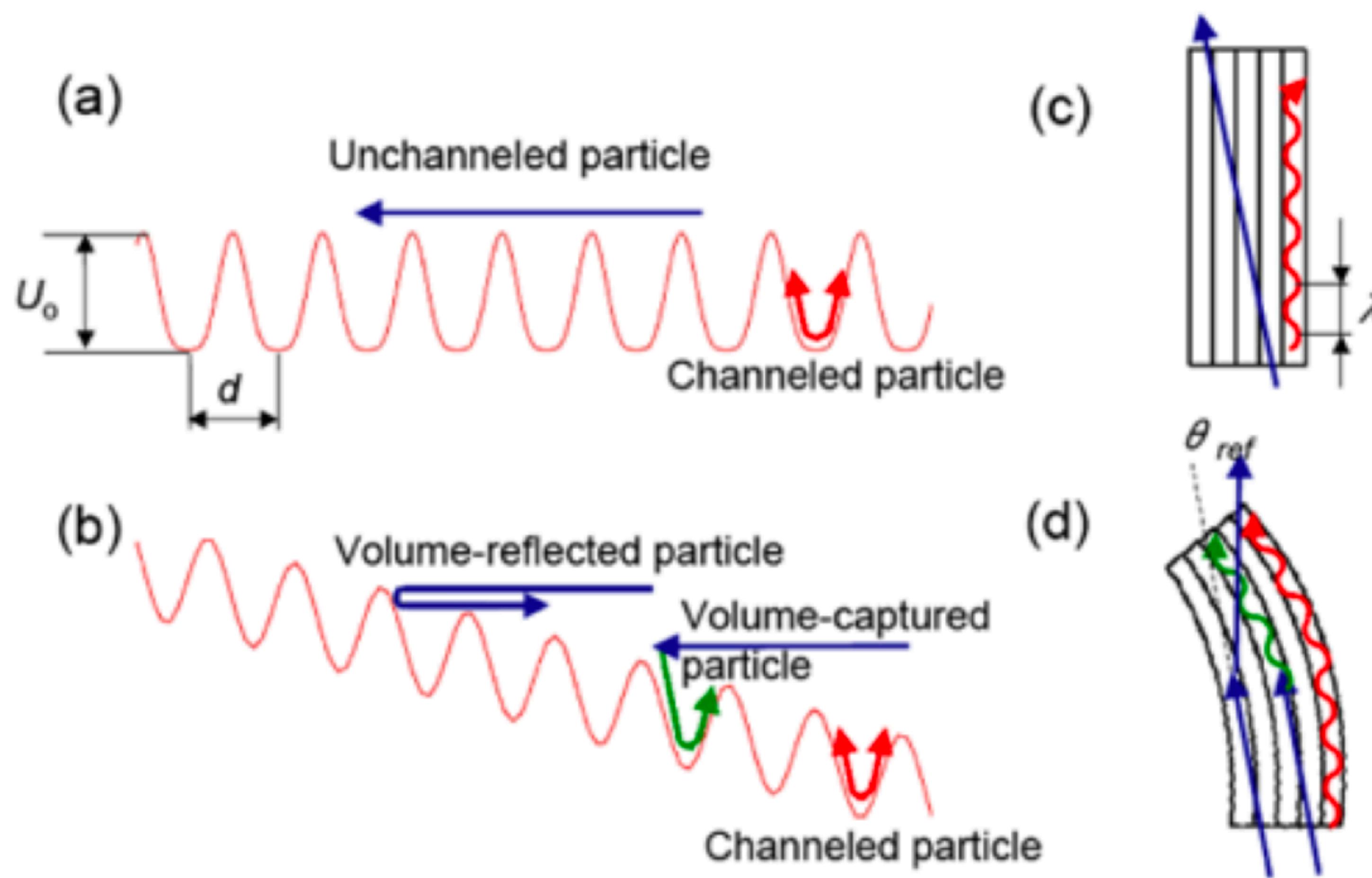
Channeling

Zakrzywiony kryształ.



Rysunek 22. Potencjał efektywny w krysztale Si(110), gdzie ciągła linia - prosty kryształ; przerywana linia - zakrzywiony kryształ z siłą odśrodkową 1 [GeV/cm]; kropkowana linia - zakrzywiony kryształ z siłą odśrodkową 2 [GeV/cm]. [13]

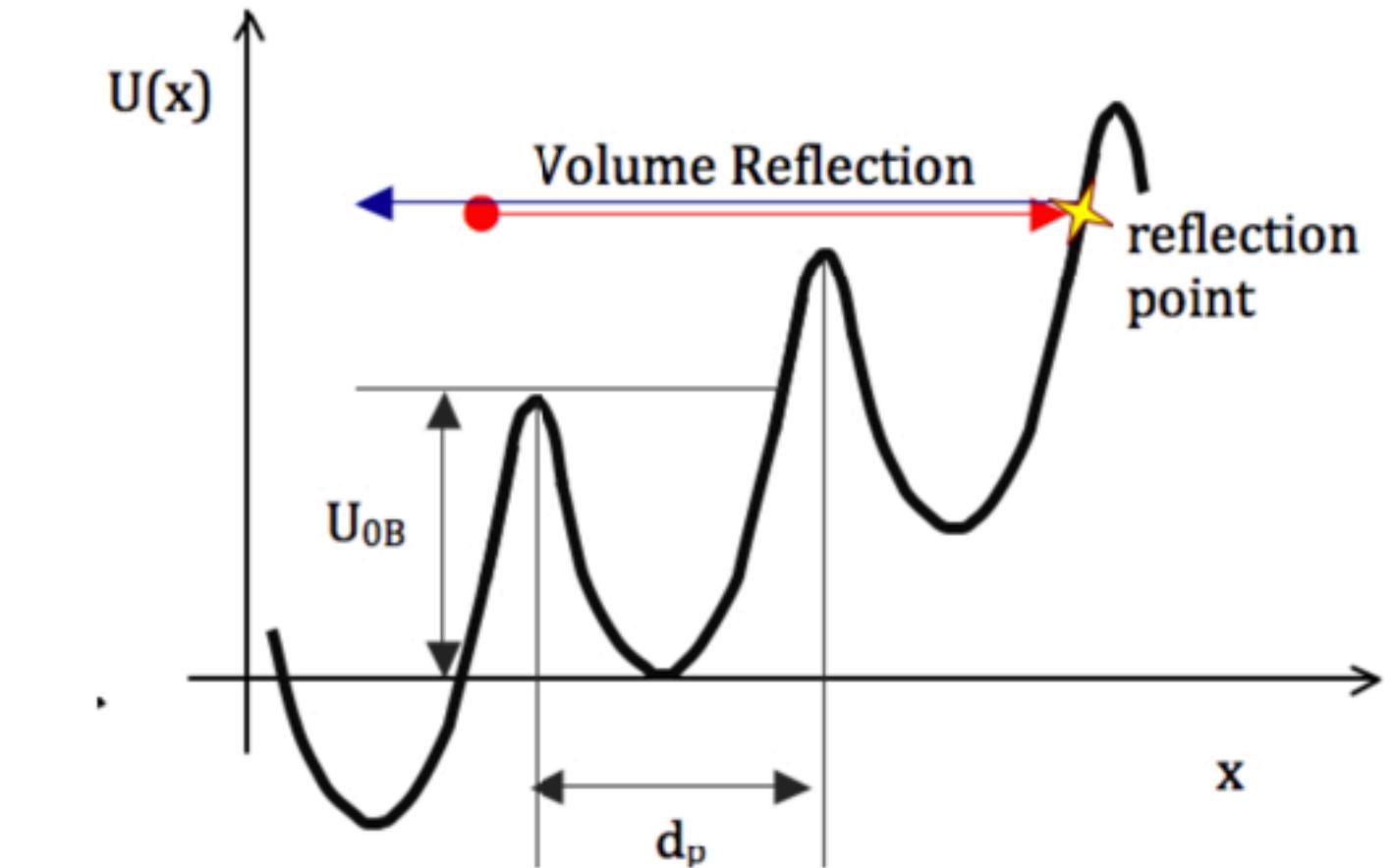
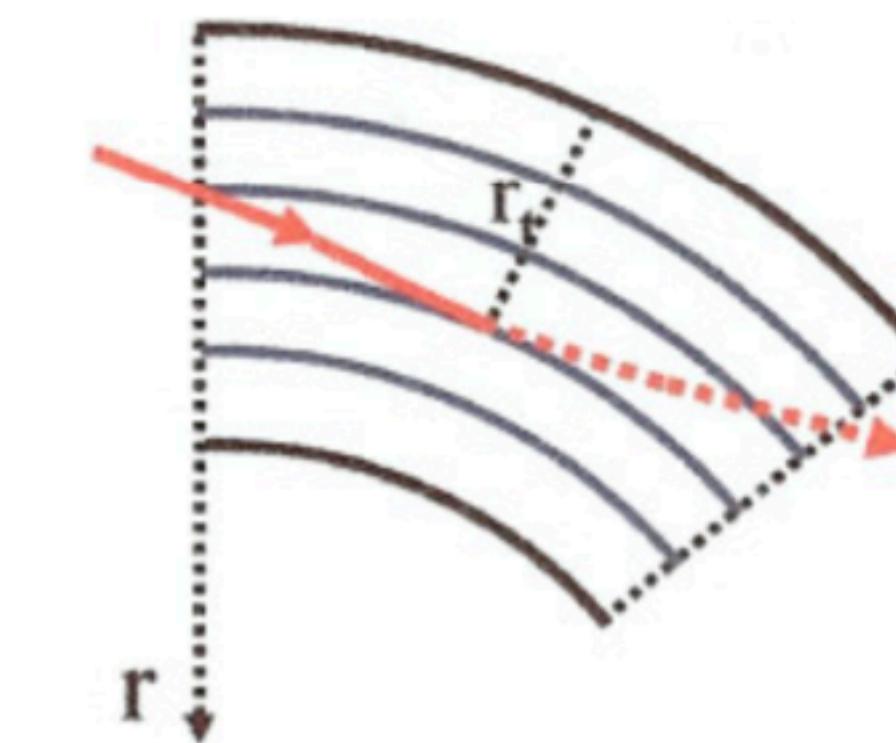
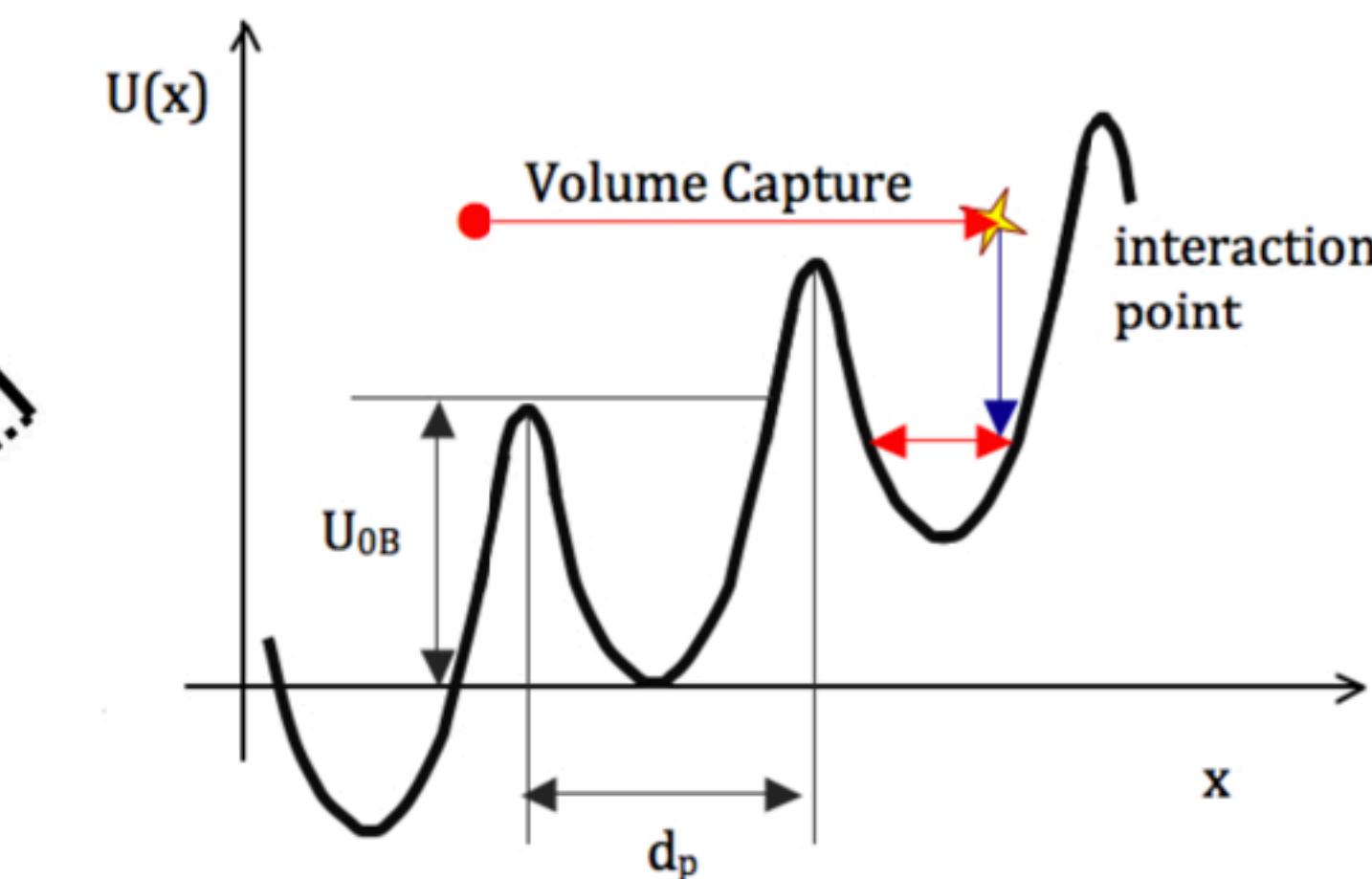
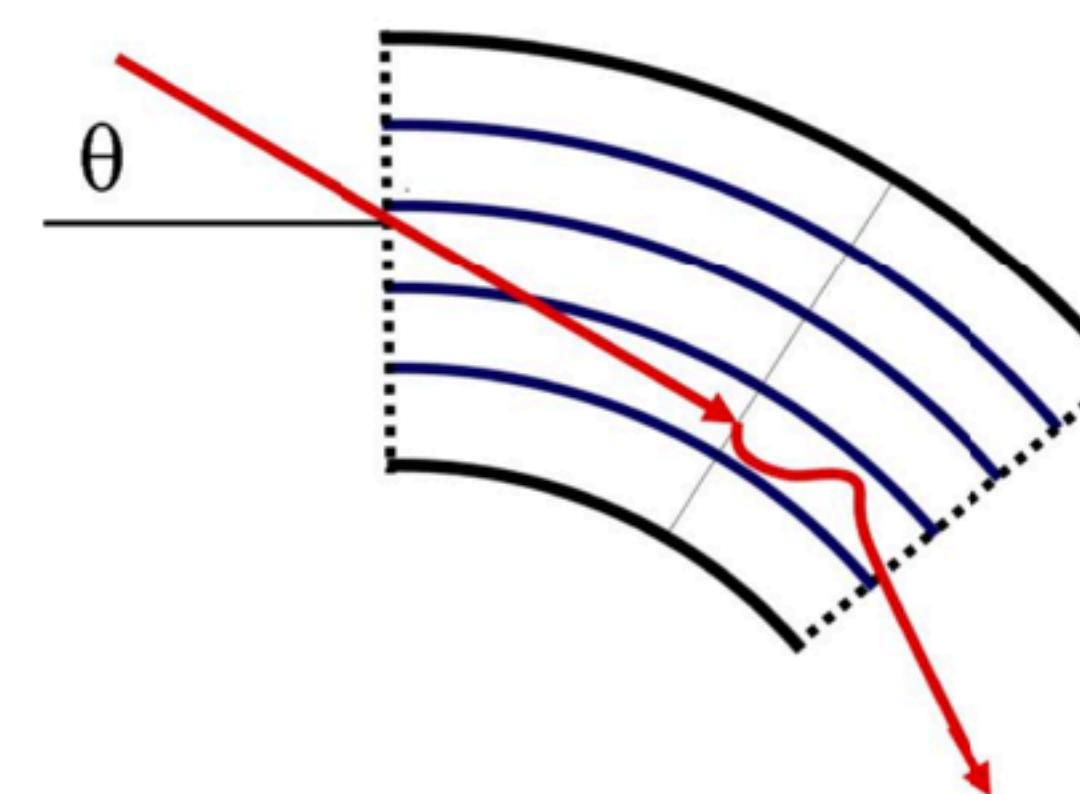
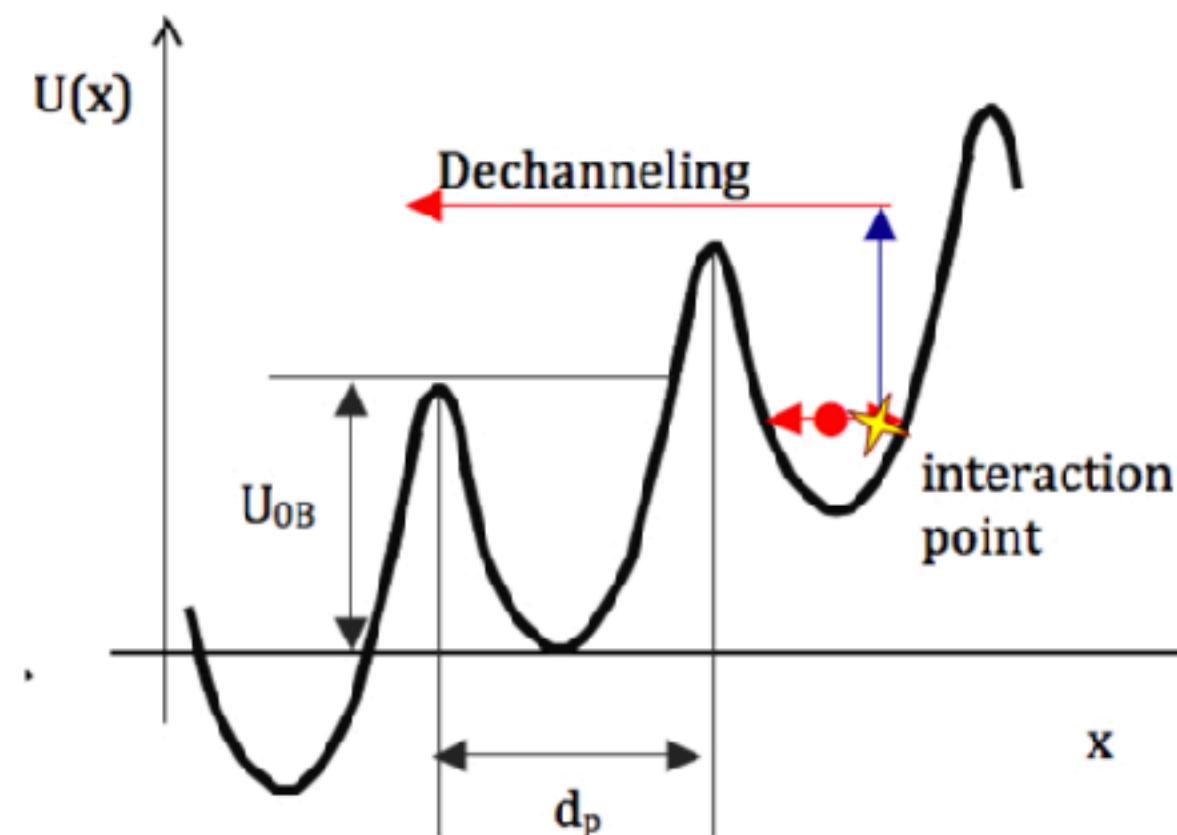
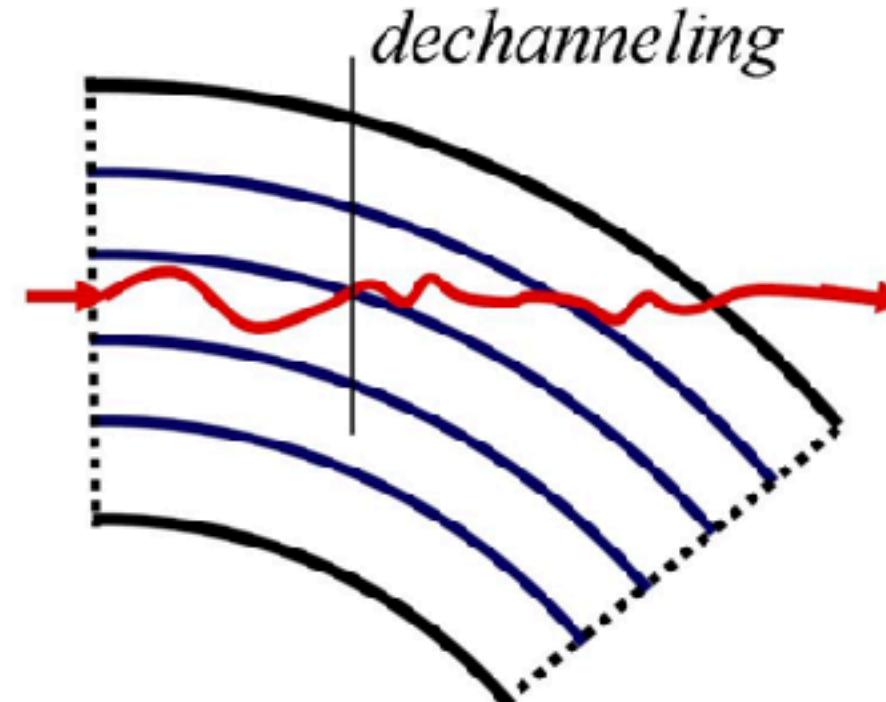
Channeling



Rysunek 23. Zjawiska zachodzące w krysztale (a) prostym; (b) zakrzywionym. [15]

Channeling

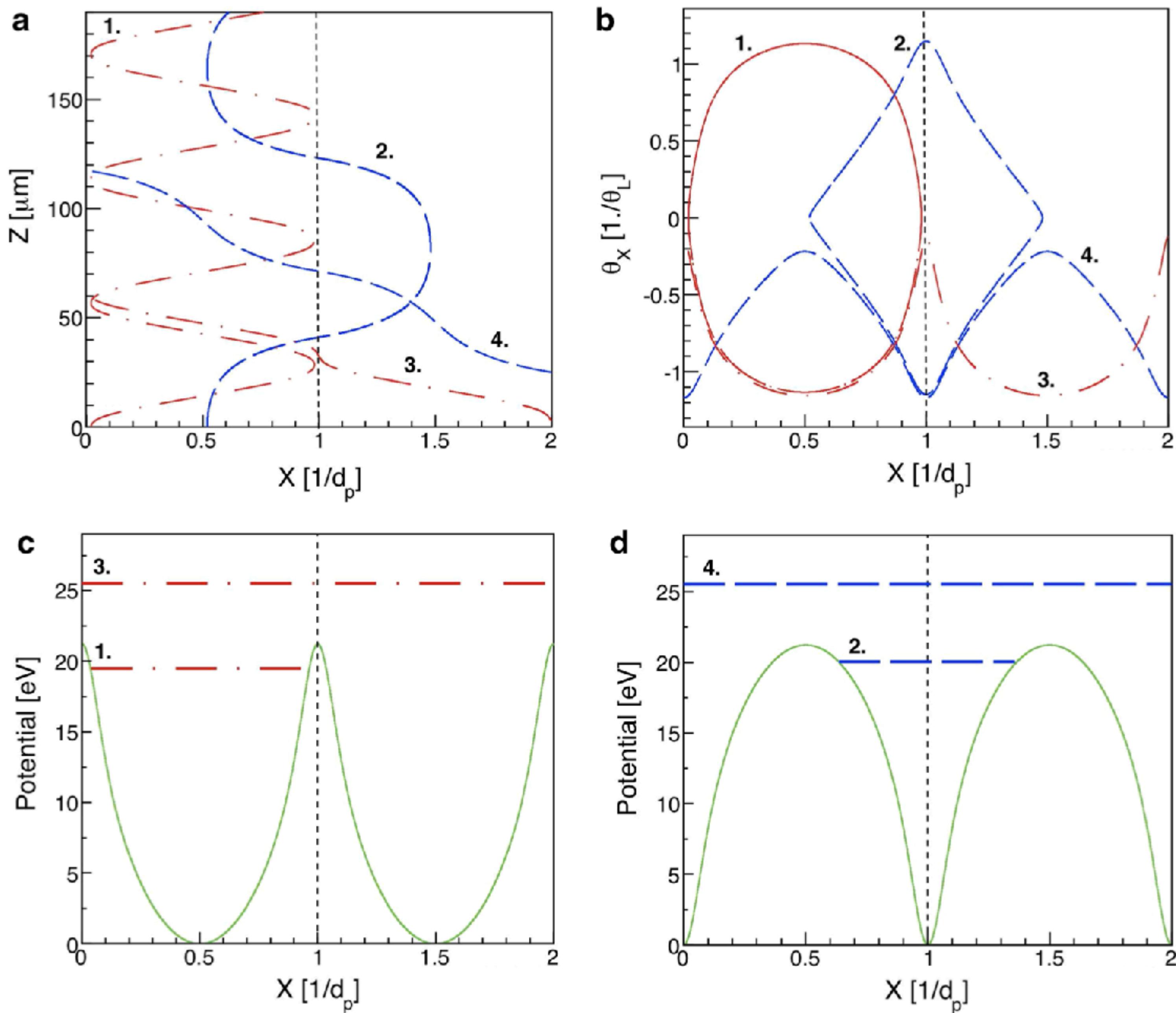
Zakrzywiony kryształ.



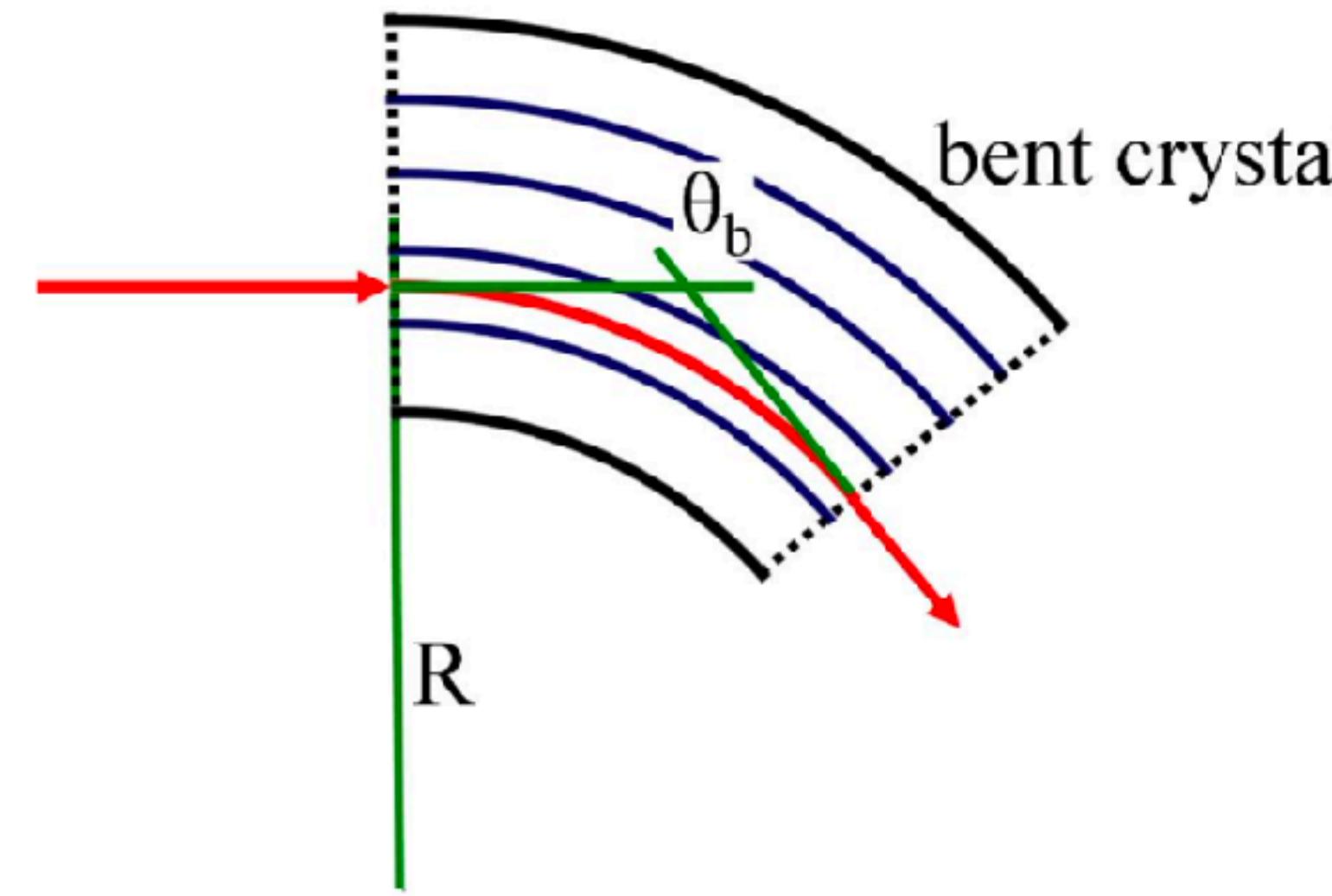
Rysunek 24. Zjawiska zachodzące w zakrzywionym krysztale. [13]

Channeling

Rysunek 27. Interakcje cząstek naładowanych energią 4 GeV z płaszczyznami krystalicznymi Si(110), przerywana, czarna linia. Przerywana, niebieska linia to trajektoria cząstek naładowanych ujemnie; przerywana-kropkowana, czerwona linia to trajektoria cząstek dodatnio naładowanych. [16]



Channeling - parametry krytyczne kryształu



Rysunek 25. Odchylenie nadawane cząstkom kierowanym na całej długości kryształu. [13]

Promień krytyczny:

$$R_c = \frac{pv}{U'(x_{max})}, \text{ gdzie } U'(x_{max}) = \text{const}$$

Krytyczny kąt wejścia wiązki:

$$\theta_c = \sqrt{\frac{2U_{max}}{pv}}$$

Krytyczny kąt wejścia wiązki dla zakrzywionego kryształu:

$$\theta_c^b = \theta_c \left(1 - \frac{R_c}{R} \right), \text{ gdzie } R > R_c$$

Channeling - parametry kryształu

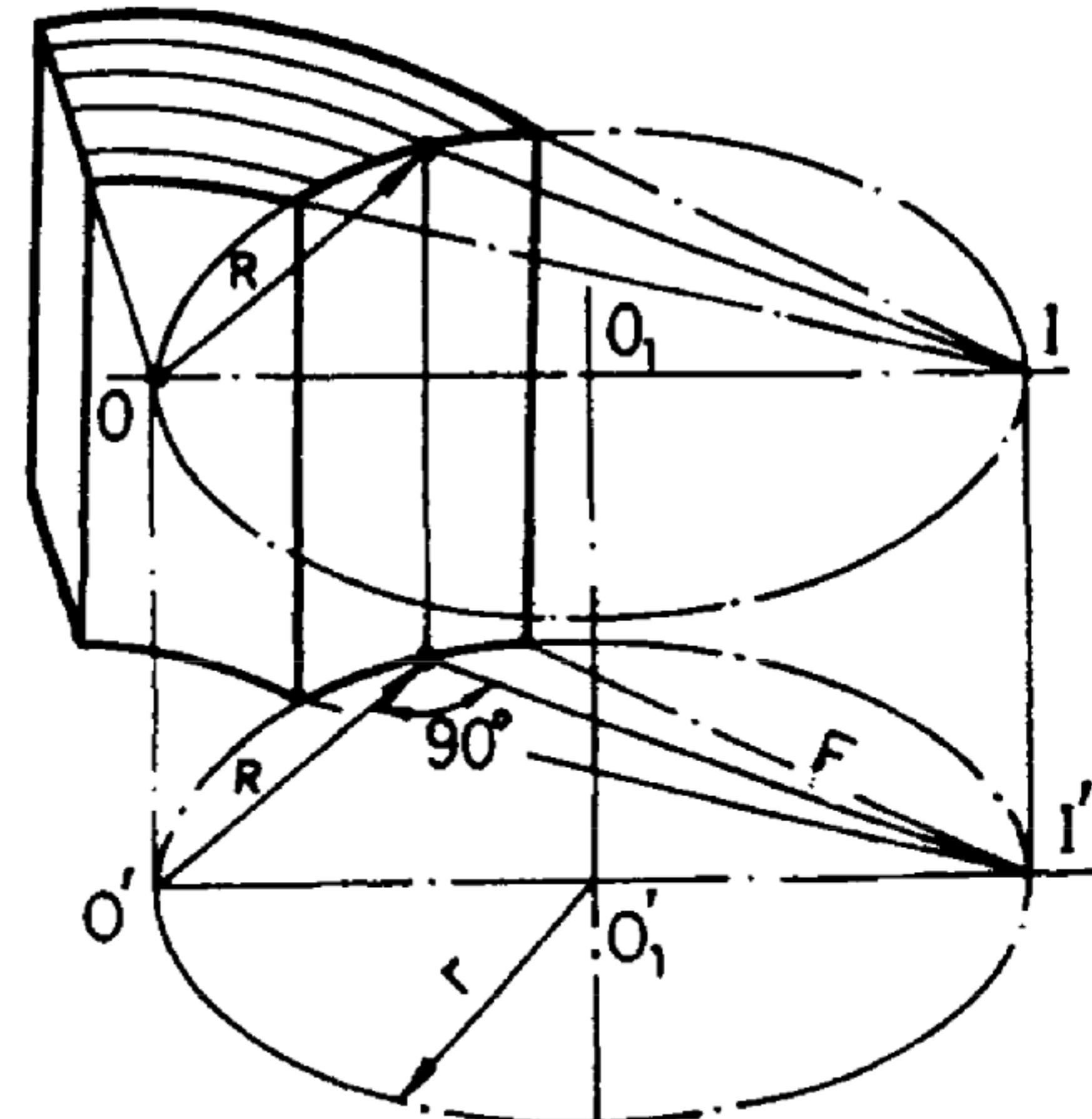
Długość kryształu:

$$l = R * \theta_b$$

Promień walca wycinającego

kryształ wyjścia z kryształu:

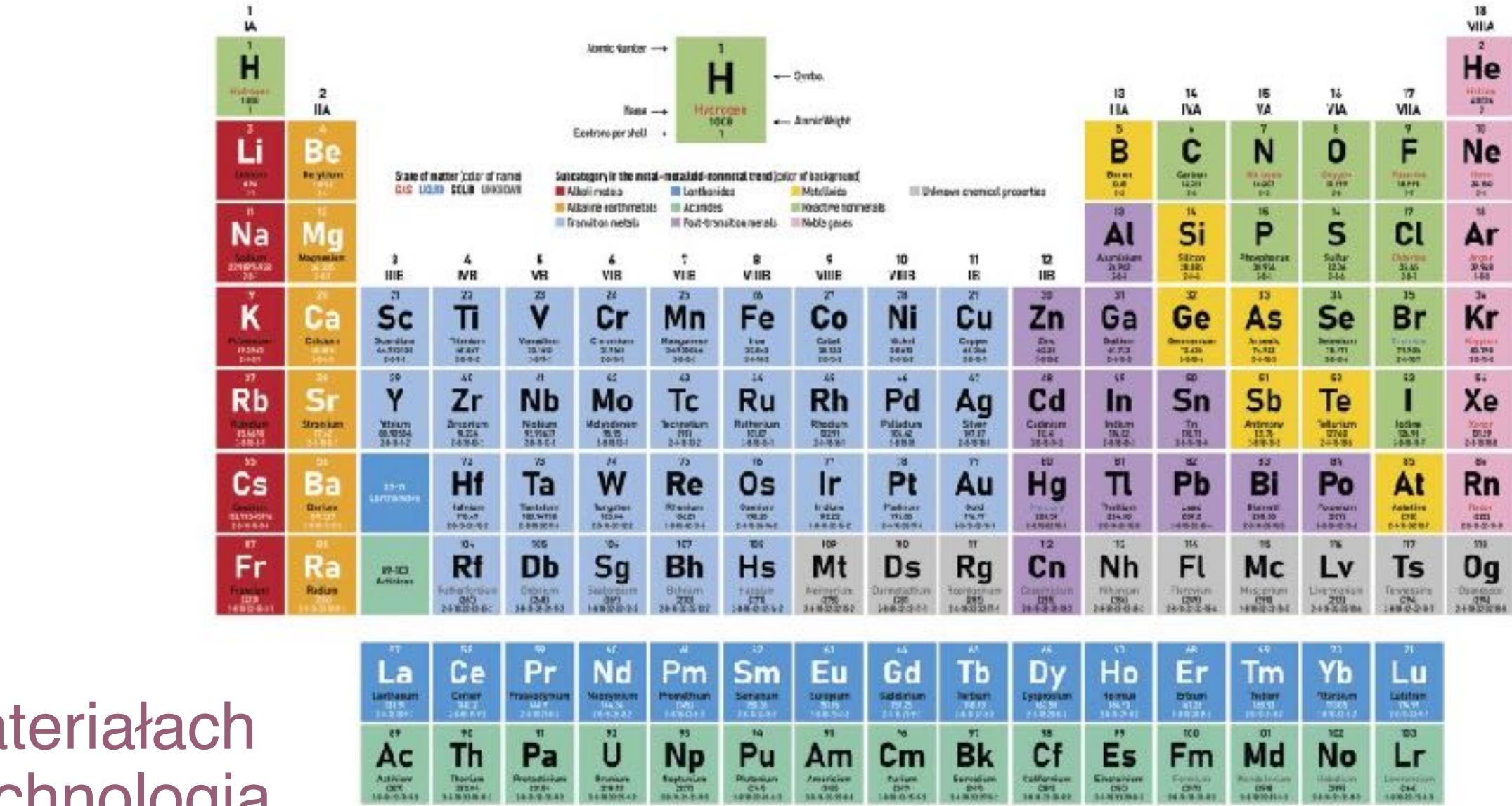
$$r = \frac{1}{2} \sqrt{F^2 + R^2}$$



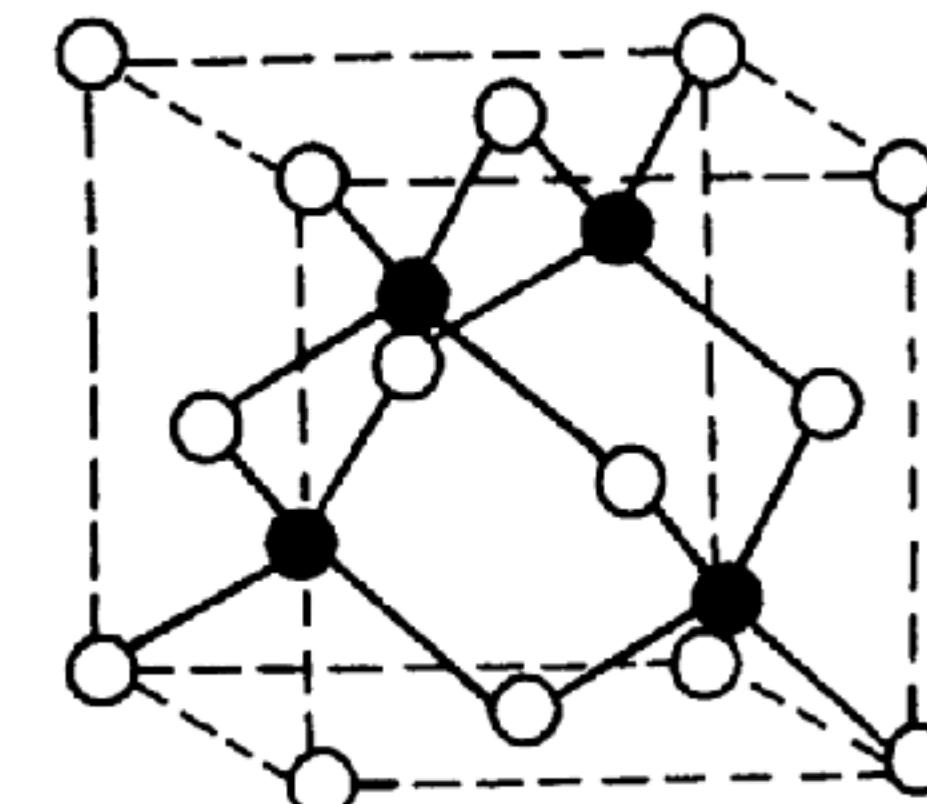
Rysunek 26. Skupianie wiązki po przejściu przez kryształ [11]

Dlaczego krzem?

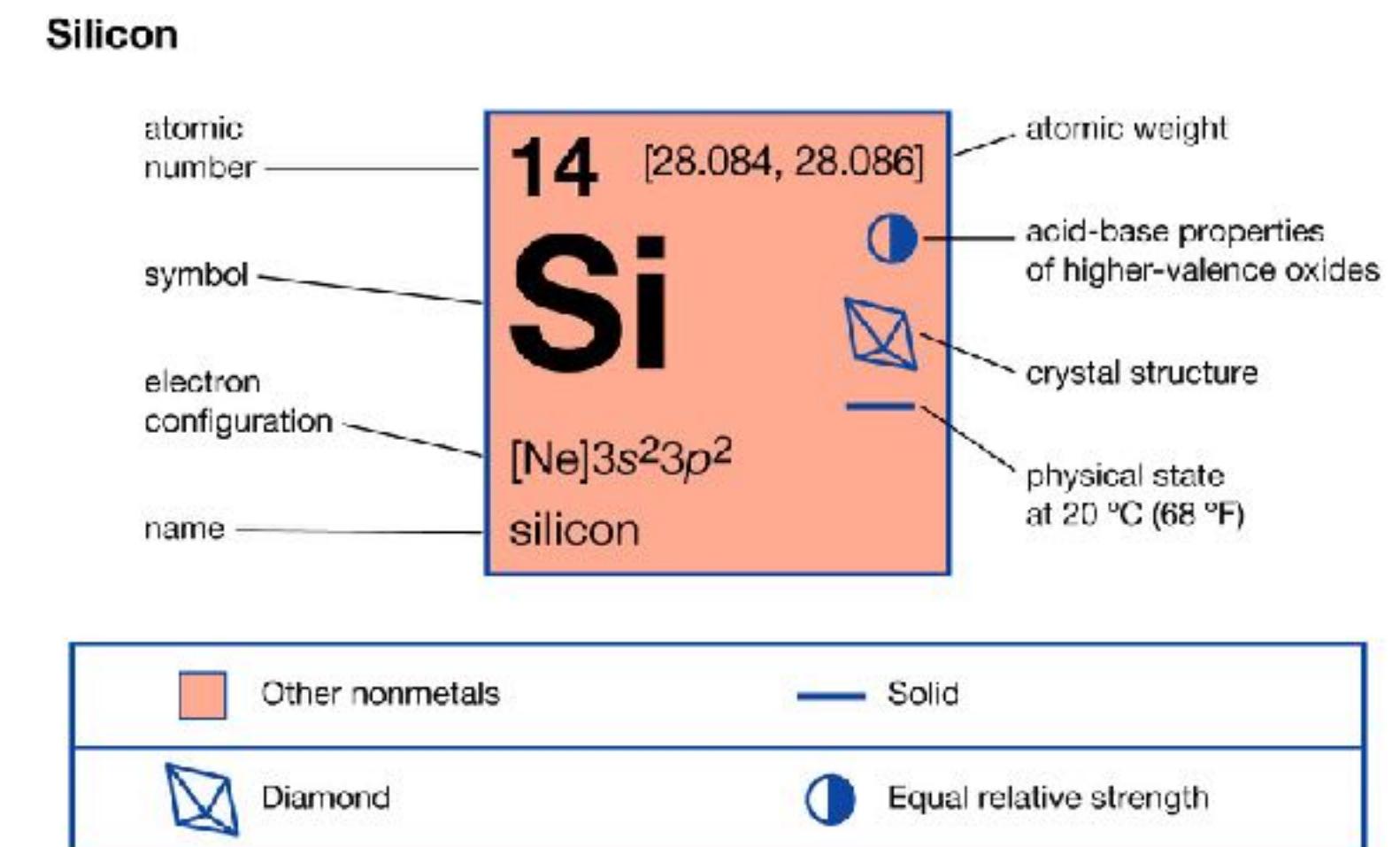
- Kryształ z grupy 14 (diamentów), które są wykorzystywane w badaniach wysokoenergetycznego chanellingu w akceleratorach.
- Wysoki stopień doskonałości krystalitów w materiałach półprzewodnikowych oraz dobrze rozwinięta technologia wzrostu dużych kryształów półprzewodników.
- Inne pierwiastki krystalizujące w strukturę diamentu to:
 - C (węgiel),
 - Ge (german),
 - Sn (szara cyna) [12].



Rysunek 29. Tablica Mendelejewa [17]



Rysunek 28. Diamentowa siatka sześcienna:
dwie identyczne siatki FCC, wsunięte jedna w drugą i przesunięte wzduż przekątnej objętościowej o jedną czwartą jej długości.
Zamalowane kule to atomy przesuniętej siatki. [12]



© Encyclopædia Britannica, Inc.

Rysunek 30. Krzem [18]

Środowisko programistyczne



Rysunek 33. Logo Geant4. [19]

```
2009_PLB680_129.mac

#detector geometry
/xtal/setMaterial G4_Si
/xtal/setAngle 0. -25.25E-6 0. rad
/xtal/setSize 1.0 70. 1.94 mm
/xtal/setBR 38.416 0. 0. m
/xtal/setEC data/5i220pl

#initialize run before stacking and primary generator actions
/run/initialize

#set gps properties
/gps/ene/mono 400. GeV
/gps/particle proton

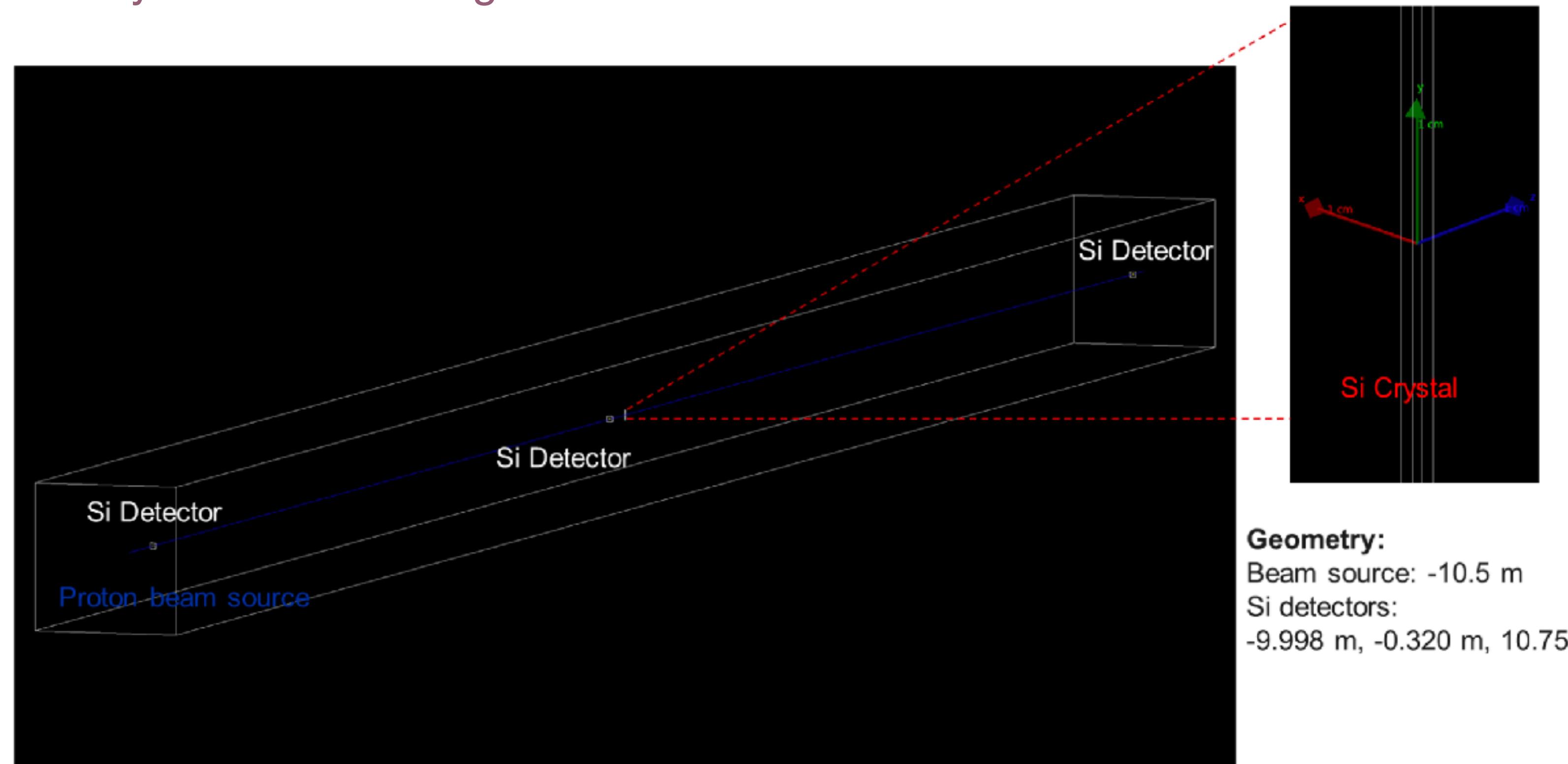
/gps/pas/type Point
/gps/pas/centre 0 0 -10.5 m

/gps/ang/type beam2d
/gps/ang/rot1 1 0 0
/gps/ang/rot2 0 -1 0
/gps/ang/sigma_x 13.36E-6 rad
/gps/ang/sigma_y 11.25E-6 rad

#beam on
/run/beamOn 1000
```

Rysunek 31. Skrypt z parametrami do symulacji w przykładzie channeling.

Przykład “Channeling”



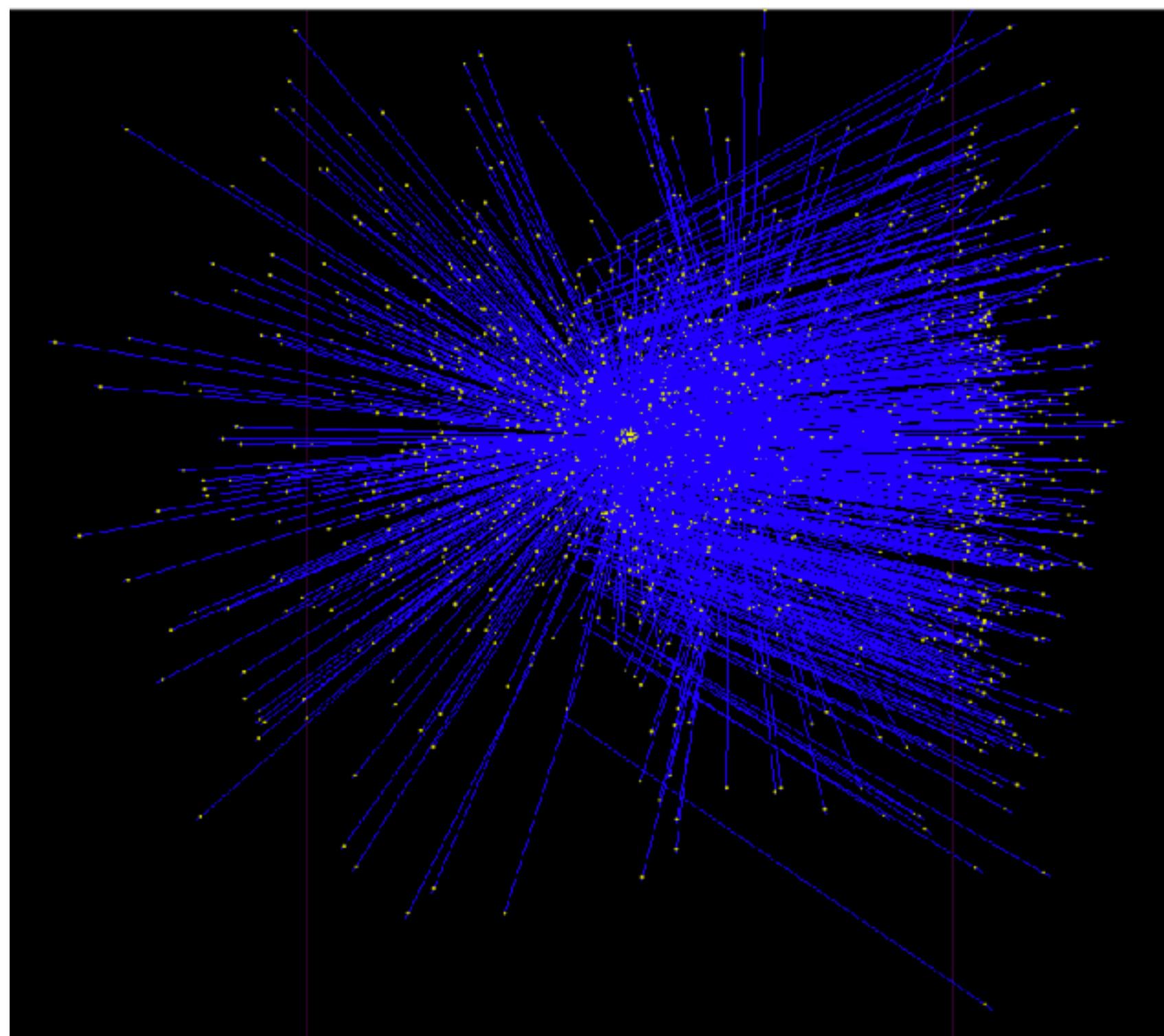
Rysunek 32. Wizualizacja geometrii w przykładzie channeling. [15]

Aktualny stan pracy

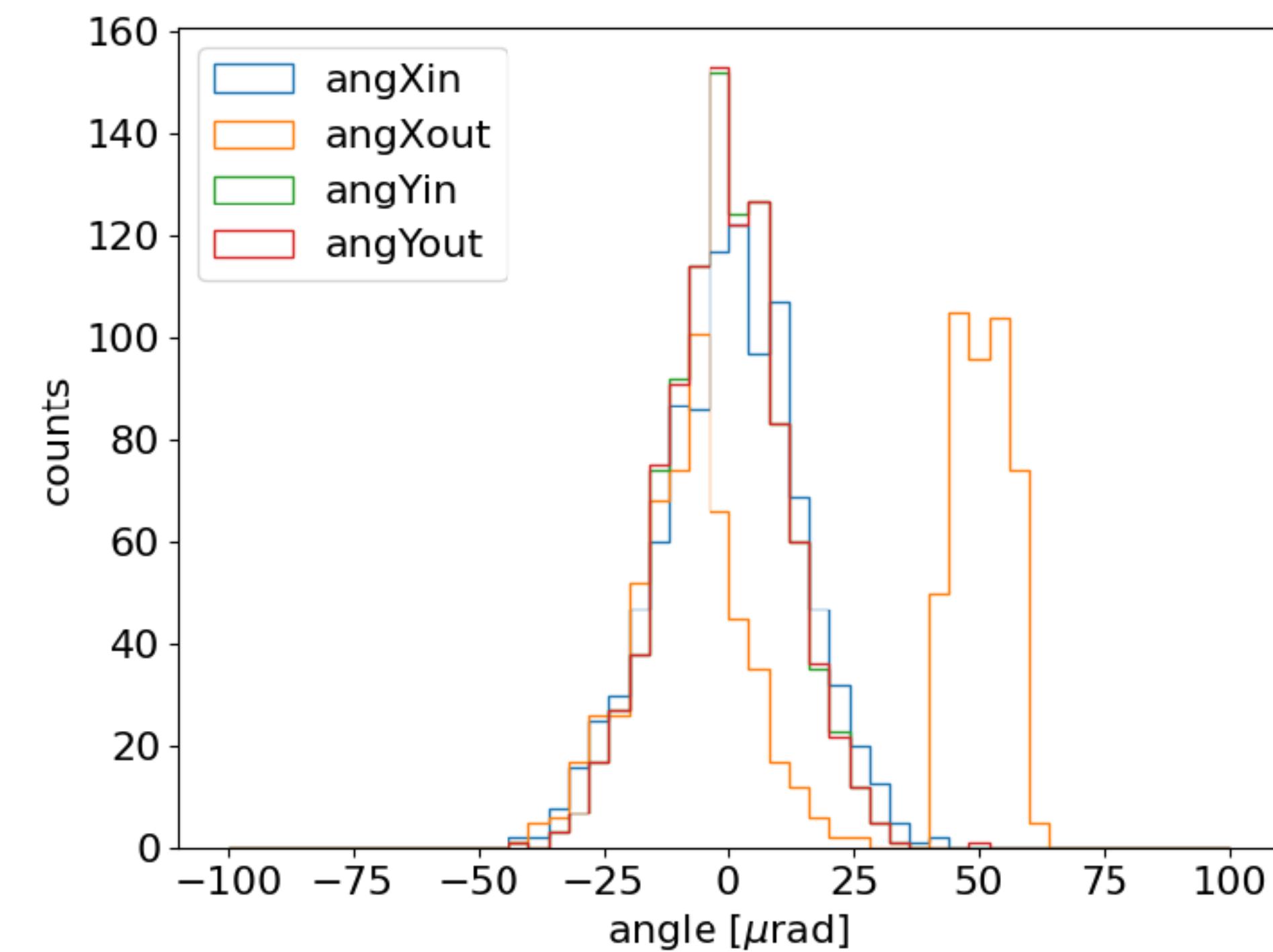
- Zapoznanie się z literaturą i podstawami fizycznymi omawianych procesów.
- Określenie parametrów soczewki wykonanej z kryształu krzemu i geometrii układu.
- Praca nad symulacją numeryczną skupienia wiązki elektronów przy użyciu soczewki w środowisku Geant4.
- Analiza otrzymanych danych.



Rysunek 36. Logo python. [19]

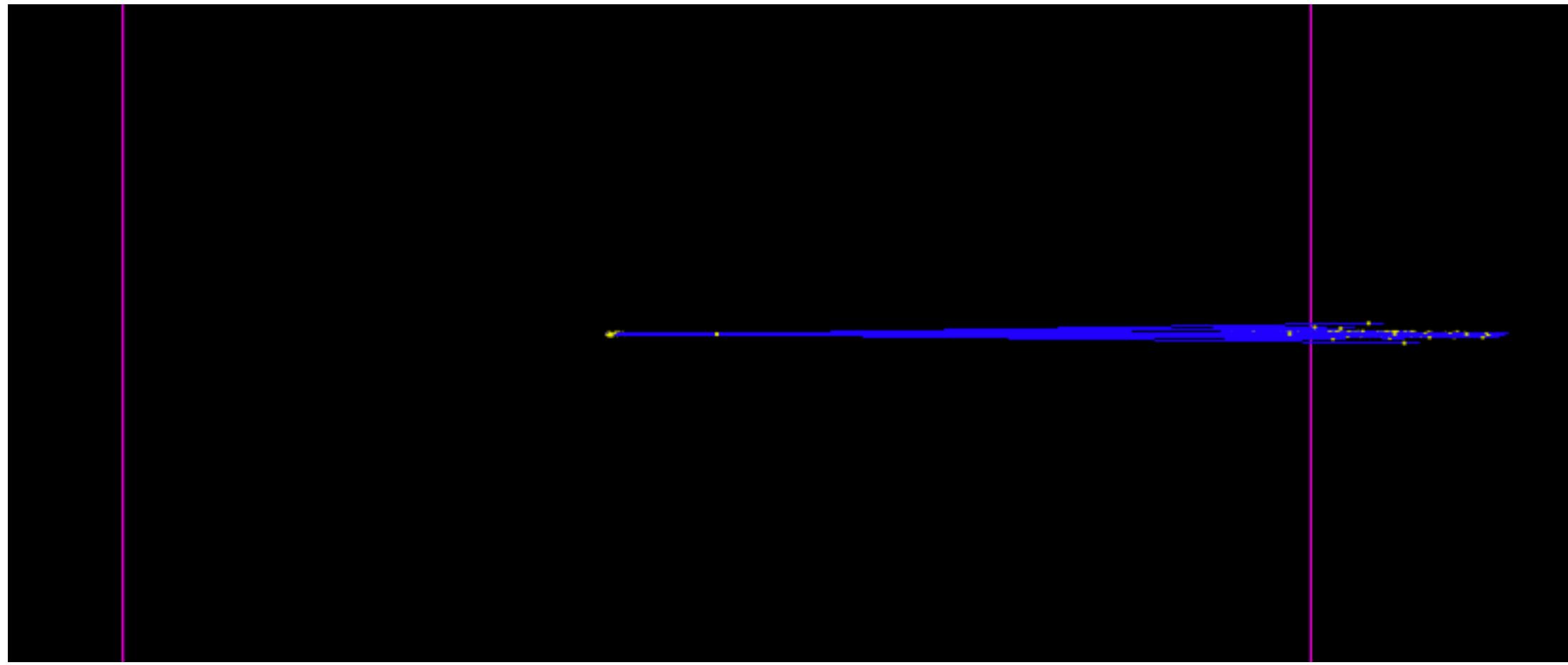


Rysunek 34. Wizualizacja symulacji channeling dla rozproszonej wiązki protonów w Geant4.

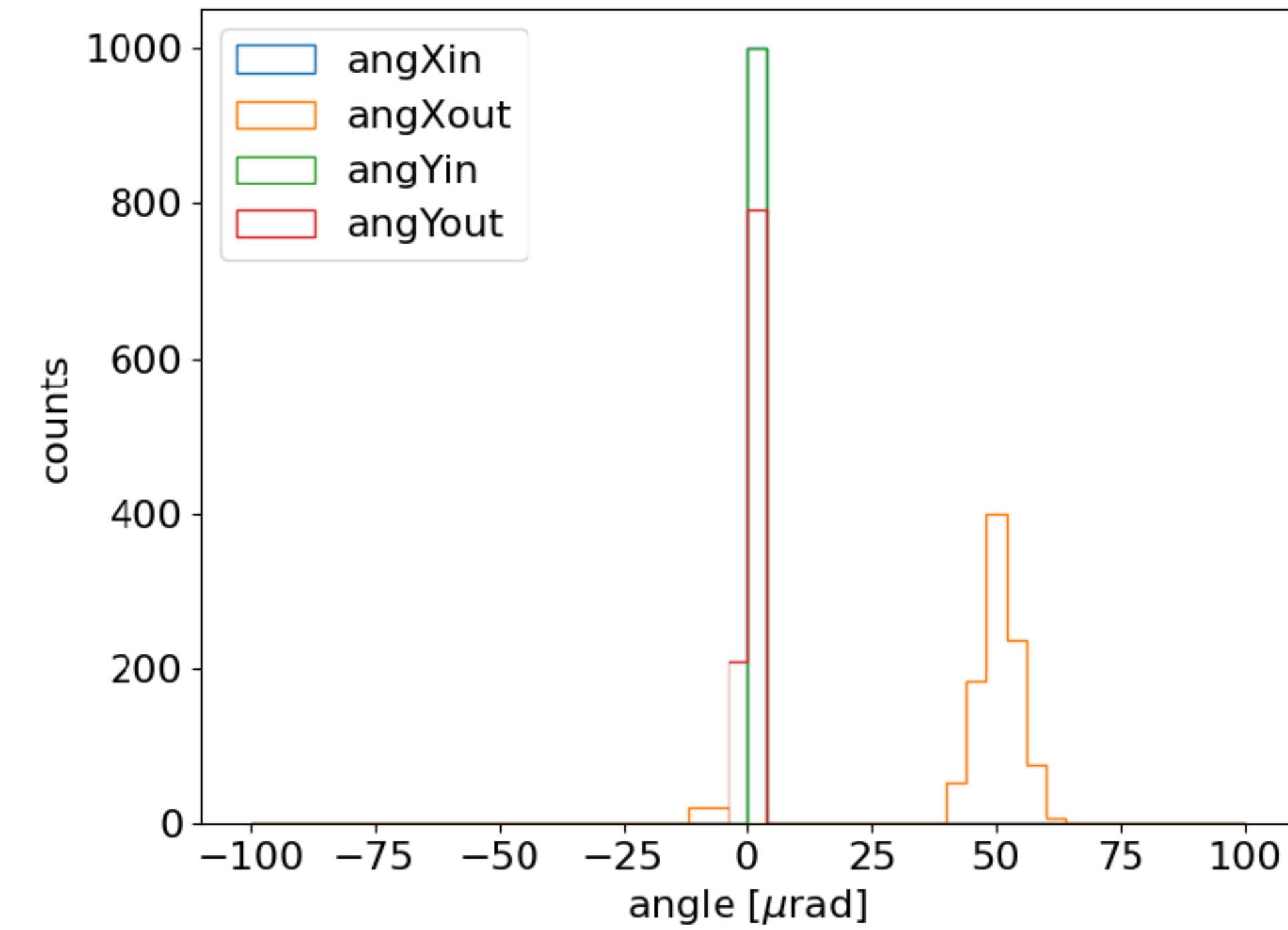


Rysunek 35. Histogram dla symulacji channeling dla rozproszonej wiązki protonów.

Analiza danych

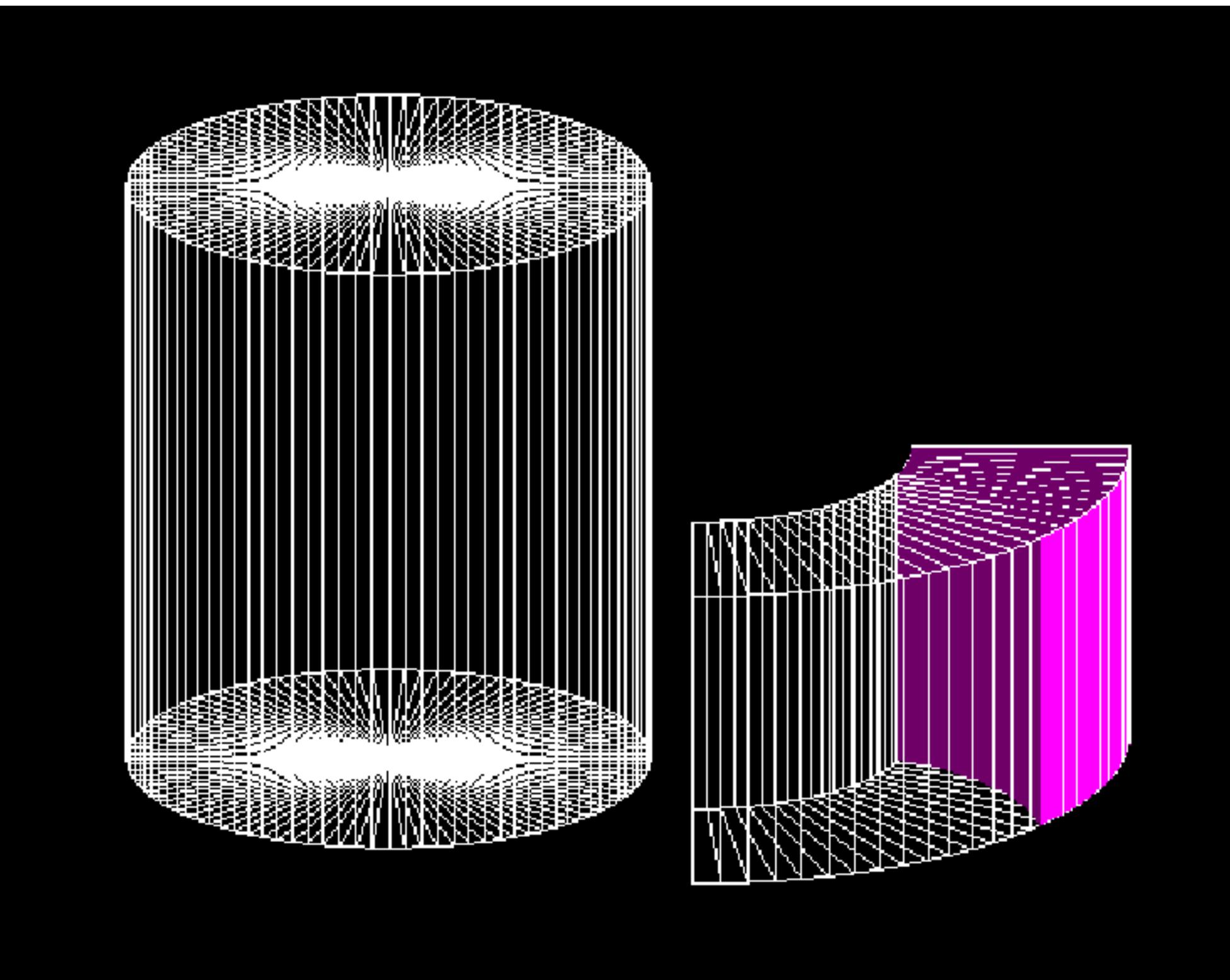


Rysunek 36. Wizualizacja symulacji channeling dla równoległej wiązki protonów.

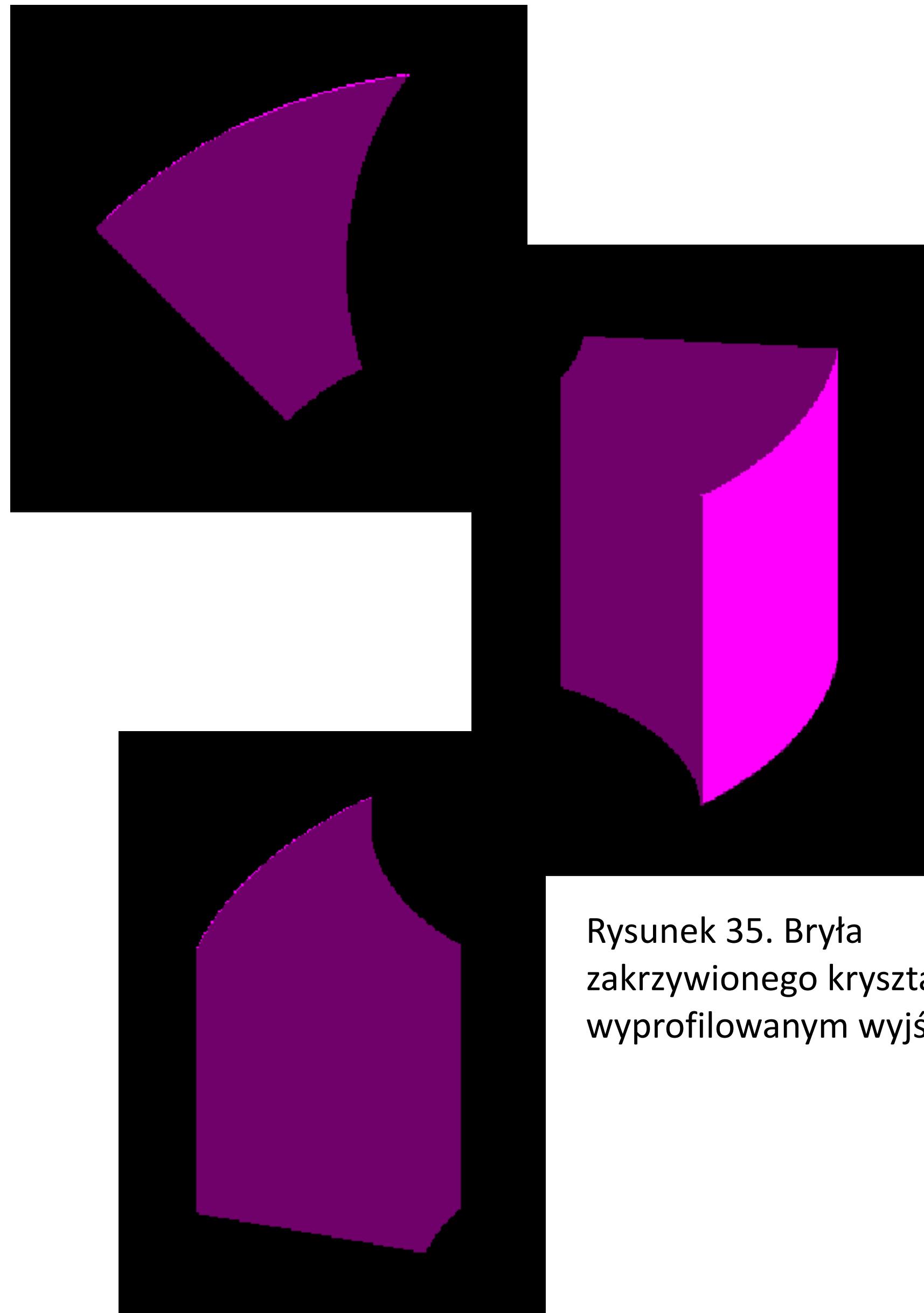


Rysunek 37. Histogram dla symulacji channeling dla równoległej wiązki protonów.

Geometria kryształu



Rysunek 34. Bryły składowe zakrzywionego kryształu z wyprofilowanym wyjściem.



Rysunek 35. Bryła zakrzywionego kryształu z wyprofilowanym wyjściem.

Dalsze plany

- Dalsze rozwijanie symulacji numerycznej skupienia wiązki elektronów przy użyciu soczewki w środowisku Geant4.
- Dalsza analiza otrzymanych danych.
- Analiza możliwości wykonania soczewki z innego materiału.
- Napisanie pracy magisterskiej.

Bibliografia

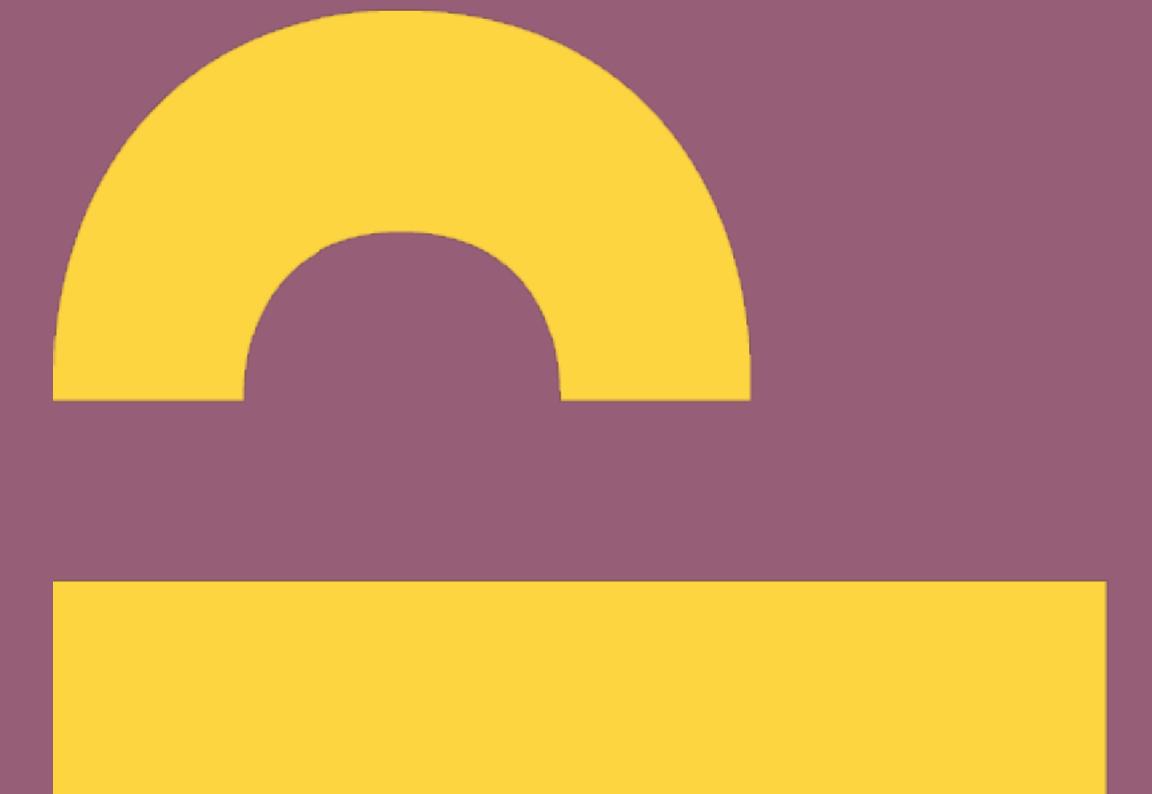
- [1] <https://www.cancer.gov> (dostęp 08.12.2022)
- [2] <https://onkologia.org.pl/> (dostęp 07.12.2022)
- [3] <https://gco.iarc.fr/today/online-analysis-map> (dostęp 07.12.2022)
- [4] <https://www.cancerresearchuk.org/> (dostęp 14.12.2022)
- [5] <https://unsplash.com> (dostęp 07.12.2022)
- [6] <https://indico.cern.ch/event/840212/page/17999-presentations> (dostęp 07.12.2022)
- [7] <http://www.accelerators-for-society.org> (dostęp 07.12.2022)
- [8] An experimental study of focused very high energy electron beams for radiotherapy, Kokurewicz, K., Brunetti, E., Curcio, A. et al. Commun Phys 4, 33 (2021)
- [9] <https://kt.cern/flash-radiotherapy> (dostęp 07.12.2022)
- [10] <https://home.cern/news/news/knowledge-sharing/cern-chuv-and-theryq-join-forces-world-first-cancer-radiotherapy> (dostęp 07.12.2022)
- [11] Review of IHEP experiments for focusing and deflection 70 GeV proton beam with bent crystals, Yu.A. Chesnokov, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 119 (1996) 163-171
- [12] Crystal Channeling and Its Application at High-Energy Accelerators, V.M. Biryukov, 1997
- [13] Crystal collimation for LHC, Daniele Mirarchi, 2015
- [14] Status of Crystal Simulations with the Geant4 Routine, L. Nevay, 2020
- [15] Geant4 Crystal Channeling Study for a Two-crystal Experiment at LHC IR3, Wong Guan Ming, 2022
- [16] A model for the interaction of high-energy particles in straight and bent crystals implemented in Geant4, E. Bagli, M. Asai, D. Brandt, A. Dotti, V. Guidi, D. H. Wright, 2014
- [17] <https://www.wuwm.com/podcast/lake-effect-segments/periodic-table-of-the-elements-turns-150> (dostęp 15.12.2022)
- [18] <https://www.britannica.com/science/silicon> (dostęp 14.12.2022)
- [19] <https://geant4.web.cern.ch> (dostęp 08.12.2022)
- [20] <https://www.python.org> (dostęp 16.12.2022)



**Wydział
Fizyki**

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Dziękuję za uwagę



**Politechnika
Warszawska**