

Eksperymenty z wykorzystaniem wiązek radioaktywnych c.d.

Jądra halo

Halo neutronowe w jądrach lekkich

$${}^6\text{Li} \quad R = 2 \text{ fm}$$

$${}^{11}\text{Li} \quad R = 7,5 \text{ fm}$$

$${}^{208}\text{Pb} \quad R = 7,5 \text{ fm}$$

H. n. zaobserwowano dla:

${}^{11}\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{17}\text{B}$, ${}^{19}\text{C}$, ${}^6\text{He}$

Halo protonowe jest
poszukiwane dla: ${}^8\text{B}$, ${}^{17}\text{F}$, ${}^{17}\text{Ne}$,
 ${}^{20}\text{Mg}$

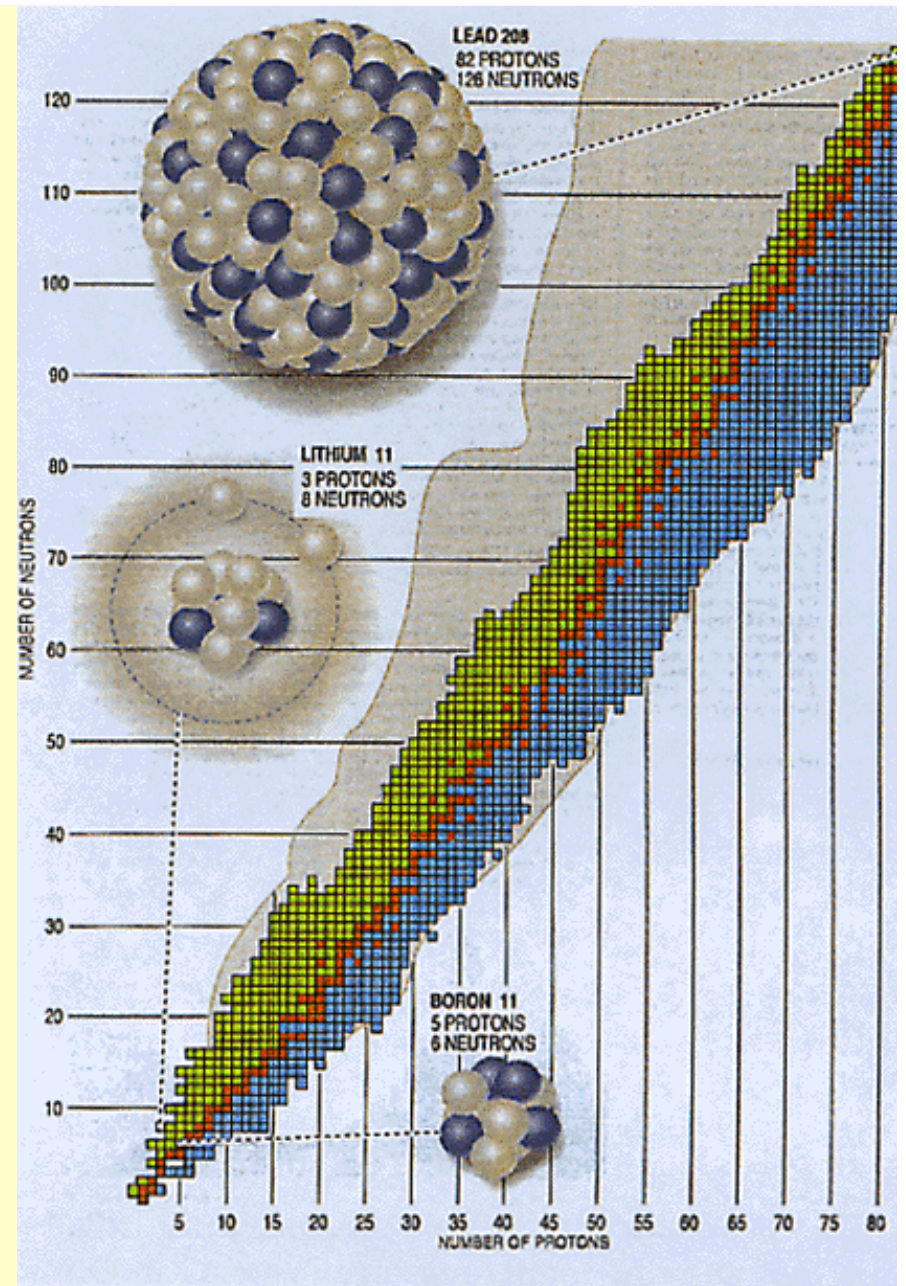
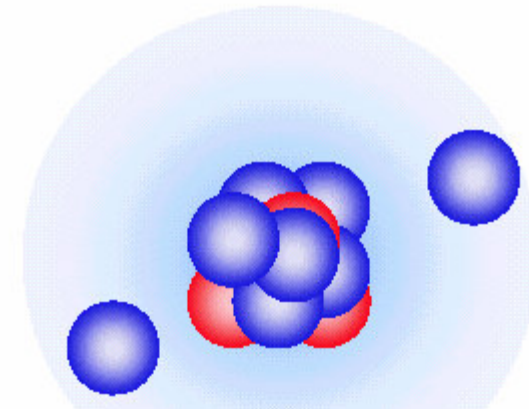
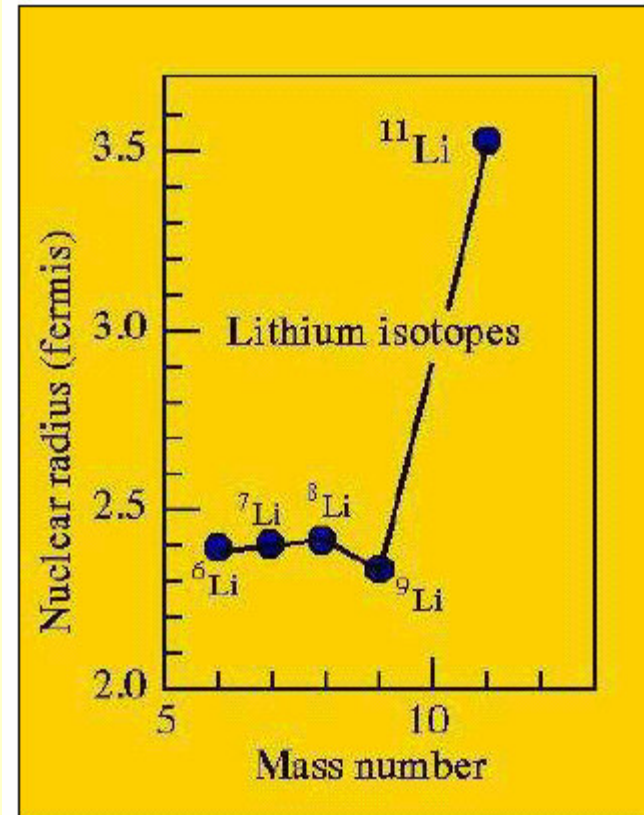


Figure I.2: Representation of the chart of nuclides: nuclei are given by squares, positioned horizontally according to the number of protons and vertically ac-

Berkeley 1985 r.

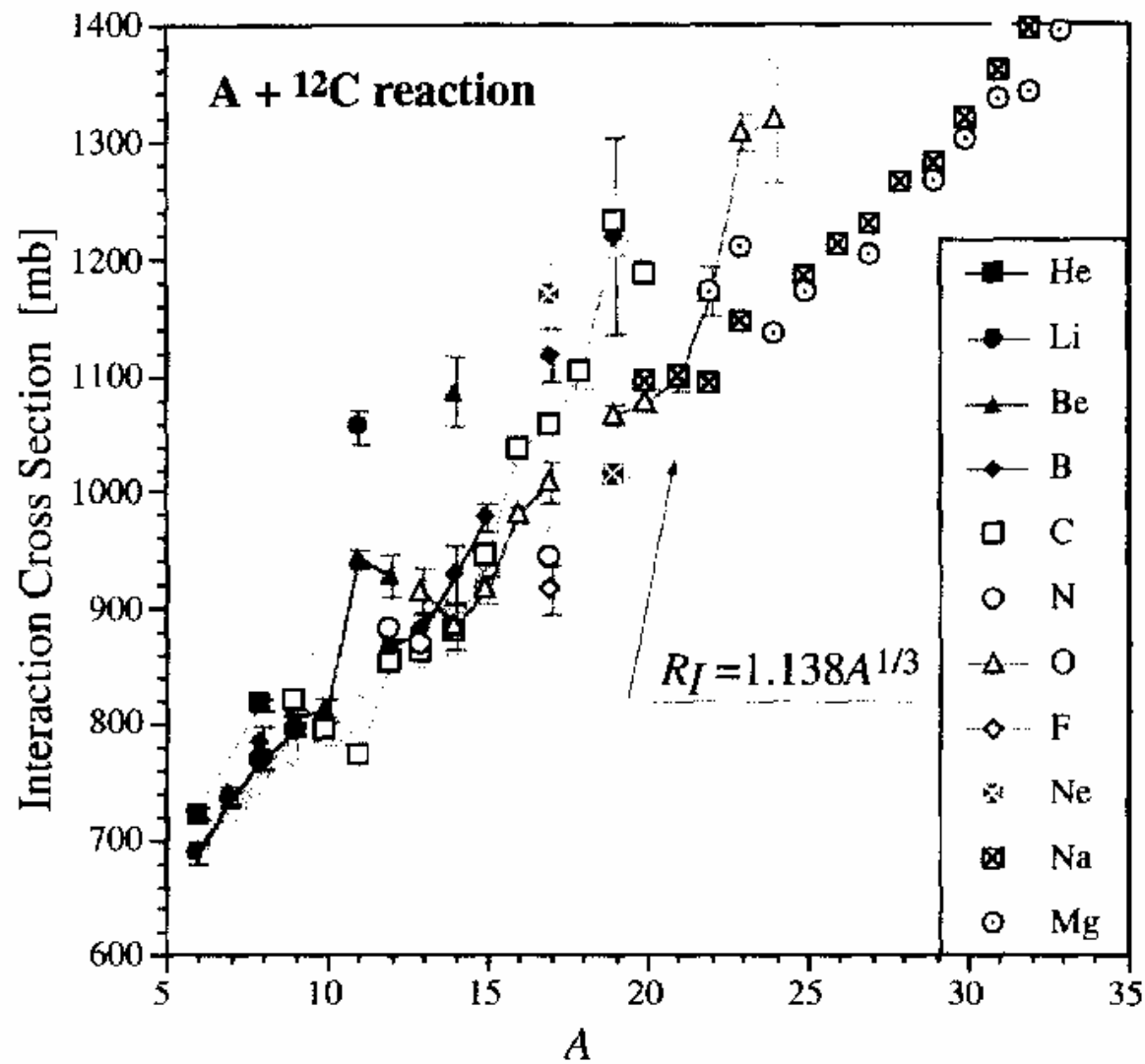
W eksperymencie, w którym mierzono przekrój czynny na oddziaływanie dla różnych izotopów Li jako pocisków, stwierdzono znacznie większy przekrój czynny dla izotopów ^{11}Li - przyjęto, że rozmiar tego jądra jest znacznie większy niż innych izotopów - efekt halo

$$\sigma \sim R^2$$

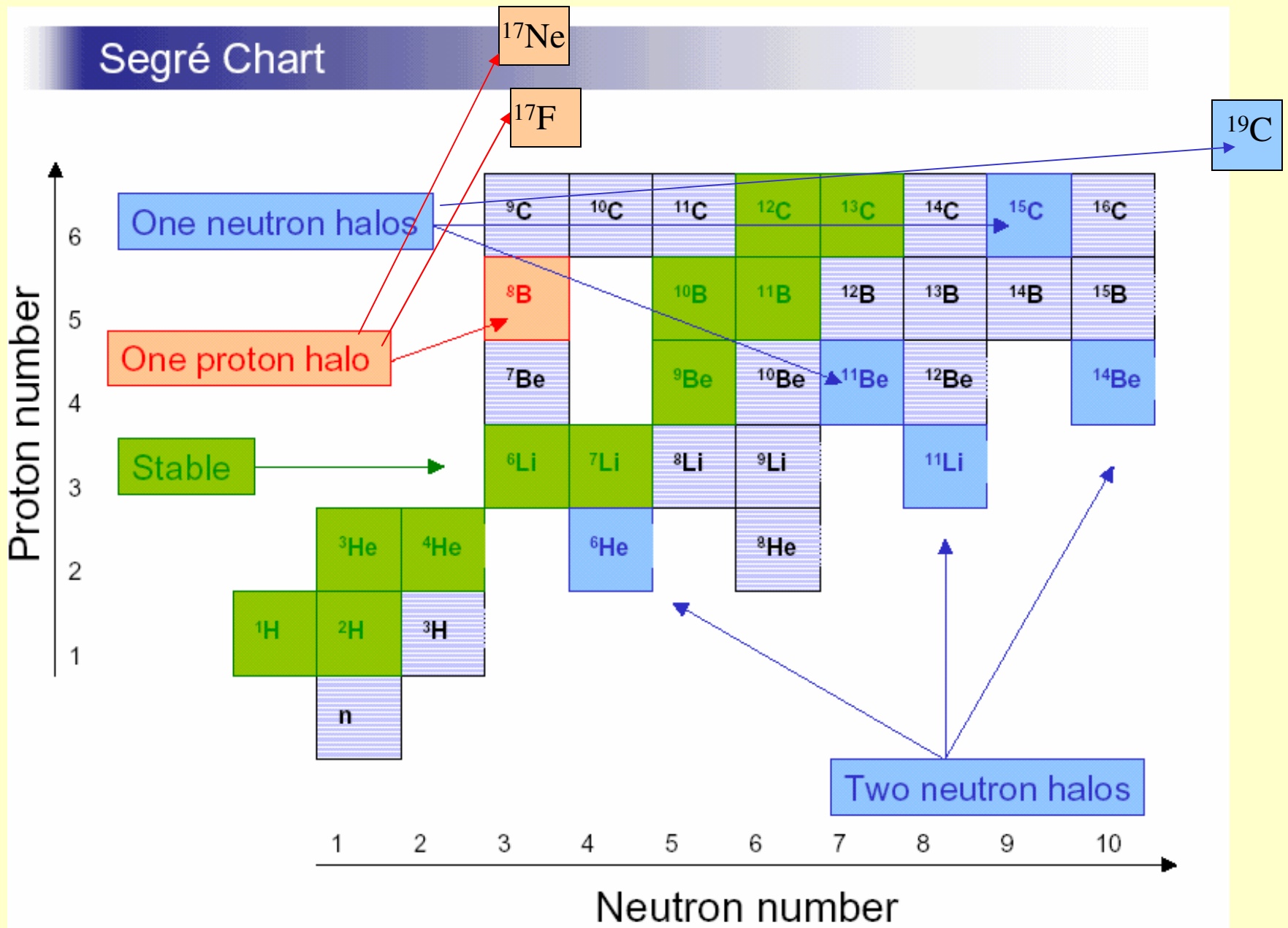


Przekrój czynny na reakcje $A + {}^{12}\text{C}$ dla energii wiązki $800A$ MeV

wyraźny wzrost σ
dla jąder halo



Segré Chart



Własności jąder halo

1. występowanie w pobliżu linii oderwania nukleonu
 - zjawisko progowe
2. nukleony halo charakteryzują się
 - małą energią wiązania
 - rozciągniętą funkcją falową
 - występują w stanach o $l = 0, 1$
3. znane są halo 1- i 2- nukleonowe

Porównanie potencjału jąder stabilnych i dalekich od ścieżki stabilności

Jądro stabilne

Jądro z nadmiarem neutronów

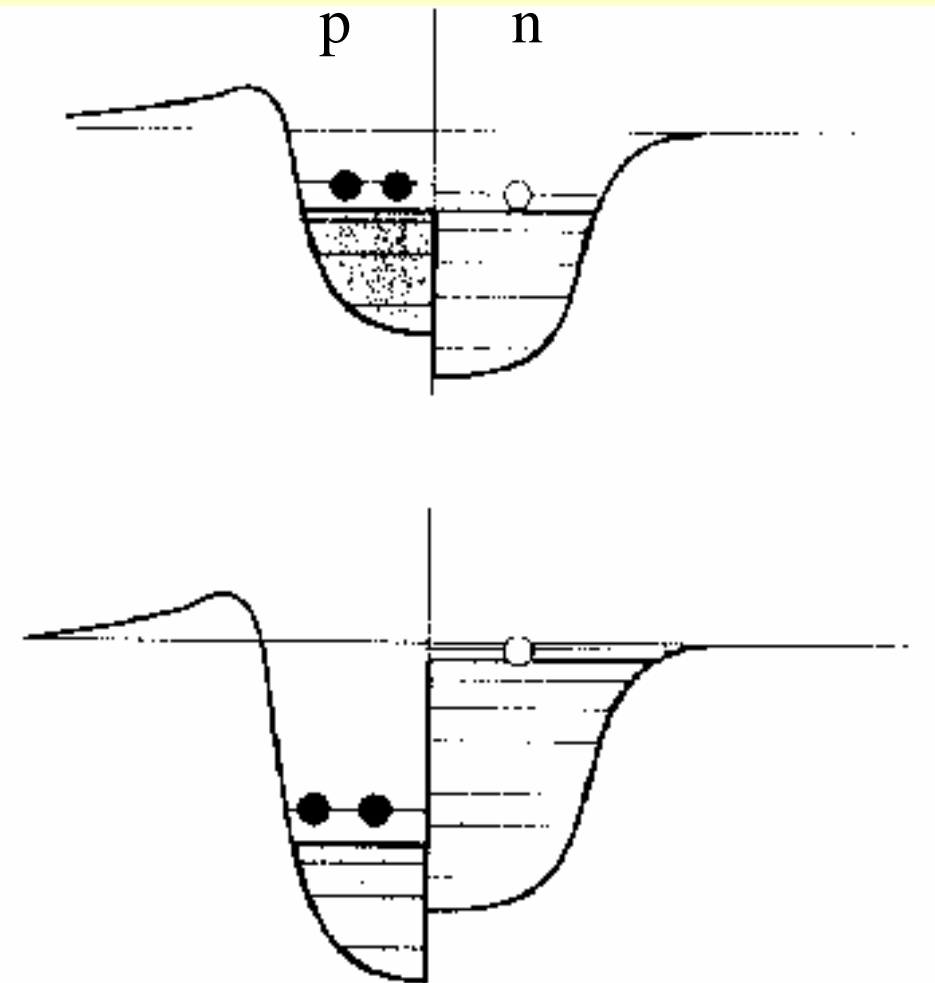
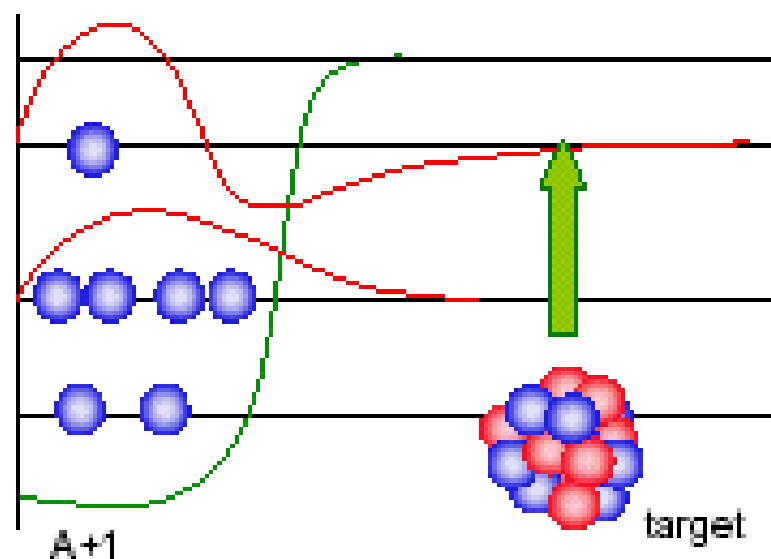
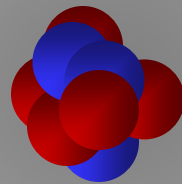


Fig. 1 Difference of the potential in stable and unstable nuclei.

Funkcja falowa nukleonu walencyjnego w jądrach w pobliżu linii oderwania nukleonu jest bardzo rozciągnięta



1-Neutronowe Halo



$$S_n < 1 \text{ MeV}$$

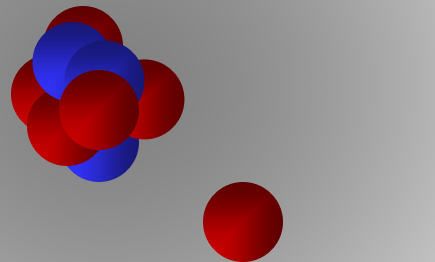
$$\ell_n = 0, 1$$

^{11}Be , ^{15}C , ^{19}C , ...

2-Neutronowe Halo

$$S_{2n} > 0$$

$$S_n(N-1) < 0$$



${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{14}\text{Be}$, ${}^{17}\text{B}$, ...

Metoda badania jąder halo

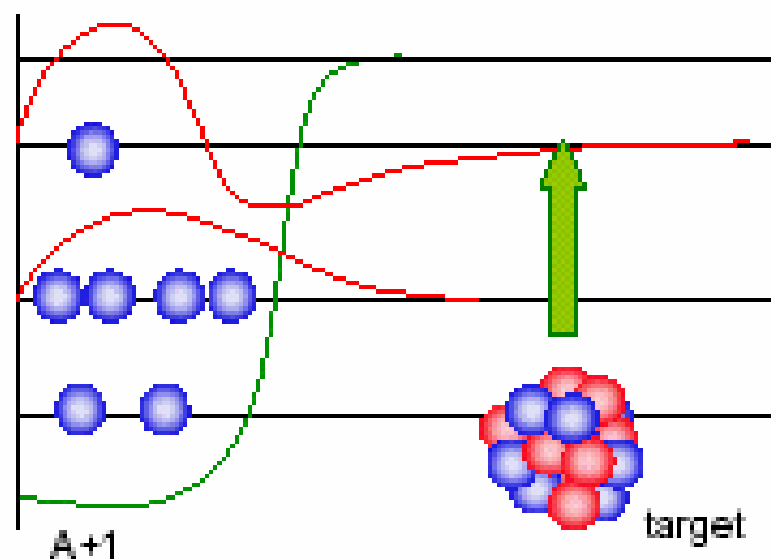
Wykorzystuje się wiązki radioaktywne uzyskane metodą fragmentacji (wysoka energia pocisków)

Przy wysokich energiach pocisków reakcje są:

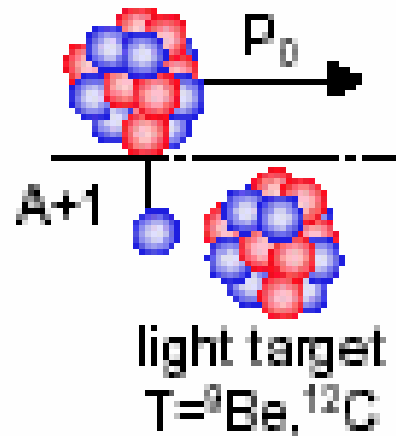
- a) bezpośrednie (ze względu na krótki czas oddziaływania w porównaniu do skali czasowej ruchu wewnętrznego nukleonów w jądrze), a więc zdominowane przez przejścia jednocząstkowe
- b) ograniczają się głównie do powierzchni jądra

Reakcje bezpośrednie są doskonałym próbnikiem jednocząstkowej struktury jądra

W reakcji powierzchniowej jest znacznie łatwiej wybić nukleon walencyjny niż nukleon rdzenia

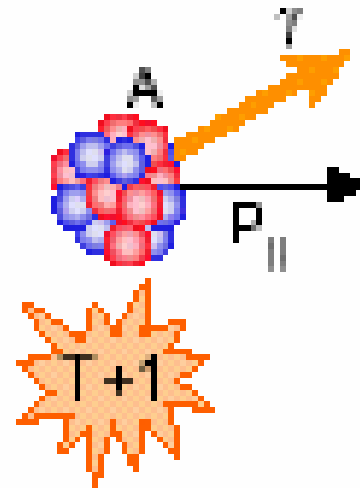


Mechanizm reakcji



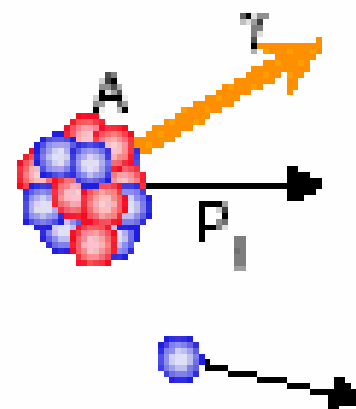
$$\sigma_{\text{knockout}} = \sigma_{\text{stripping}} + \sigma_{\text{break-up}}$$

Stripping



- Target excited, broken up, or just absorbs the neutron

Diffraction

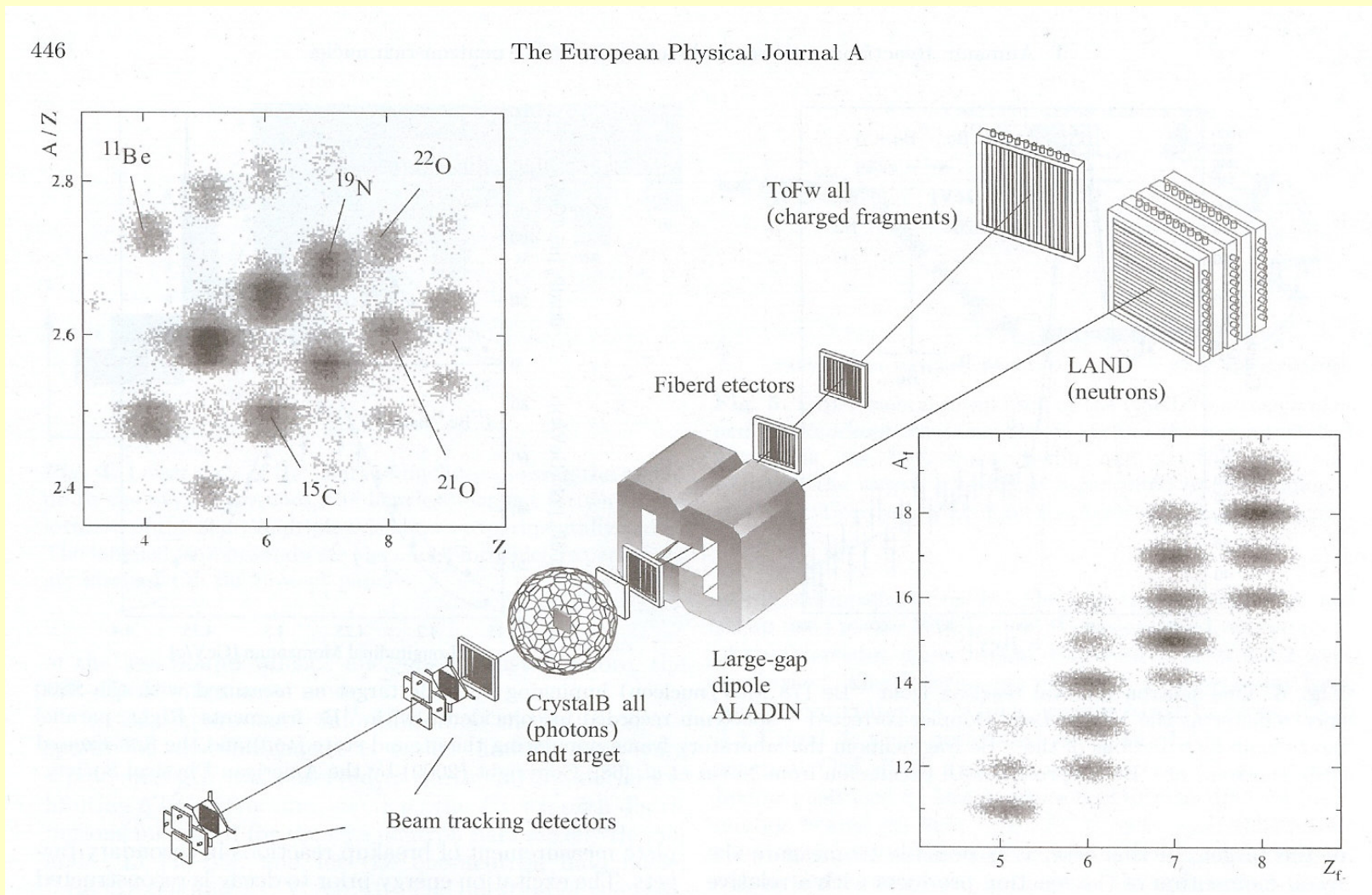


- elastic break-up of the projectile
- target remaining in its ground state

Układ eksperymentalny

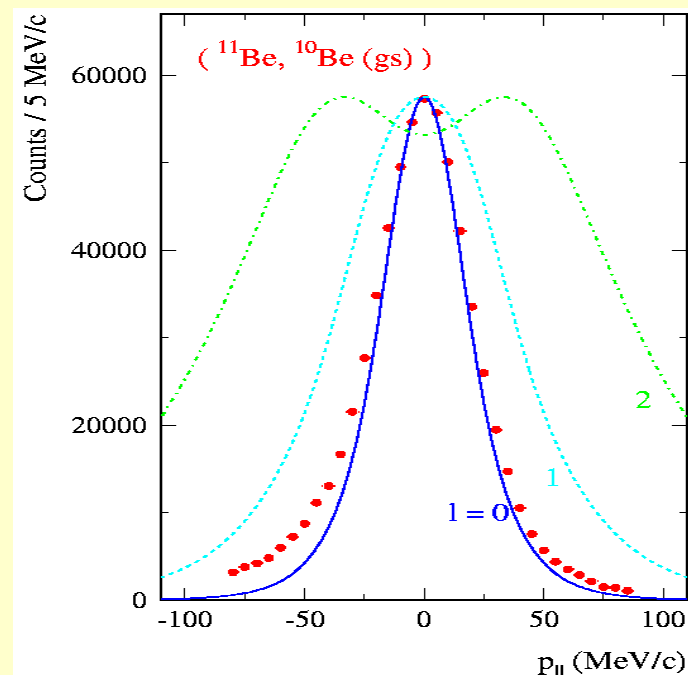
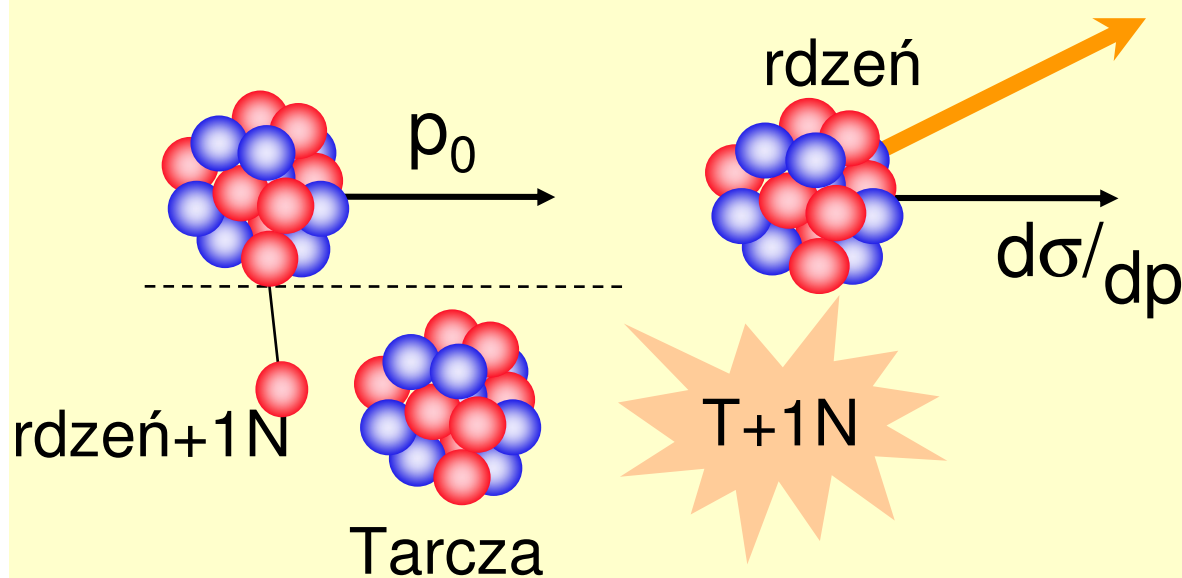
446

The European Physical Journal A



Eksperyment - zderzenie 1 nukleonu

1. $\sigma_{-1n} \sim 10-100\text{mb}$, $\rho_s \sim 100\text{ mg/cm}^2$
2. pomiar rozkładu pędu rdzenia γ

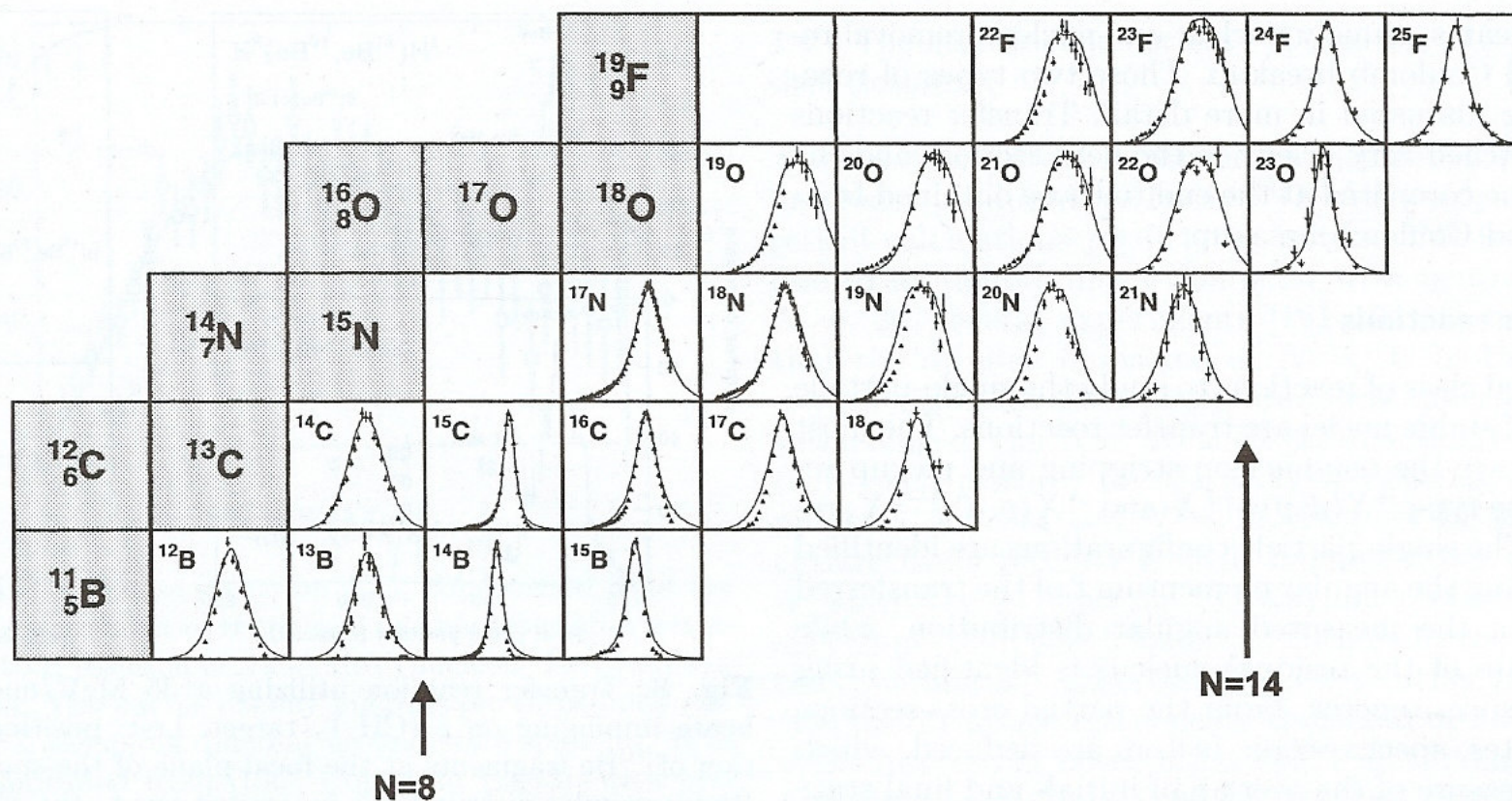


$$\gamma \Rightarrow E_{\text{core}}^x \quad d\sigma/dp \Rightarrow \ell_n \quad \sigma_{-1n}(J_{\text{core}}^\pi) \Rightarrow C^2S$$

REVIEW: Hansen, Tostevin, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. (2003)

Rozkład pędu rdzenia pocisku niesie informację o funkcji falowej oderwanego nukleonu

Mała szerokość rozkładu pędów – duże rozmycie położenia nukleonu w jądrze – struktura halo



1-neutronowe halo w ^{19}C

Energia separacji S_n 1-neutronu, przekrój czynny na oddziaływanie i szerokość rozkładu pędów wyznaczone w reakcji zderzenia 1 neutronu z pociskiem ^AC na tarczy ^{12}C

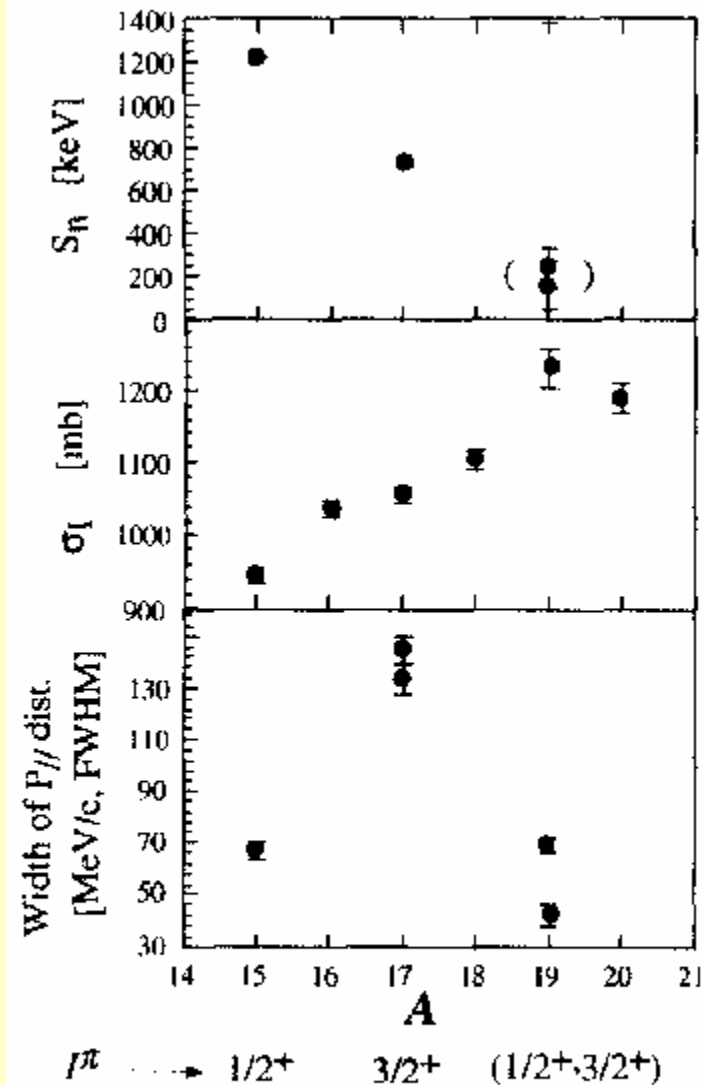
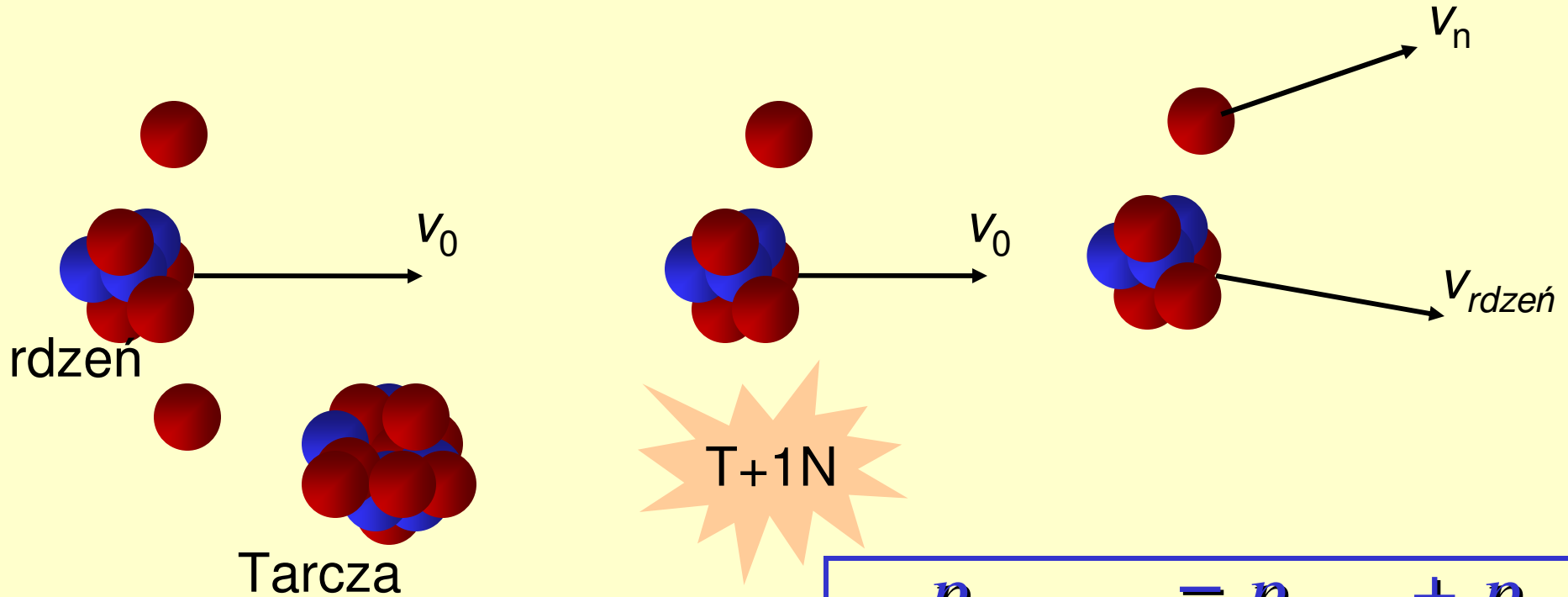


Fig. 6 Neutron separation energies, interaction cross sections with C target, and the width parallel momentum distribution of one-neutron removal cross sections.

2-neutronowe halo

Zdarcie 1-nukleonu i przejście do stanu niezwiązanego:
“kompletna kinematyka”

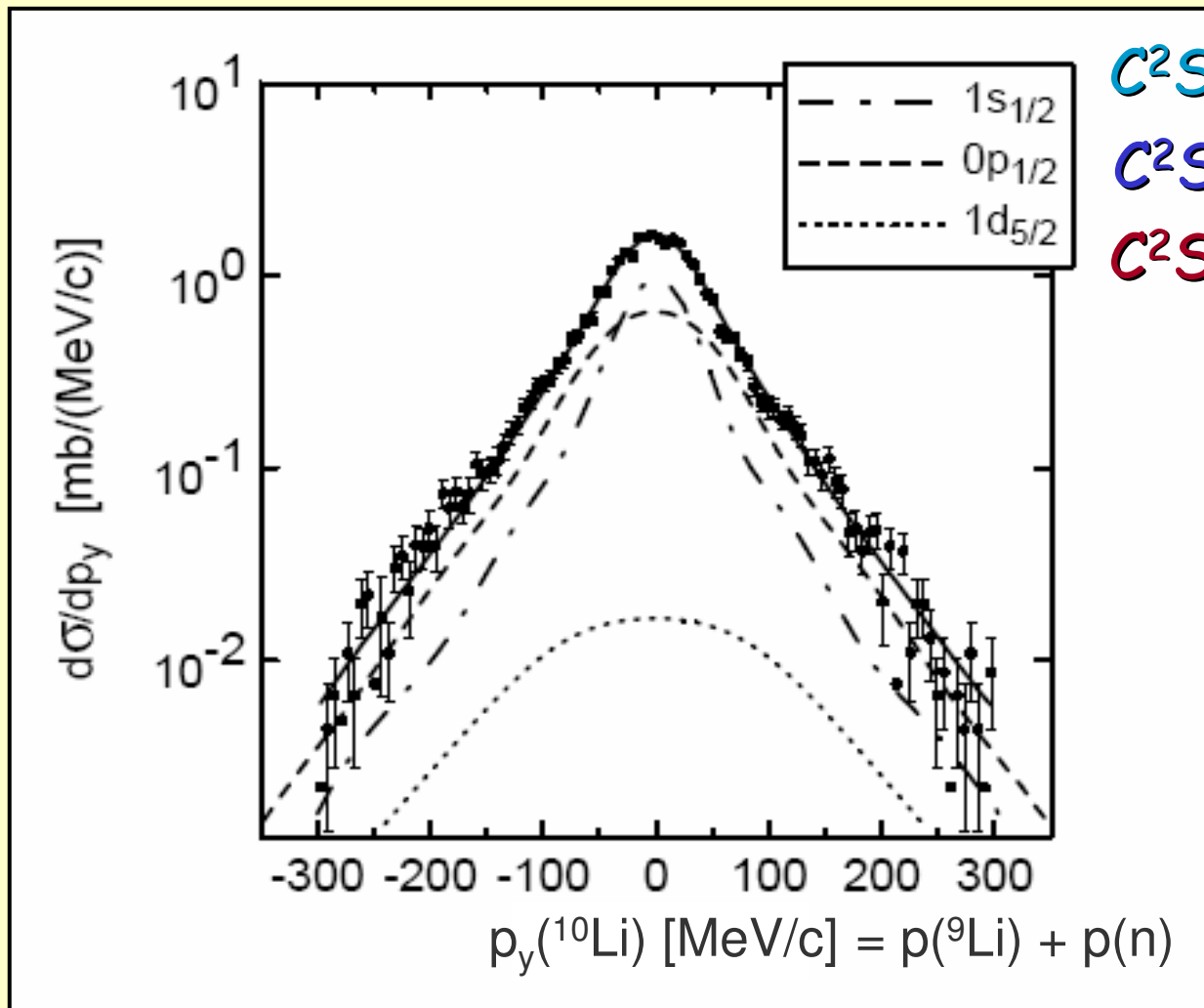


$$P_{rdzeń+n} = P_{rdzeń} + P_n$$

$$E_{wzg} = \mu (v_{rdzeń} - v_n)^2 / 2$$

$$\theta_{rdzeń-n}$$

$C(^{11}\text{Li}, ^9\text{Li}+n)$ @ 287 MeV/nucleon *



$$C^2S(v_{s_{1/2}}) \approx 0.65$$

$$C^2S(v_{p_{1/2}}) \approx 1.27$$

$$C^2S(v_{d_{5/2}}) \approx 0.08$$

* H. Simon et al., PRL (1999)

Glauber Theory: CA Bertulani, PG Hansen, nucl-th/0407026

Opis teoretyczny jąder halo

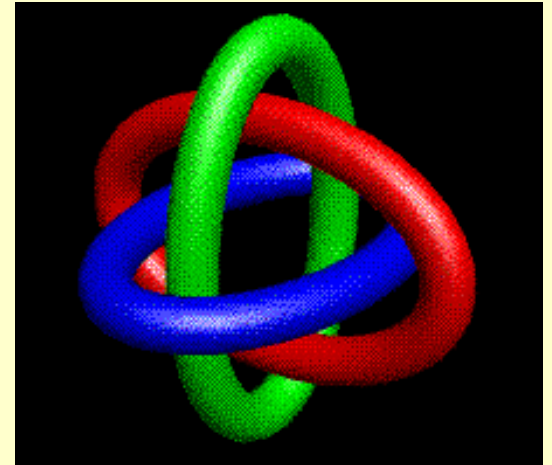
1. Model powłokowy nie opisuje podstawowych własności jąder halo

2. Model wielociałowy

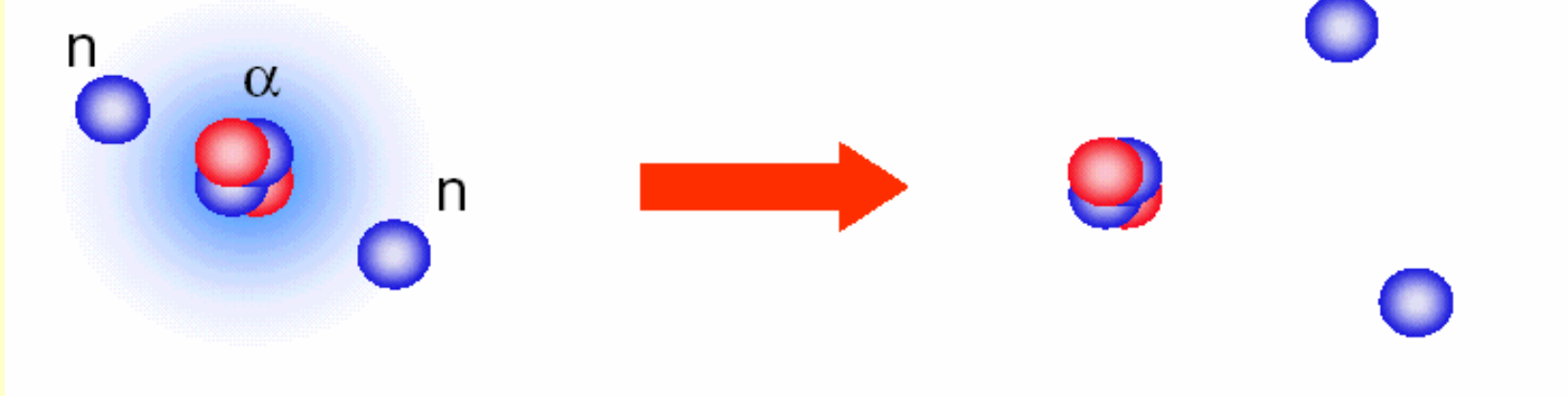
jądra z halo 1-neutronowym: układ 2-ciałowy (rdzeń + nukleon) związany przez potencjał oddziaływania

jądra z halo 2-neutronowym: układ 3-ciałowy wymaga rozwiązania 3-ciałowego równania Schrödingera

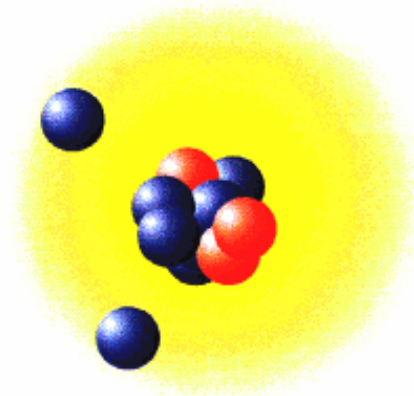
Borromean Systems



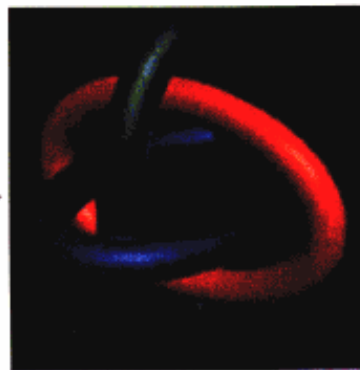
Jądra o strukturze $2n$ - halo trzeba traktować jak układy 3-ciałowe; uwzględnienie oddziaływań pomiędzy wszystkimi 3 ciałami jest konieczne do istnienia takiego jądra w stanie związanym np. ${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$



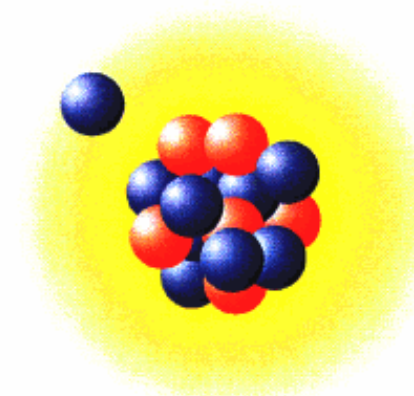
Takie podejście teoretyczne jest poparte przez obserwacje eksperymentalne - w reakcji break-up ${}^6\text{He}$ czy ${}^{11}\text{Li}$ obserwowane są zawsze 3, a nigdy 2 produkty.



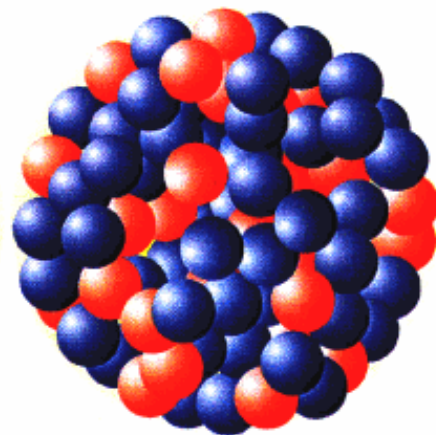
**^{11}Li : Borromean
Halo Nucleus**



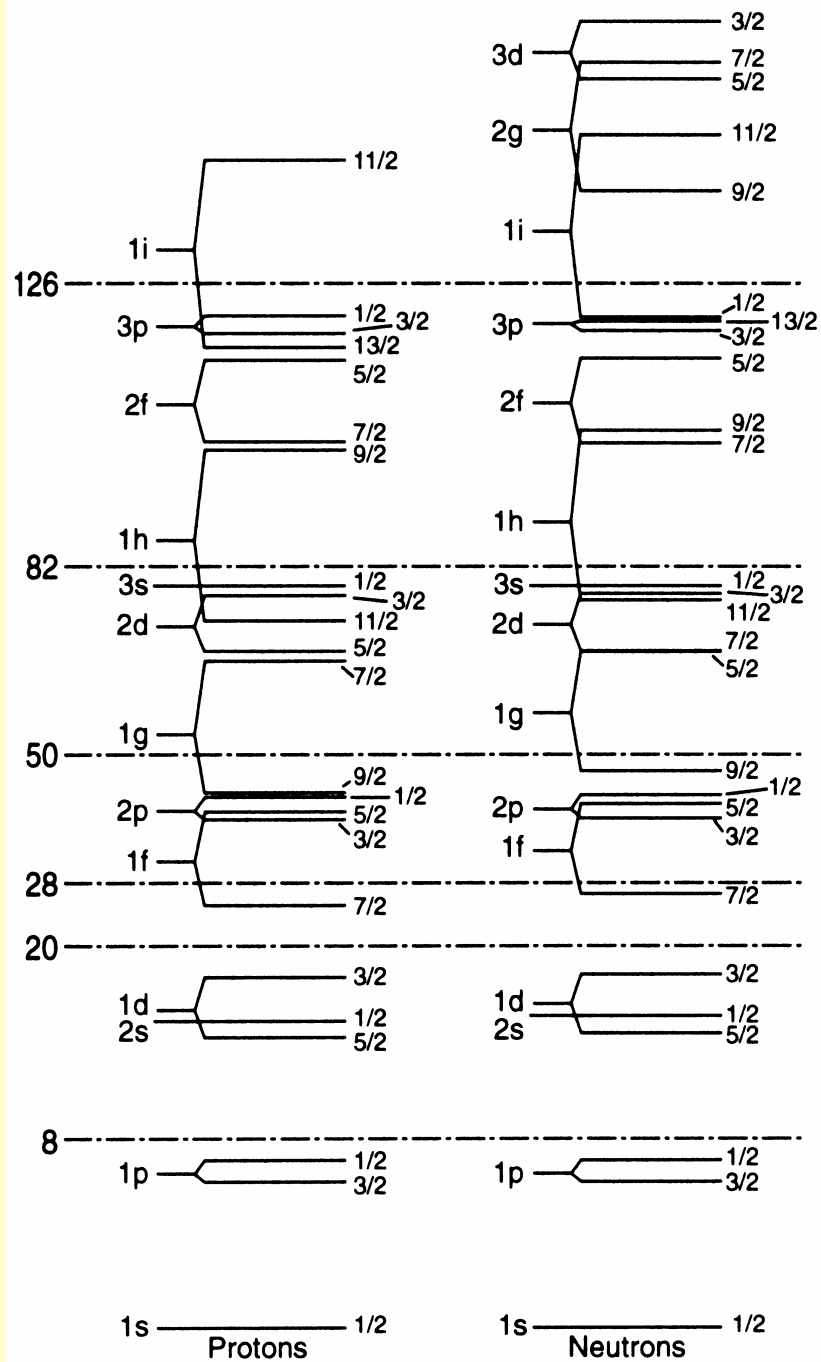
**The Borromean
Rings**



**^{19}C : The Heaviest
Known Halo Nucleus**

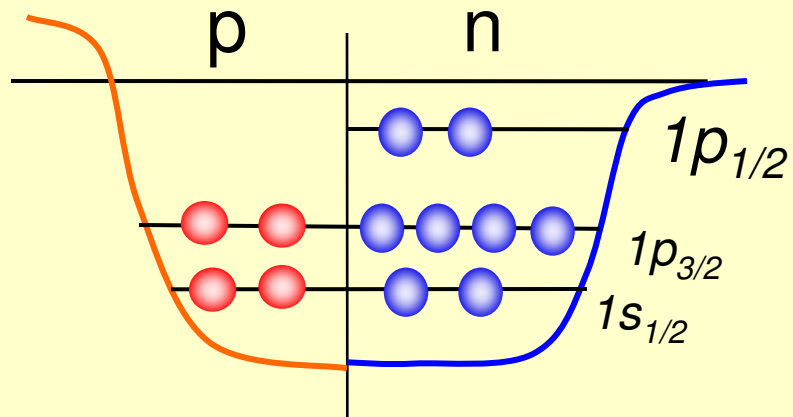


**^{208}Pb : Well Bound
Heavy Nucleus**



Schemat poziomów w modelu powłokowym

Struktura ^{12}Be



Closed p-shell
in ^{12}Be

Struktura ^{12}Be

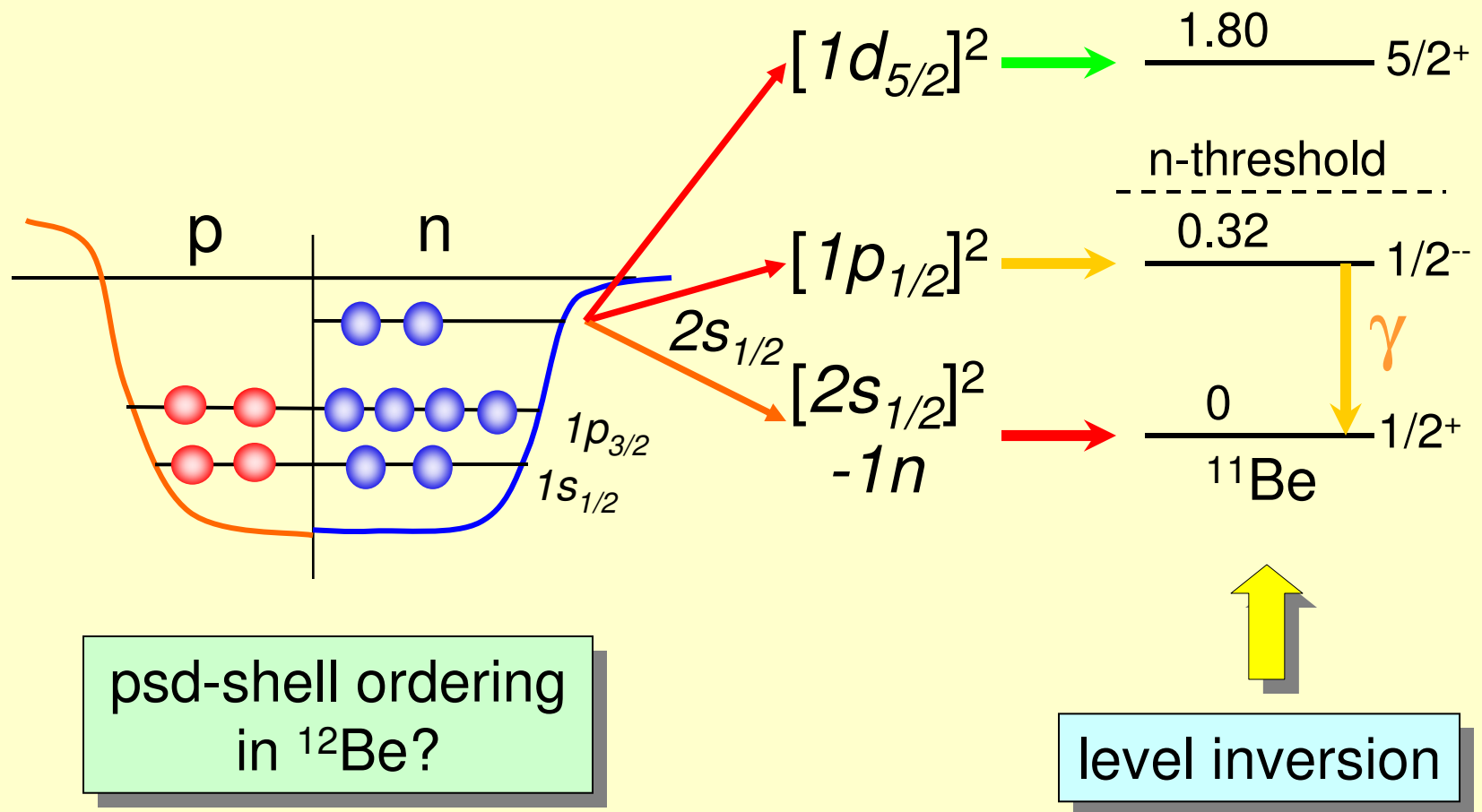


Figure courtesy Jeff Tostevin, Surrey

**Czy struktura halo istnieje
w cięższych jądrach?**