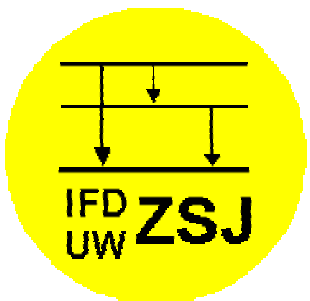
Radiacyjny wychwyt elektronu w przemianach wzbronionych

zagadka wciąż nierozwiązana



Marek Pfützner

Zakład Spektroskopii Jądrowej

Seminarium *Struktura Jądra Atomowego* 23 listopada 2005

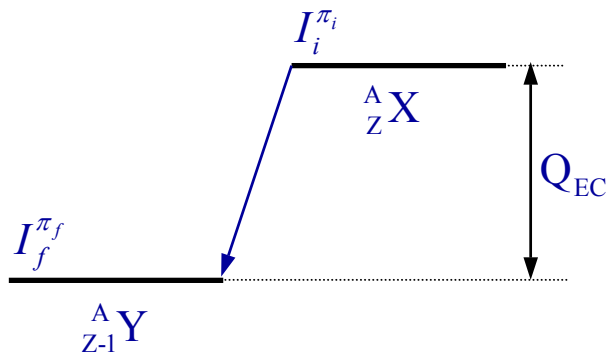
Plan

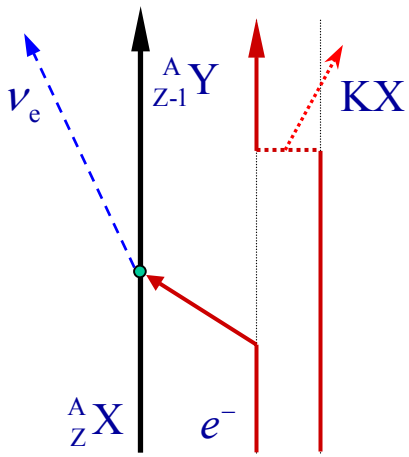
- Podstawy: wychwyt elektronu (EC) i jego radiacyjna odmiana (REC)
- Przegląd wyników uzyskanych w ZSJ
- Elementy opisu teoretycznego REC
- Przypomnienie wyników dla ^{41}Ca, ^{59}Ni – postawienie problemu
- Model Kalinowskiego przejść okrężnych
- Kolejny problem: ^{204}Tl,
- Ostatni eksperyment: ^{81}Kr
- Wnioski i podsumowanie

Wychwyt elektronu

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} + e^{-} \rightarrow {}^{A}_{Z\text{-}1}\mathrm{Y}^{*} + \nu_{e} $$

$$ \rightarrow {}^{A}_{Z\text{-}1}\mathrm{Y} + n\mathrm{X} $$





Energia neutrina: $Q_\nu = Q_{EC} - B_n$

Koncentrujemy się na:

- przemianach między stanami podstawowymi
- wychwytach z powłoki K (1s)
- przemianach wzbronionych

$$ \left| I_i - I_f \right| = 2 $$

$\pi_i \neq \pi_f$ (1u) 1st forbidden unique

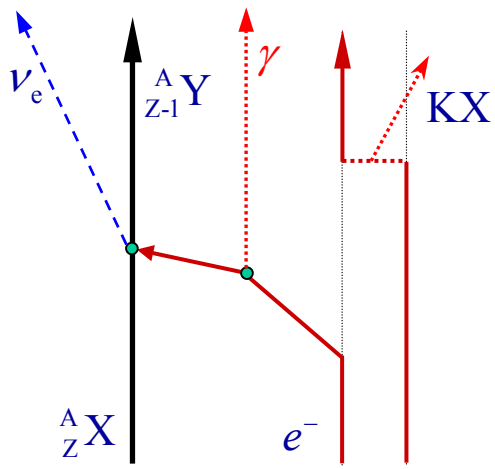
$\pi_i = \pi_f$ (2nu) 2nd forbidden nonunique

Radiacyjny wychwyt elektronu (REC)

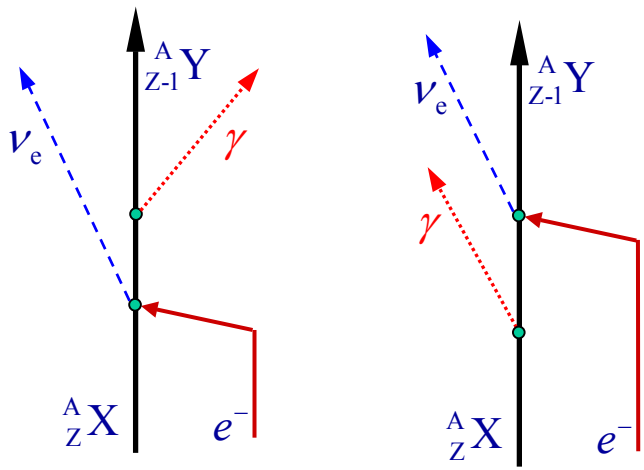
$$ {}^{A}_{Z}X + e^{-} \rightarrow {}^{A}_{Z\text{-}1}Y^{*} + \nu_e + \gamma $$

$$ {}^{A}_{Z\text{-}1}Y + nX $$

Energia fotonu (i neutrina) w przedziale od 0 do $Q_{\max} = Q_{EC} - B_n$



wewnętrzne promieniowanie hamowania
(IB - internal bremsstrahlung)



przejścia okrężne (detour)

W doświadczeniu mierzymy widmo fotonów γ w koincydencji z fotonami KX(Z-1) → wybieramy w ten sposób składową REC-1s

REC w przemianach dozwolonych

Zaawansowany model teoretyczny mechanizmu IB:

R.J. Glauber (!), P.C. Martin, Phys. Rev. 104 (1956) 158.

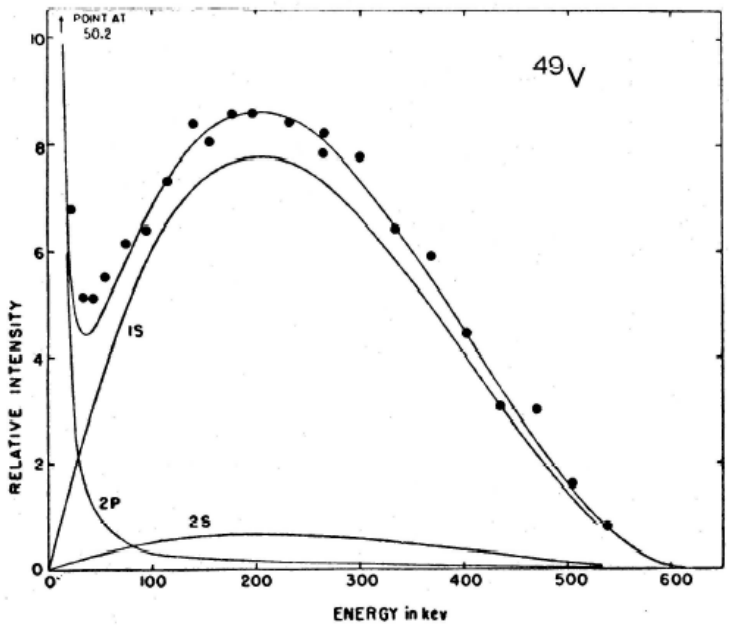
Liczne pomiary radiacyjnego wychwytu elektronu w przemianach dozwolonych wykazały dobrą zgodność z modelem Glaubera, Martina

➔ mechanizm przejść detour nie wnosi żadnego wkładu!

Przykład:

przemiana dozwolona

$^{49}V \rightarrow {}^{49}Ti$



Hayward & Hoppes, PR104 (1956) 183.

REC w przemianach wzbronionych

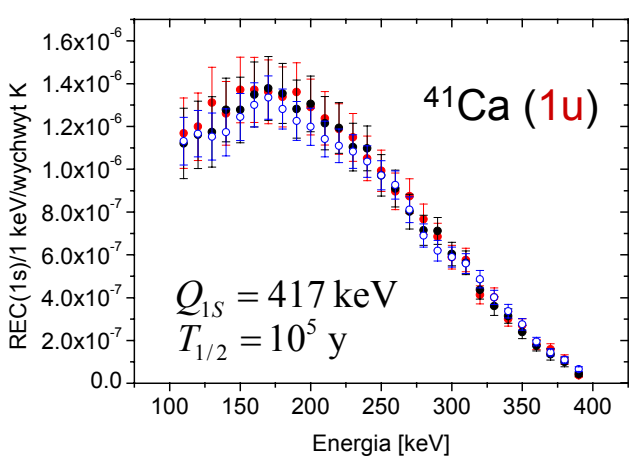
Zaawansowany model teoretyczny IB dla dowolnego stopnia wzbronienia:
B.A. Zon, L.P. Rapoport, Sov. J. Nucl. Phys. 7 (1968) 330.

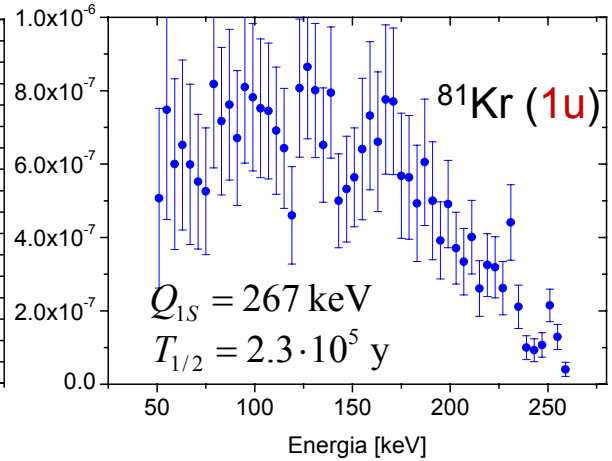
Brak danych na temat zjawiska REC towarzyszącego przemianom wzbronionym skłonił prof. J. Żylicza do zainicjowania tych badań w ZSJ
→ test teorii ZR i poszukiwanie wkładu przejść okrężnych.

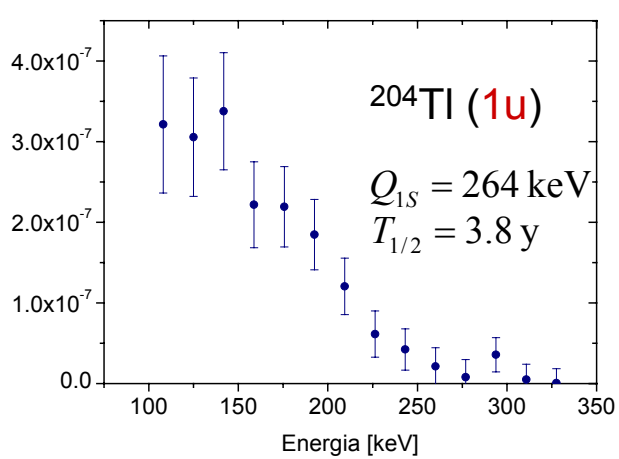
Od 1983 r. zbadaliśmy następujące przypadki:

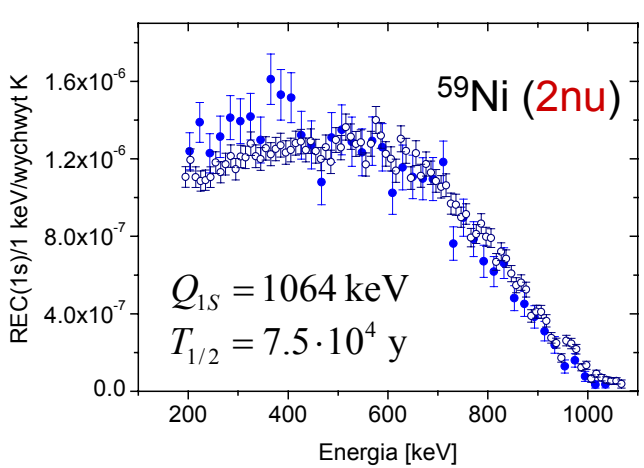
- ^{41}Ca ($7/2^-$) → ^{41}K ($3/2^+$) 1u P.Hornshoj i in., Nucl. Phys. A472 (1987) 139.
- ^{59}Ni ($7/2^-$) → ^{59}Co ($3/2^-$) 2nu Z.Janas i in., Nucl. Phys. A524 (1991) 391.
- ^{137}La ($7/2^+$) → ^{137}Ba ($3/2^+$) 2nu M.Pfützner i in., Nucl. Phys. A611 (1996) 270.
- ^{204}Tl (0^+) → ^{204}Hg (2^-) 1u J.Kurcewicz i in., Nucl. Phys. A728 (2003) 3.
- ^{81}Kr ($7/2^+$) → ^{81}Br ($3/2^-$) 1u E.Werner-Malento, praca mag. WF UW 2005.

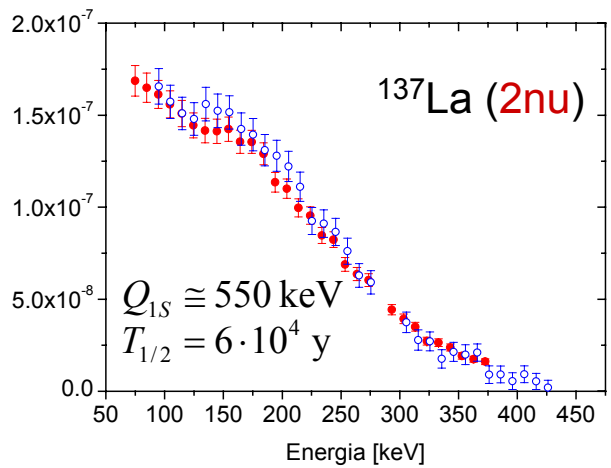
Zmierzone widma REC-1s











Wszystkie widma są znormalizowane na jeden bezradiacyjny wychwyt K

Elementy teorii

W najprostszym podejściu (Morrison, Schiff, 1940) rozkład prawdopodobieństwa emisji fotonu REC-1s o energii k, na jeden bezpromienisty wychwyt K wynosi:

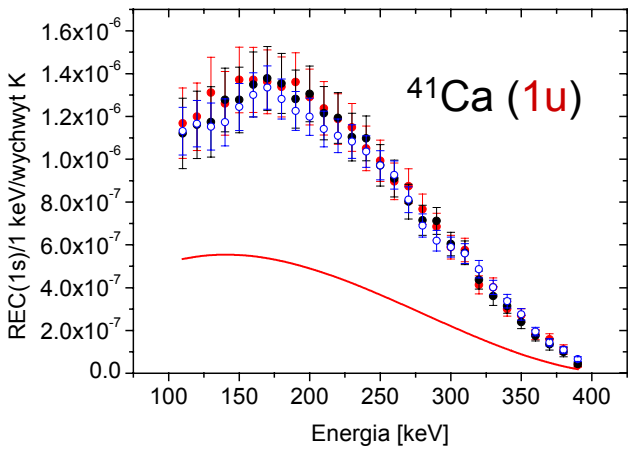
$$\left(\frac{dw_{1s}^{IB}}{w_{1s}}\right)_{MS} = \frac{\alpha}{\pi(mc^2)^2}\frac{k(q_{1s}-k)^2}{q_{1s}^2}dk$$

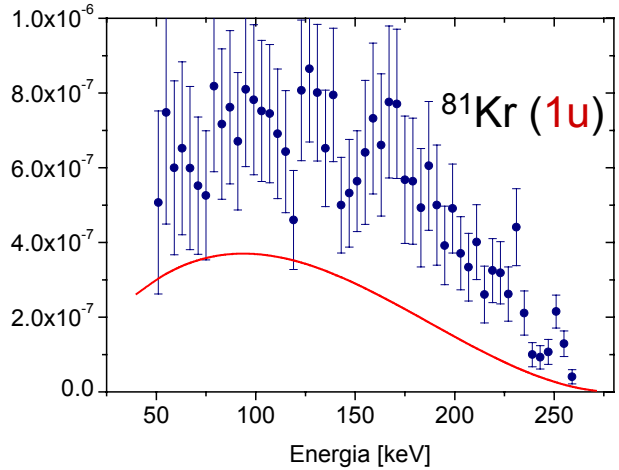
Przewidywania bardziej zaawansowanych modeli przedstawia się w postaci:

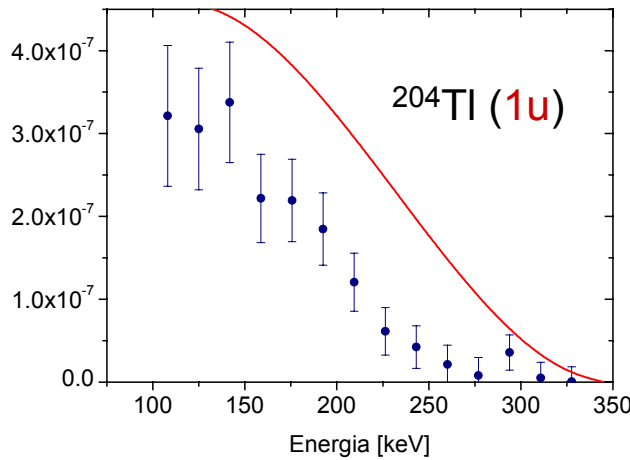
$$\frac{dw_{1s}^{REC}}{w_{1s}} = \left(\frac{dw_{1s}^{IB}}{w_{1s}}\right)_{MS} \cdot R_{1s}(k)$$

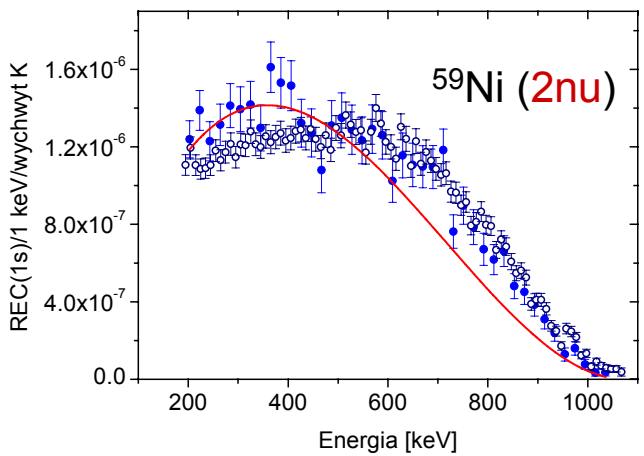
$R_{1s}(k)$ - czynnik kształtu

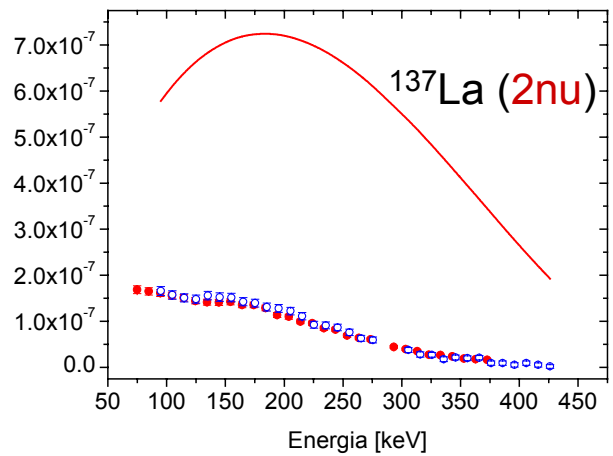
Zmierzone widma REC-1s











Czerwona linia pokazuje przewidywanie modelu Morrisona, Schiffa

$$\frac{dw_{1s}^{REC}}{w_{1s}} = \left(\frac{dw_{1s}^{IB}}{w_{1s}}\right)_{MS} \cdot R_{1s}(k)$$

$R_{1s}(k)$ - czynnik kształtu

Przy zaniedbaniu efektów kulombowskich dla przemian o $\Delta I = 2$:

$$\left(R_{1s}^{IB}\right)_{CF} = \left(1 - \frac{k}{q_{1s}}\right)^2 + \Lambda\left(\frac{k}{q_{1s}}\right)^2$$

Λ - kombinacja jądrowych elementów macierzowych

W pełnym modelu Zona, Rapoporta, dla przemian o $\Delta I = 2$:

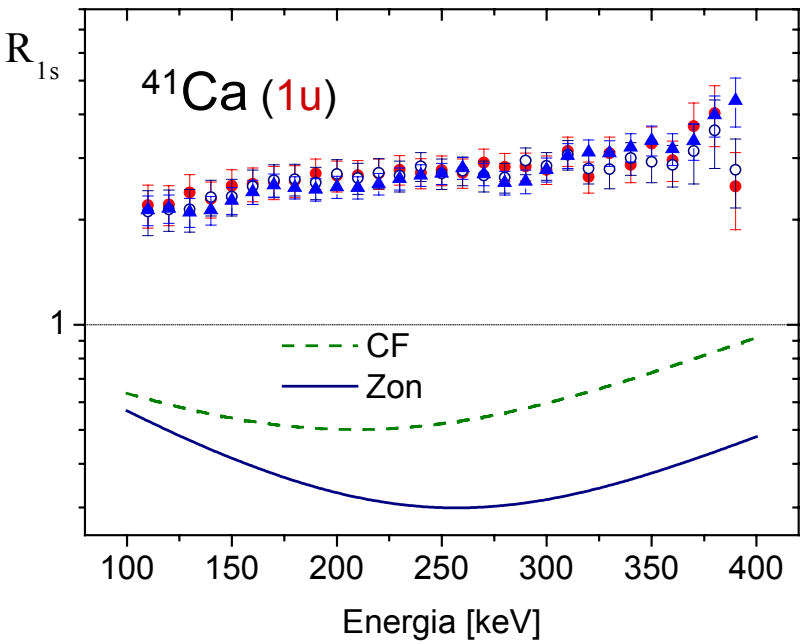
$$\left(R_{1s}^{IB}\right)_{ZR} = \left(1 - \frac{k}{q_{1s}}\right)^2 R_{1s}^{(1)}(k) + \Lambda\left(\frac{k}{q_{1s}}\right)^2 R_{1s}^{(2)}(k)$$

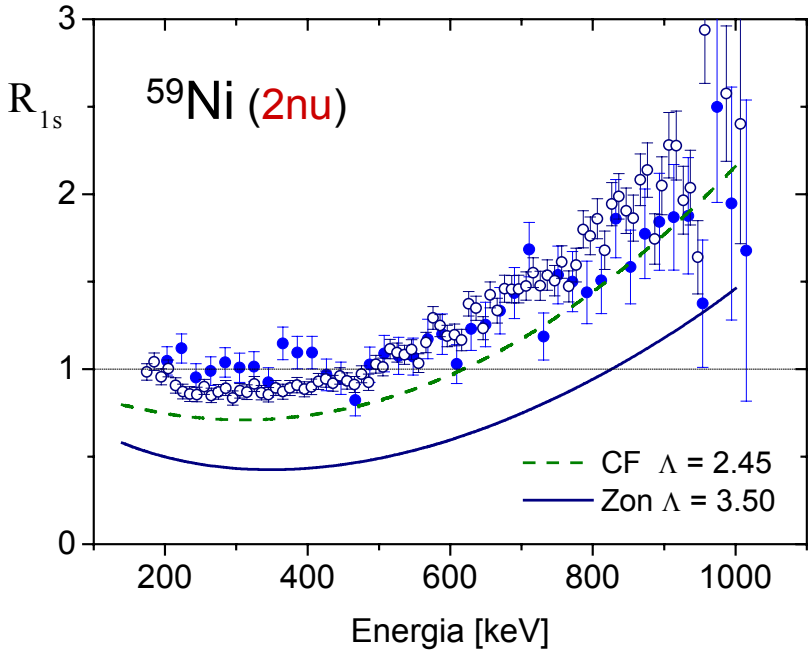
gdzie $R_{1s}^{(1)}(k),\ R_{1s}^{(2)}(k)$ to tzw. funkcje Zona, obliczane numerycznie.

Dla przemian typu 1u $\Lambda \equiv 1$

➔ widmo IB nie zależy wtedy od jądrowych elementów macierzowych !!!

Zagadka

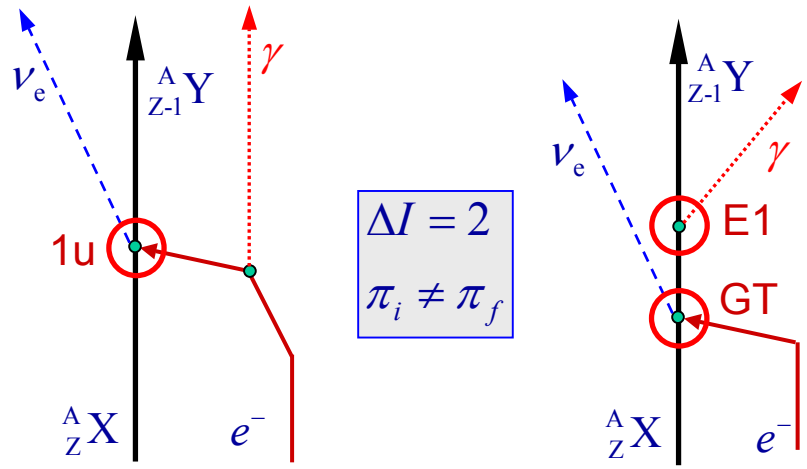




W ^{41}Ca obserwujemy 5-krotnie więcej promieniowania niż przewiduje model CF i 6-krotnie więcej niż model ZR!

W ^{59}Ni obserwujemy 2-krotnie więcej promieniowania niż przewiduje model ZR. Ale wartość Λ dobrano tak, aby uzyskać zgodność kształtu.

Model przejść okrężnych Kalinowskiego



Model Kalinowskiego opiera się na obserwacji, że operator przemiany 1u można przedstawić jako złożenie operatorów przemiany dozwolonej GT i przejścia E1.

Podobnie, przemiana 2nu odpowiada złożeniu przemiany 1nu i E1.

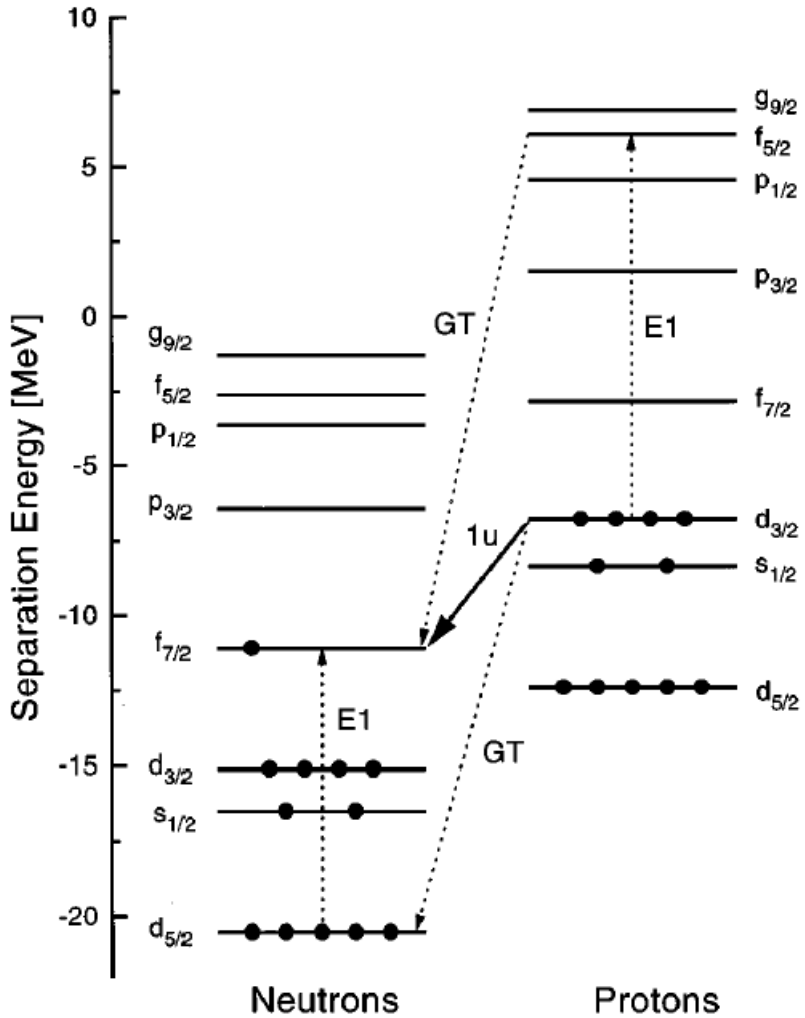
➔ Przejścia okrężne mogą konkurować z promieniowaniem hamowania (IB) towarzyszącym przemianom o wyższym stopniu wzbronienia.

Ł. Kalinowski, Nucl. Phys. A551 (1993) 473

Ł. Kalinowski i in., Nucl. Phys. A537 (1992) 1

Przykład: obraz jednocząstkowy przemiany $^{41}Ca \rightarrow {}^{41}K$

$$\pi\, d_{3/2} \rightarrow \nu\, f_{7/2}$$



W modelu Kalinowskiego czynnik kształtu widma REC-1s ma postać:

$$\left(R_{1s}^{REC}\right)_{DT} = \left(R_{1s}^{IB}\right)_{ZR} + 2\left(\frac{e_{eff}\, m_e}{q_{1s}}\right)^2 + \sqrt{\Lambda}\, A_{1s}^{21}(k)\frac{e_{eff}\, m_e k}{q_{1s}^2}$$

$A_{1s}^{21}(k)$ - jedna z funkcji Zona (składnik $R_{1s}^{(2)}(k)$) obliczana numerycznie.

e_{eff} - ładunek efektywny: $e_{eff} = e_{eff}^{(i)} - e_{eff}^{(f)}$,

Dla przemiany 1u:

$$e_{eff}^{(i)} = \frac{1}{e}\sum_n \sqrt{\frac{4\pi}{2I_n+1}}\frac{\langle f\|T(GT)\|n\rangle\langle n\|T(E1)\|i\rangle}{\langle f\|T(1u)\|i\rangle}$$

$$e_{eff}^{(f)} = \frac{1}{e}\sum_n \sqrt{\frac{4\pi}{2I_n+1}}\frac{\langle f\|T(E1)\|n\rangle\langle n\|T(GT)\|i\rangle}{\langle f\|T(1u)\|i\rangle}$$

$$T(E1) = \left[e_\pi \frac{1-\tau_0}{2} + e_\nu \frac{1+\tau_0}{2}\right] r Y_1$$

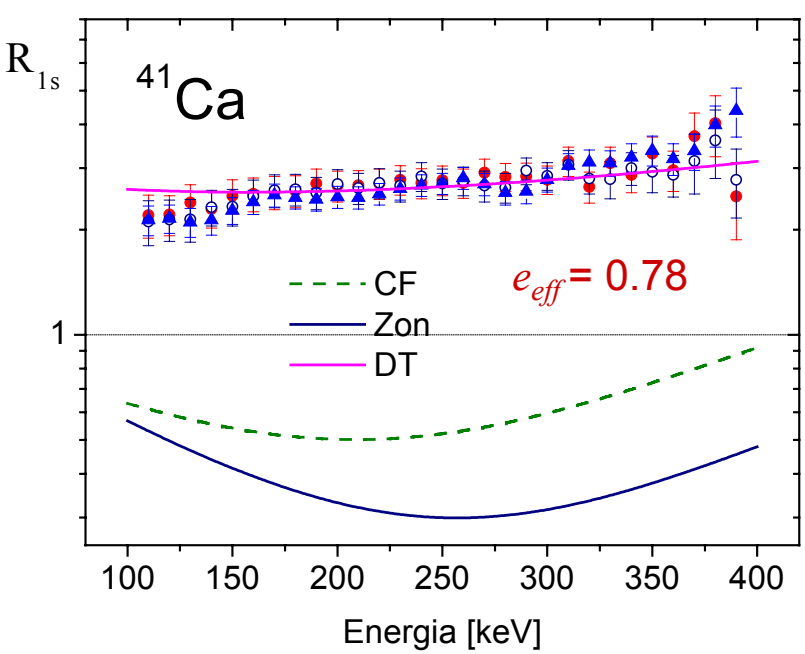
$$T(GT) = \frac{\lambda}{\sqrt{4\pi}}\sigma\tau_+$$

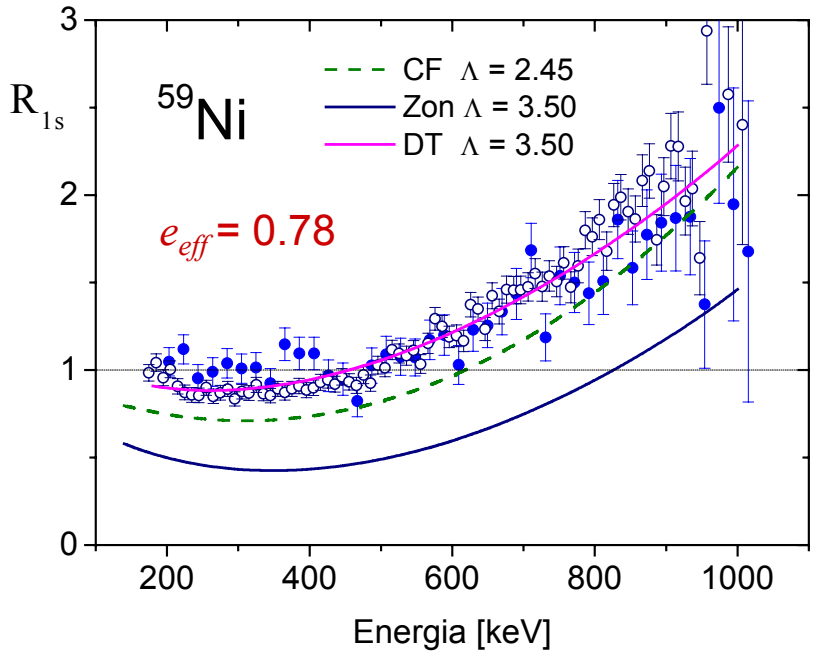
$$T(1u) = \lambda r(\sigma Y_1)_2 \tau_+$$

W przybliżeniu wartość e_{eff} powinna być bliska jedności.

Zwykle traktujemy ją jako wolny parametr.

Rozwiązanie zagadki (?)

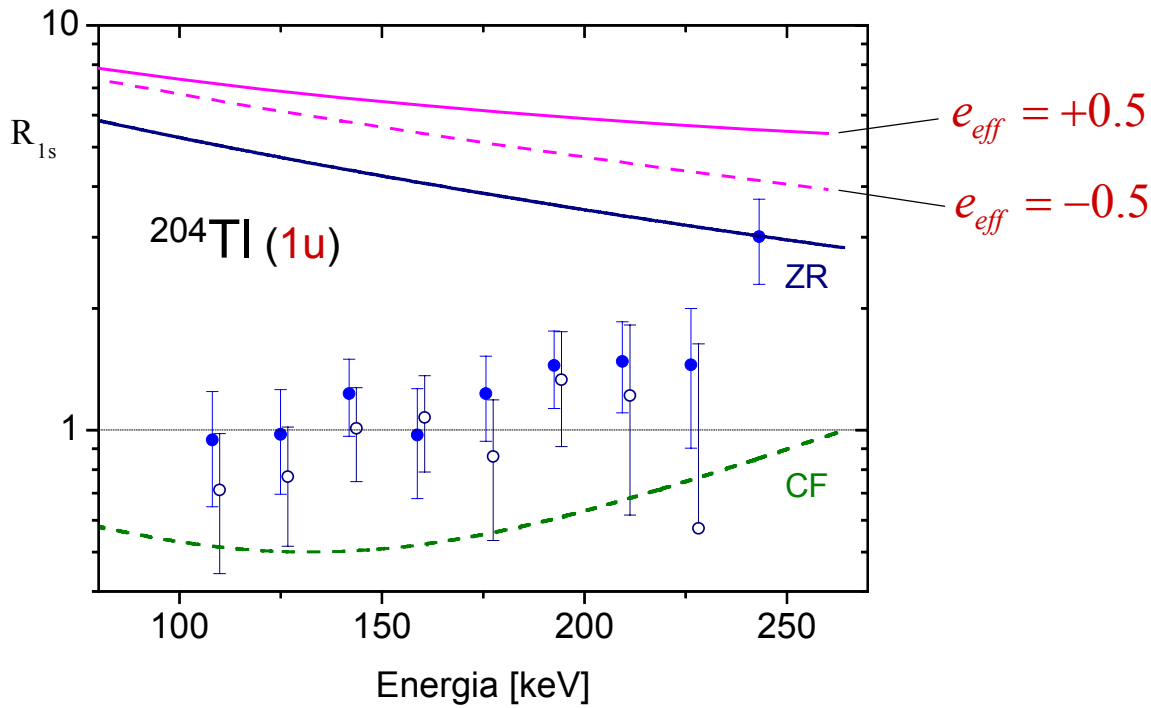




Dodanie wkładu przejść okrężnych do mechanizmu IB pozwala dobrze opisać kształt i intensywność widma REC-1s w ^{41}Ca i ^{59}Ni.

Wątpliwość: pomiar stosunku β^+/K dla ^{59}Ni sugeruje jednak, że $\Lambda = 1.0 \pm 0.3$

Przypadek ^{204}Tl



W ^{204}Tl obserwujemy 2-krotnie więcej promieniowania niż przewiduje model CF ale 4-krotnie mniej niż model ZR!

Dodanie przejść okrężnych do modelu ZR tylko pogarsza sytuację, niezależnie od znaku e_{eff} !

Ostatni eksperyment: ^{81}Kr

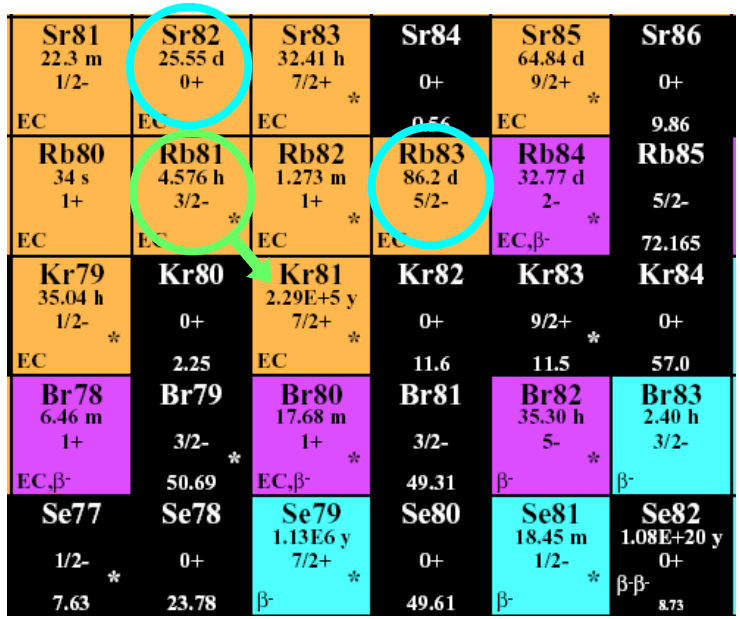
Historia próbki ^{81}Kr:

- propozycja eksperymentu w ISOLDE – początek 1996
- pierwsze naświetlanie – VIII 1998, awaria targetu po kilku zmianach,
- drugie naświetlanie – VI 1999, awaria zasilania w CERN,
- trzecie naświetlanie – VIII 2000, udane,
- monitorowanie kontaminacji (w ramach III Pracowni 2001, 2002, 2003),
- pomiar REC w koincydencji z Br-KX – I-II 2005 (praca mag. E. Werner-Malento)

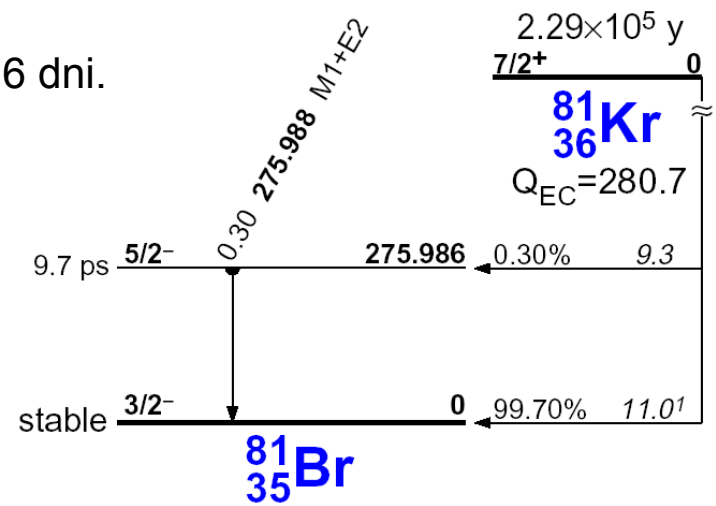
Produkcja ^{81}Kr na separatorze ISOLDE:

- kruszenie tarczy ^{93}Nb wiązką protonów (1GeV), 3×10^{13} p/puls,
- separacja masowa produktów o masie A = 81,
- implantacja produktów (o energii 50 keV) w folię aluminiową.

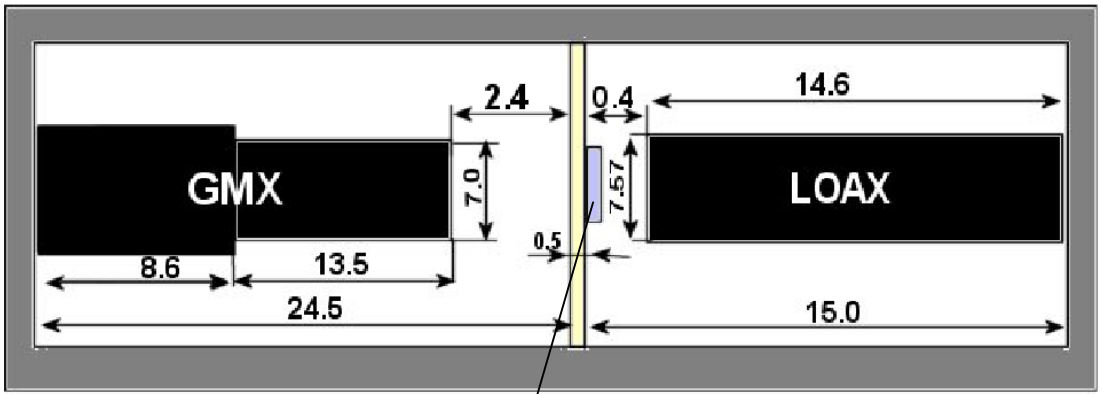
- Głównym produktem był ^{81}Rb, który po zatrzymaniu w folii przechodził w ^{81}Kr.
- Najważniejsze zanieczyszczenia, ^{82}Sr i ^{83}Rb, produkowane z natężeniem $\approx 10^{-5}$ (!) w stosunku do ^{81}Rb uniemożliwiły badanie zjawiska REC przez 5 lat od naświetlania!
- Końcowa próbka zawierała ok. 4×10^{15} atomów ^{81}Kr (≈ 0.5 μg).



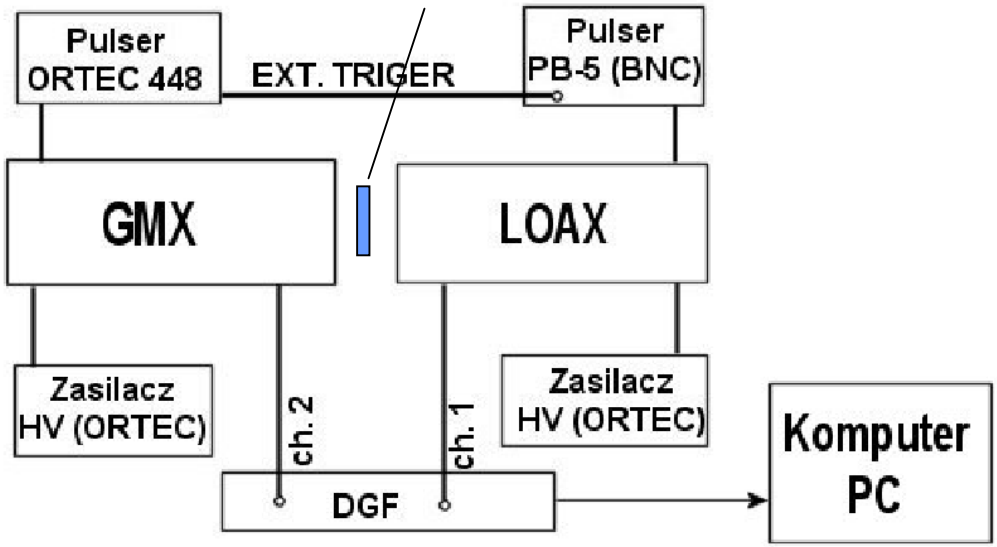
- Pomiar koincydencyjny γ-REC – KX trwał 38.6 dni. Intensywność promieniowania Br-KX wynosiła ok. 100 zliczeń/s, Dobre zdarzenie koincydencyjne występowało średnio co 15 min.



Układ doświadczalny

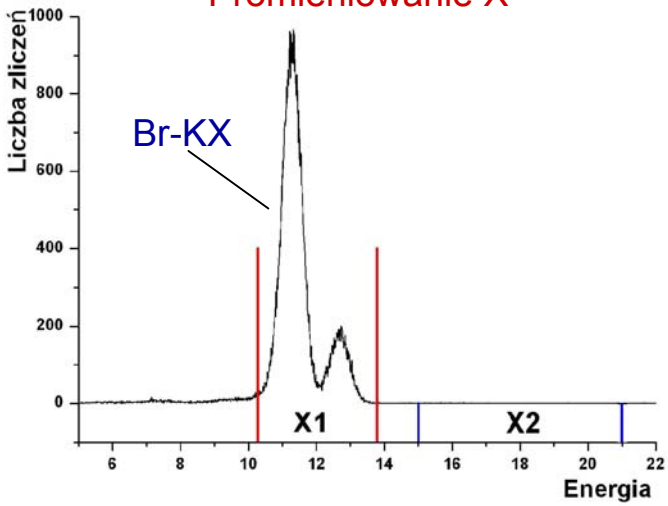


źródło

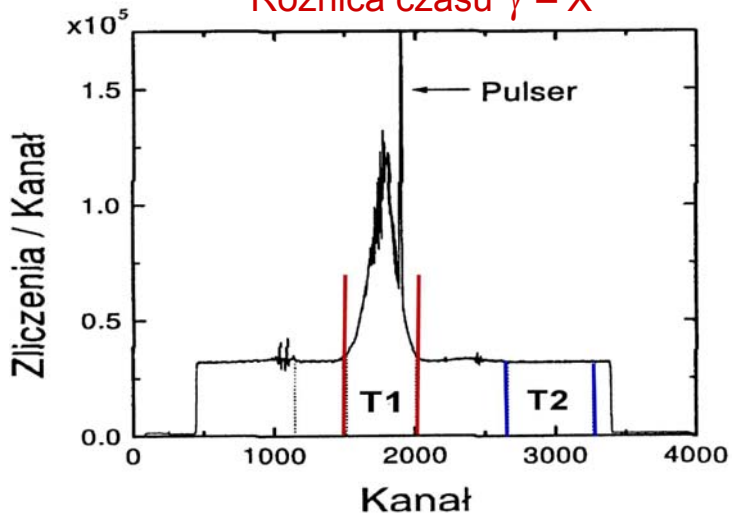




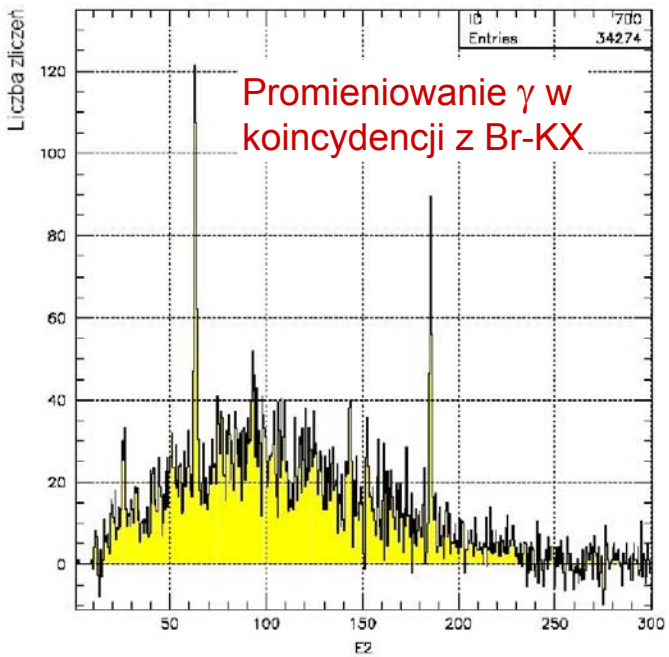
Promieniowanie X



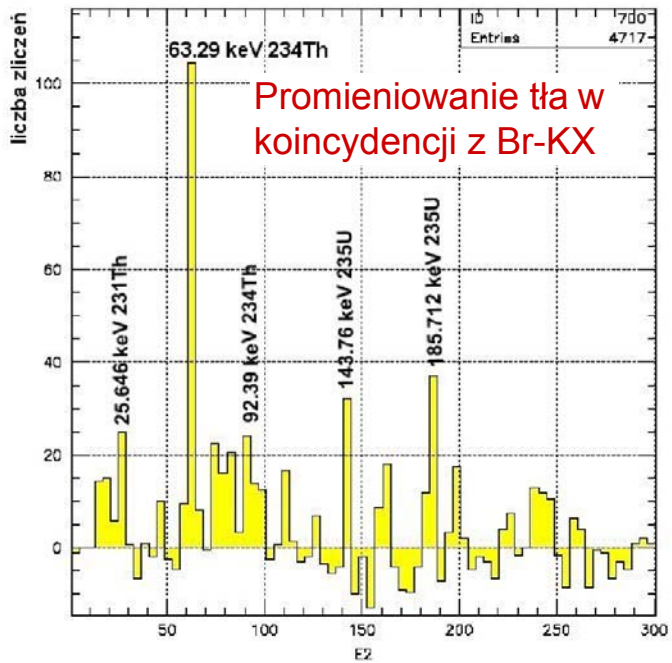
Różnica czasu γ – X



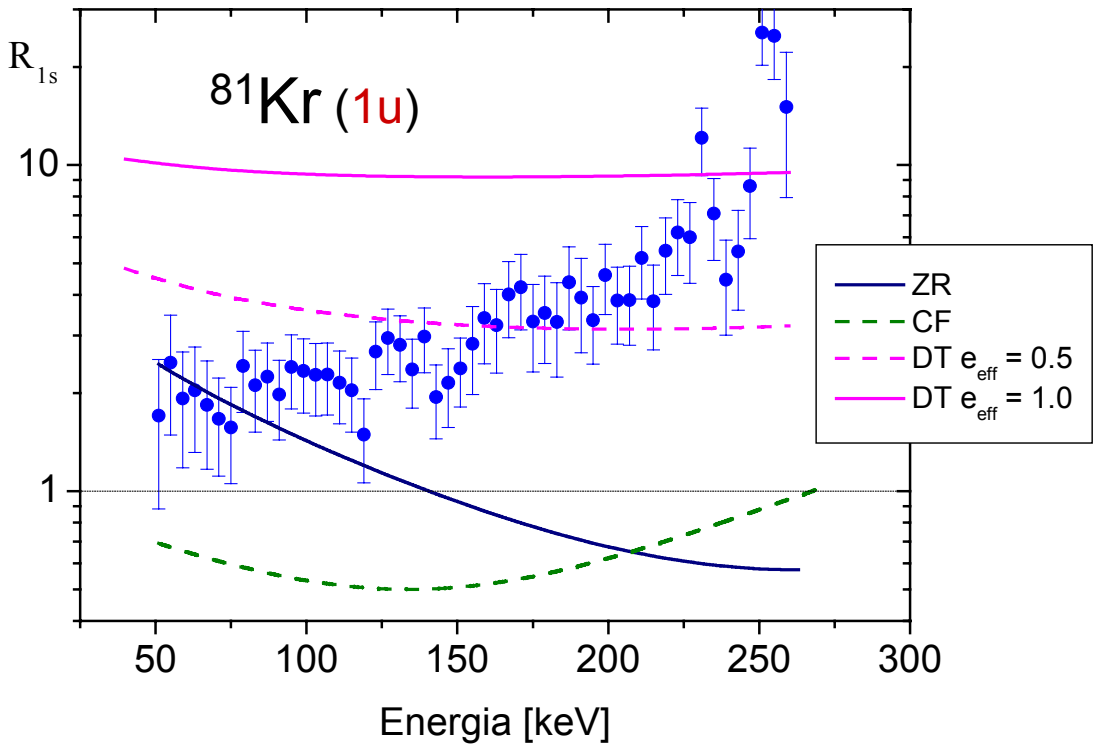
Promieniowanie γ w koincydencji z Br-KX



Promieniowanie tła w koincydencji z Br-KX

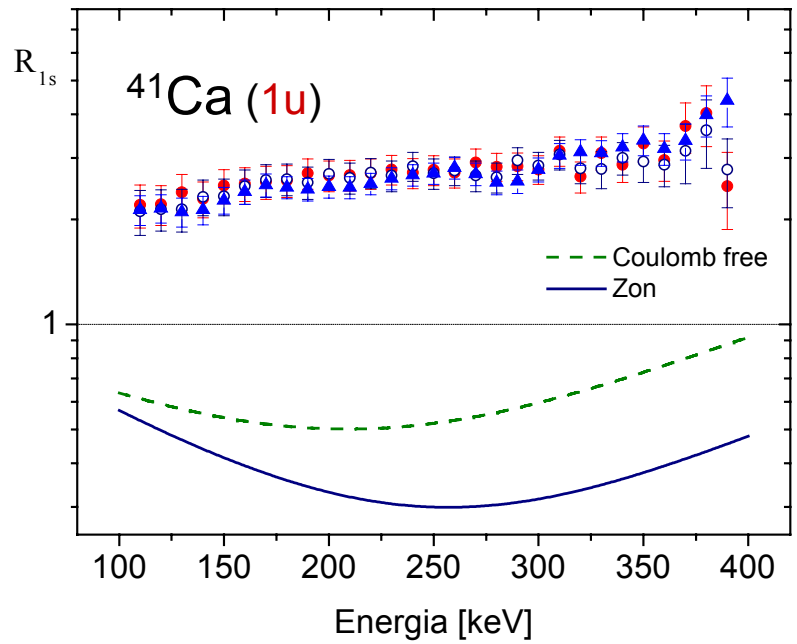


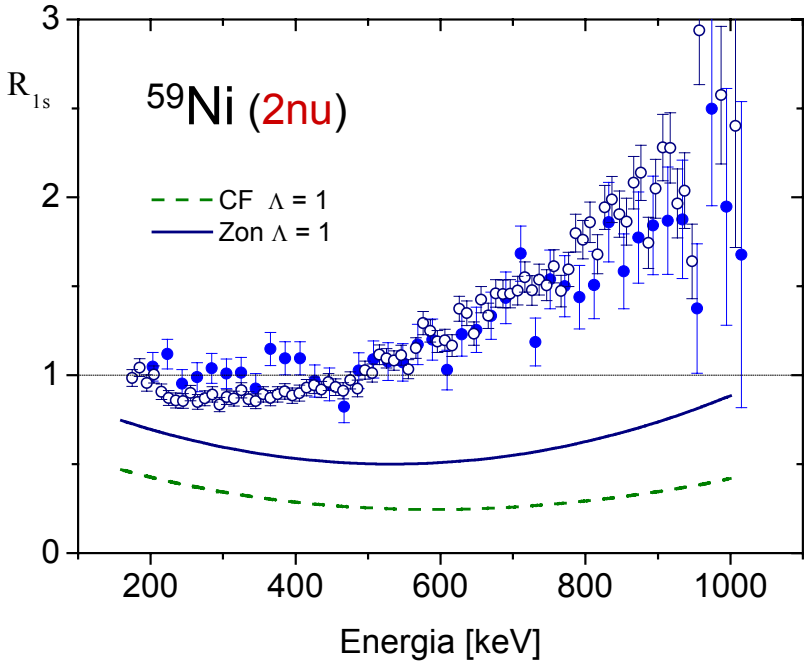
Widmo REC-1s w ^{81}Kr

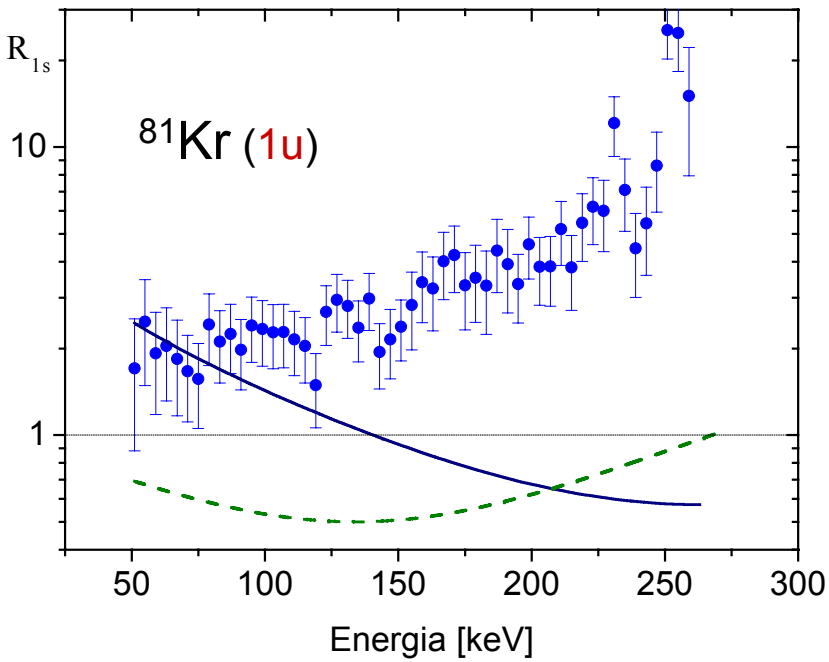


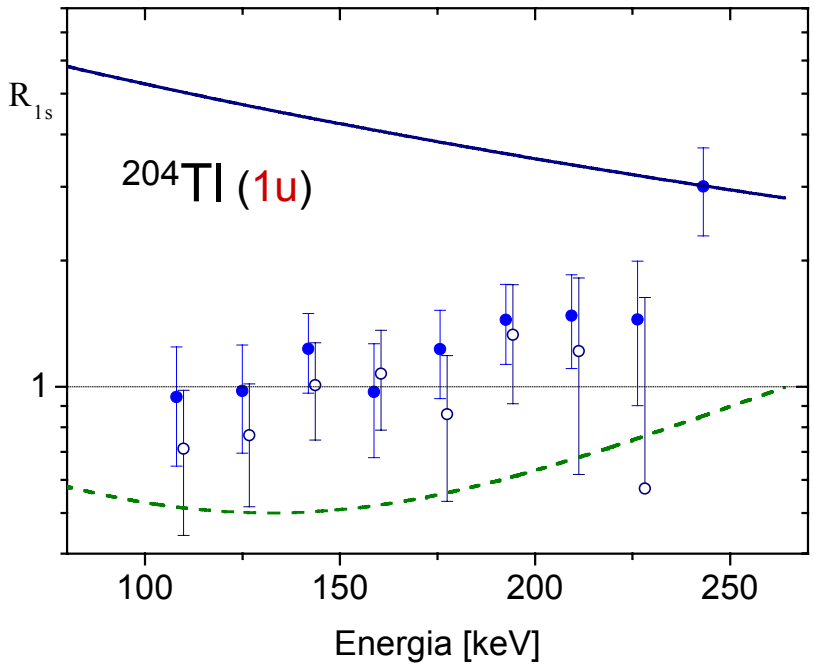
W ^{281}Kr obserwujemy 5-krotnie więcej promieniowania niż przewiduje model CF a 2-krotnie więcej niż model ZR!

Przez dodanie przejść okrężnych nie da się uzyskać zgodności co do kształtu i intensywności promieniowania.


R1s
41Ca (1u)
Coulomb free
Zon
1
100
150
200
250
300
350
400
Energia [keV]


R1s
59Ni (2nu)
CF Λ = 1
Zon Λ = 1
3
2
1
0
200
400
600
800
1000
Energia [keV]


R1s
81Kr (1u)
10
1
50
100
150
200
250
300
Energia [keV]


R1s
204Tl (1u)
1
100
150
200
250
Energia [keV]

Wniosek: model Zona i Rapoporta błędnie opisuje wewnętrzne promieniowanie hamowania (IB), przynajmniej dla dużych Z.

Nie da się stwierdzić czy (i jak duży) wkład wnosi mechanizm przejść okrężnych dopóki nie potrafimy dobrze opisać mechanizmu IB.

$$\left(R_{1s}^{IB}\right)_{ZR} = \left(1 - \frac{k}{q_{1s}}\right)^2 R_{1s}^{(1)}(k) + \Lambda\left(\frac{k}{q_{1s}}\right)^2 R_{1s}^{(2)}(k)$$

$$R_{1s}^{(1)}(k) = \frac{1}{2}\left[\left(A^{11}(k)\right)^2 + \left(B^{11}(k)\right)^2\right]$$

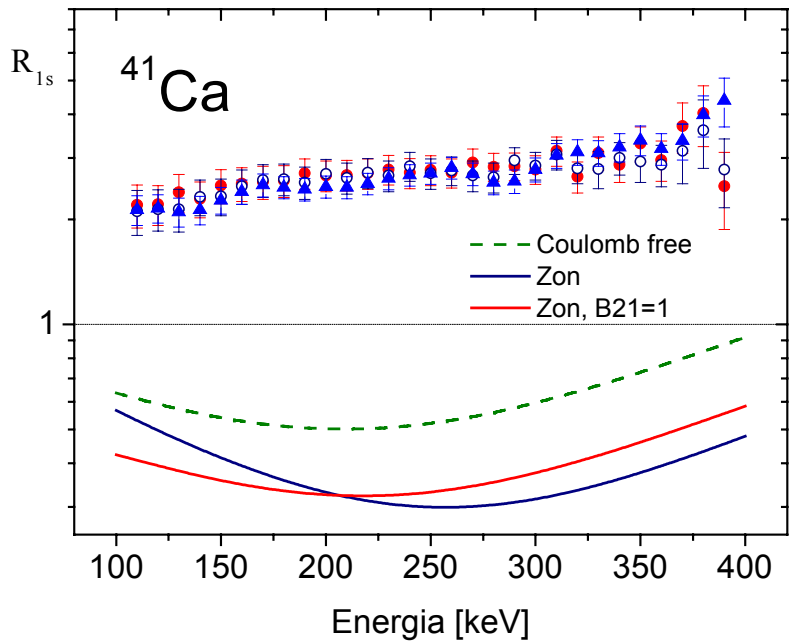
γ (M1), elektron chwytany ze stanu $S_{1/2}$

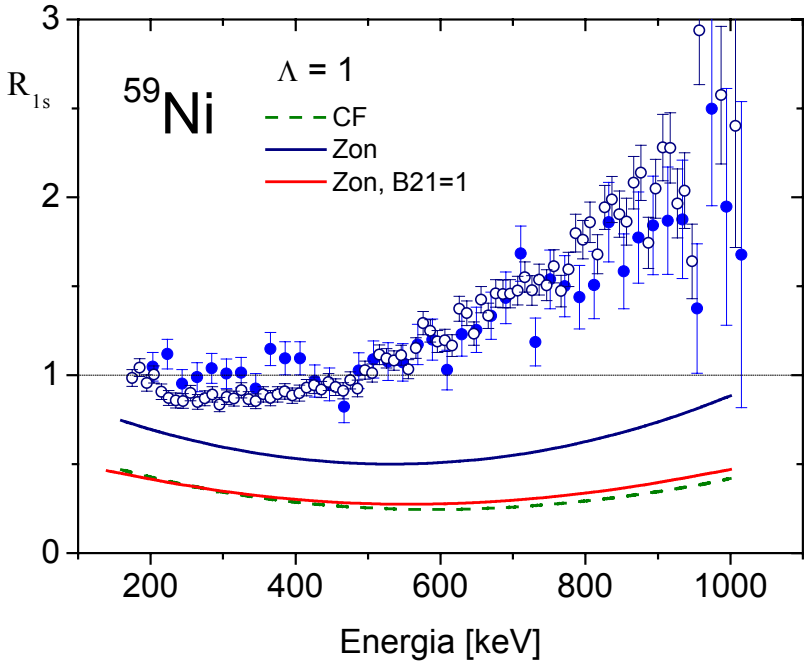
$$R_{1s}^{(2)}(k) \propto \frac{1}{8}\left\{\left(A^{21}(k)\right)^2 + \left(B^{21}(k)\right)^2 + 3\left[\left(A^{22}(k)\right)^2 + \left(B^{22}(k)\right)^2\right]\right\}$$

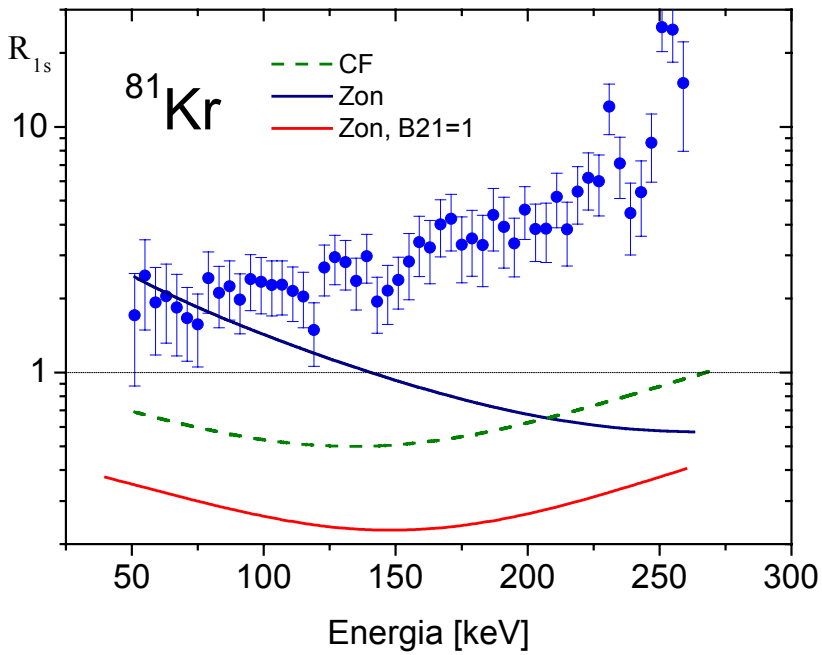
γ (E1) γ (M2)

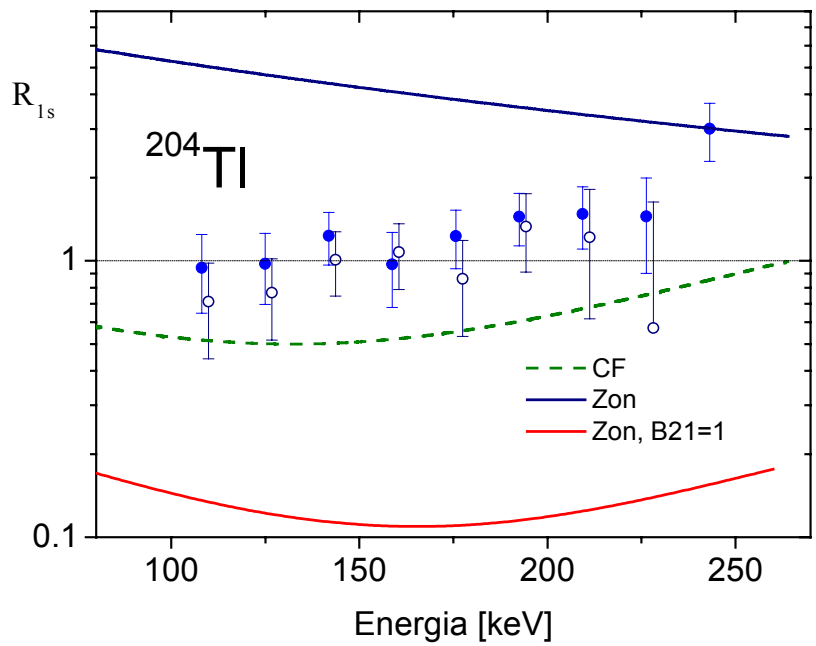
elektron chwytany ze stanu $P_{3/2}$

Funkcja B^{21} jest bardzo czuła na ładunek jądra (Z) i zależy też od promienia jądrowego. Jej wkład łatwo ujawnić kładąc $B^{21} = 1$.

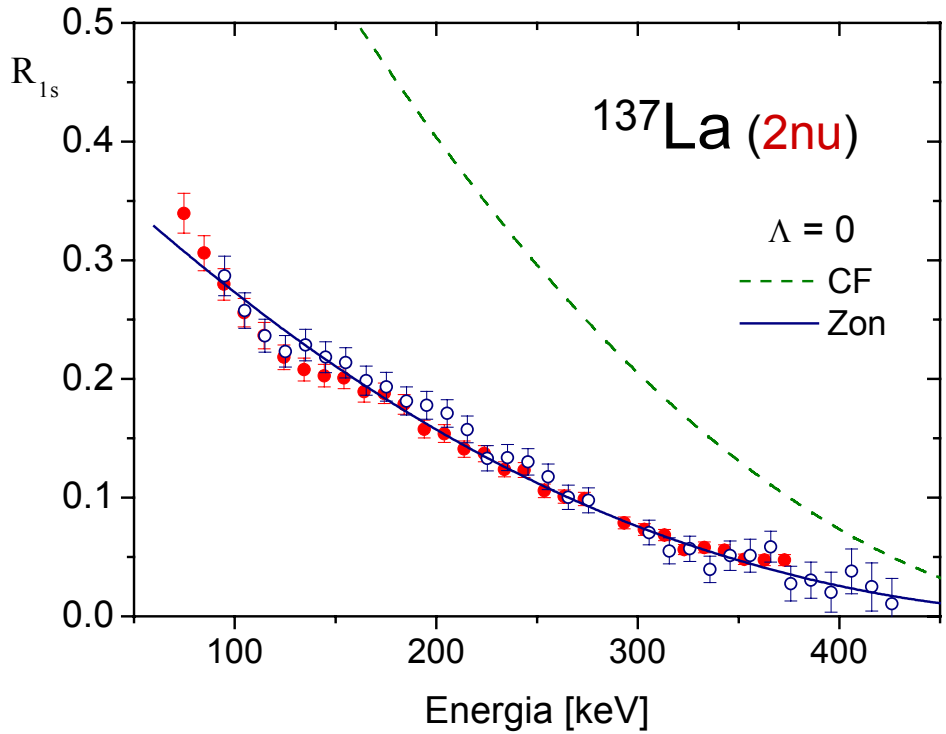

R_{1s}
^{41}Ca
Coulomb free
Zon
Zon, B21=1
1
100
150
200
250
300
350
400
Energia [keV]


R_{1s}
^{59}Ni
Λ = 1
CF
Zon
Zon, B21=1
3
2
1
0
200
400
600
800
1000
Energia [keV]


R_{1s}
^{81}Kr
CF
Zon
Zon, B21=1
10
1
50
100
150
200
250
300
Energia [keV]


R_{1s}
^{204}Tl
CF
Zon
Zon, B21=1
1
0.1
100
150
200
250
Energia [keV]

Przypadek szczególny (?)



Widmo REC-1s w przypadku ^{137}La zgodne z teoria ZR dla Λ=0 !

Jeśli czynnik Λ rzeczywiście wynosi 0 w tym przypadku, to oznacza, że tylko funkcja $R^{(1)}(k)$ odgrywa rolę w opisie IB (elektron chwytany ze stanów $S_{1/2}$, γ - M1) i wyczerpująco je opisuje, a przejścia okrężne nie występują.

Podsumowanie

- Zmierzyliśmy rozkład prawdopodobieństwa promieniowania towarzyszącego wychwytowi elektronu (REC) w przemianach wzbronionych typu 1u (^{41}Ca, ^{81}Kr, ^{204}Tl) i typu 2nu (^{59}Ni, ^{137}La).
- Kształt i intensywność promieniowania REC-1s, we wszystkich przypadkach (z wyjątkiem ^{137}La), jest niezgodny z przewidywaniem zaawansowanego modelu Zona i Rapoporta rozwiniętego specjalnie dla przemian wzbronionych.
- Wkład od mechanizmu przejść okrężnych wg modelu Kalinowskiego jest możliwy, ale nie jest w stanie wyjaśnić wszystkich rozbieżności (→ ^{204}Tl). Aby go ocenić, należy najpierw poprawnie opisać mechanizm wew. prom. hamowania (IB).
- W modelu ZR ‘podejrzana’ jest funkcja $B^{21}(k)$, bardzo czuła na wartość ładunku i promienia jądra.
- Do pełnego obrazu przydałoby się obliczyć/zmierzyć wartość współczynnika Λ dla ^{137}La (pomiar L_3/K).
- Najlepszym dowodem na występowanie przejść okrężnych byłby pomiar polaryzacji promieniowania REC.

Współpracownicy

P. Hornshøj, H.L. Nielsen

Uniwersytet w Aarhus, Dania

J. Żylicz, A. Płochocki, Z. Janas, B. Szweryn, K. Rykaczewski, T. Batsch,

J. Kurpeta, J. Kurcewicz, E. Werner-Malento

Ł. Kalinowski

ZSJ

T. Nilsson

CERN/ISOLDE