

# CZY W GSI ZAOBSERWOWANO OSCYLACJE CZASOWE STAŁEJ ROZPADU?

MAREK GÓŹDŹ

INSTYTUT INFORMATYKI UMCS

Wrocław, 27.IV.2009

Doświadczenie

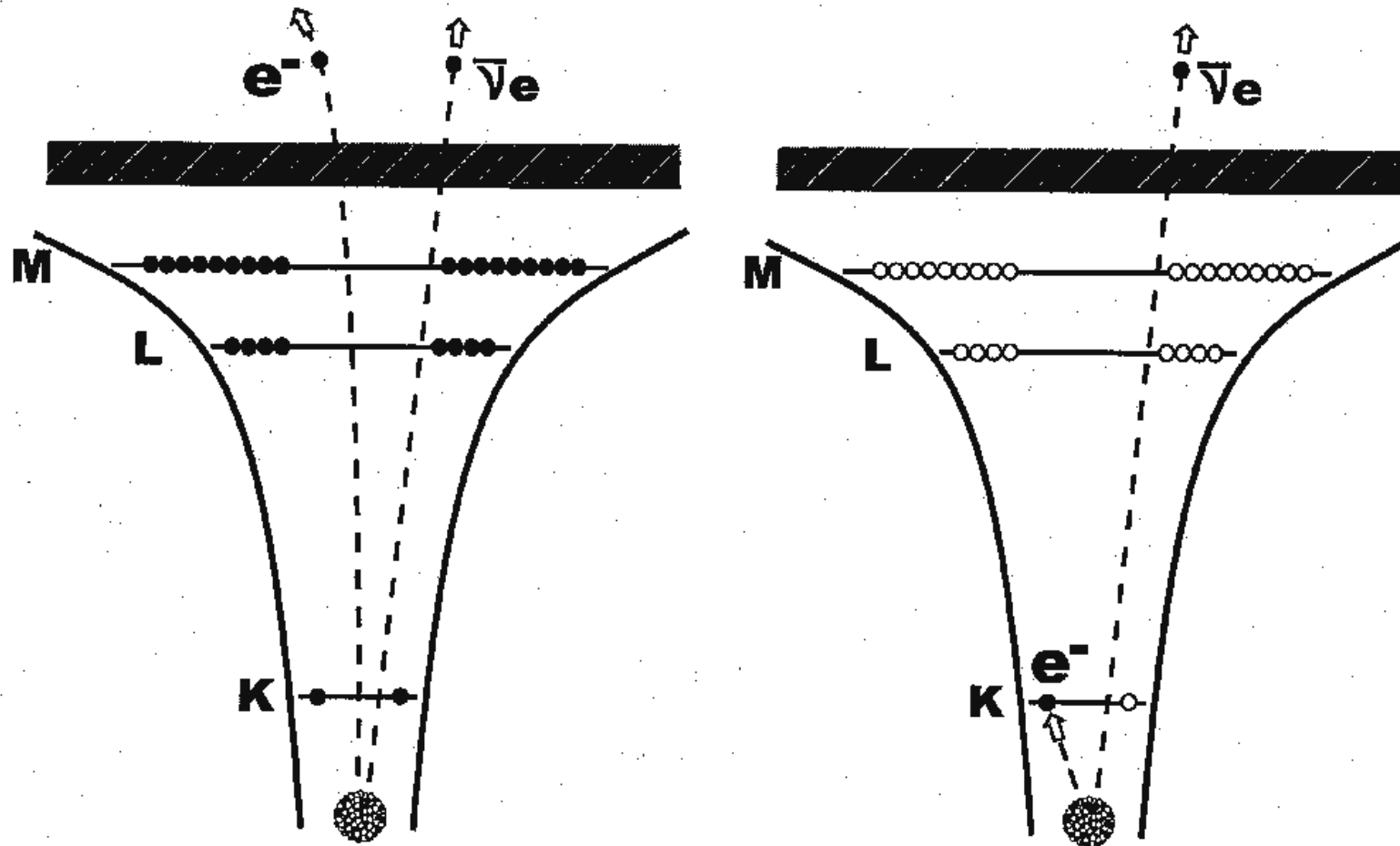
Źródła:

Yu. A. Litvinov *et al.*, PRL 99 (2007) 262501

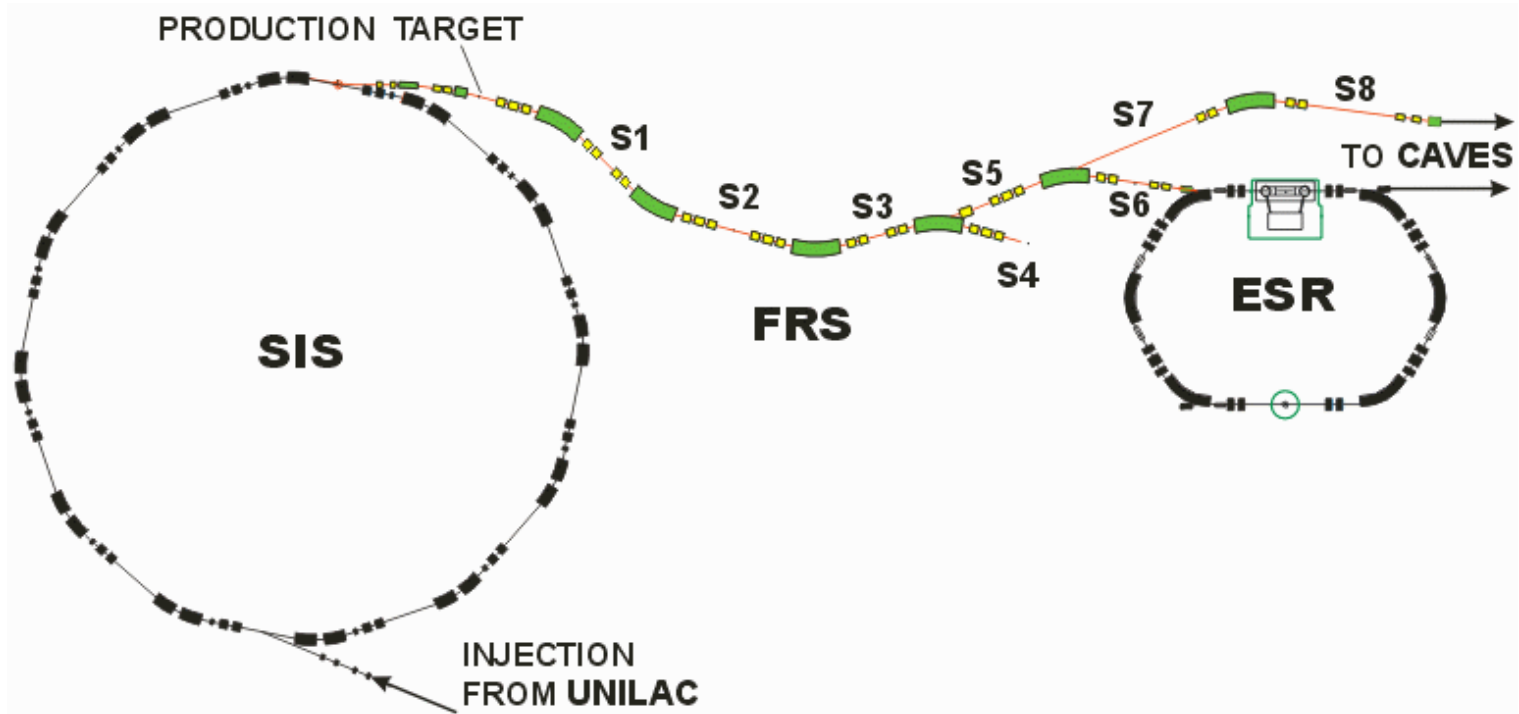
Z. Patyk *et al.*, PRC 77 (2008) 014306

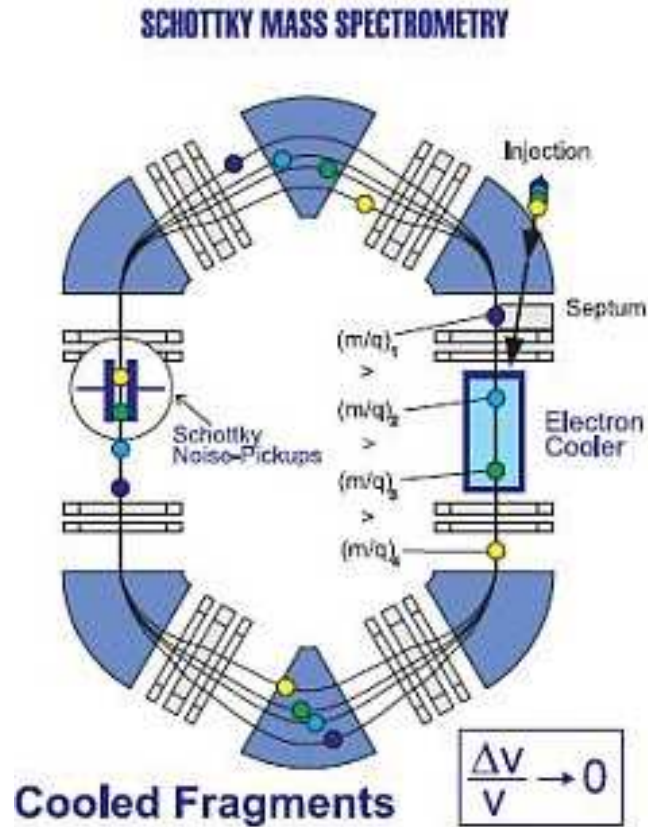
Yu. A. Litvinov *et al.*, PLB 664 (2008) 162

Eksperyment w GSI (Darmstadt):  
badanie orbitalnego wychwytu elektronowego w ciężkich wodoropodobnych jonach

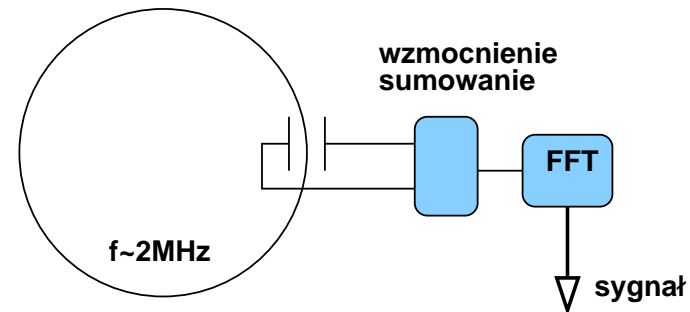


Schemat doświadczalny

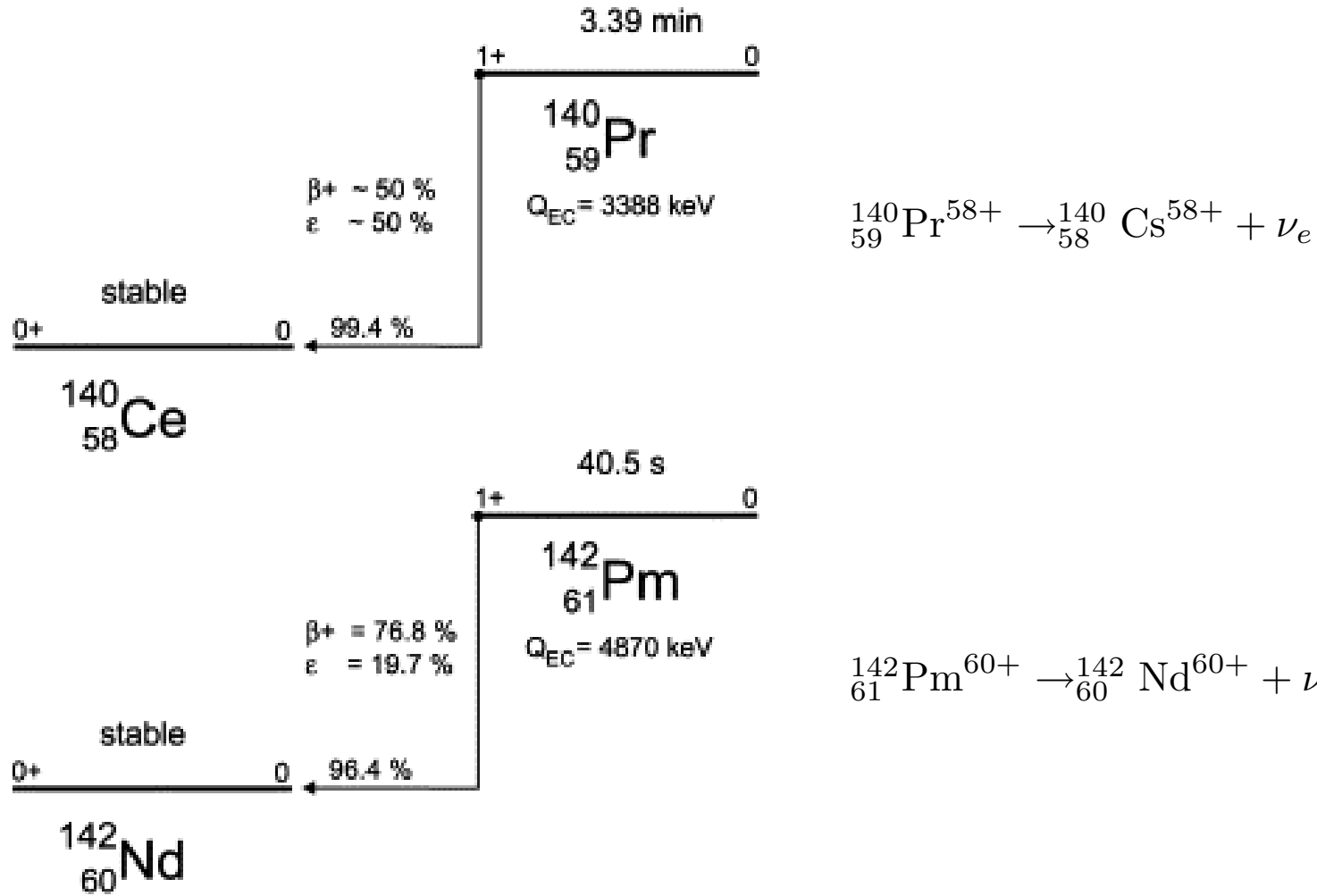




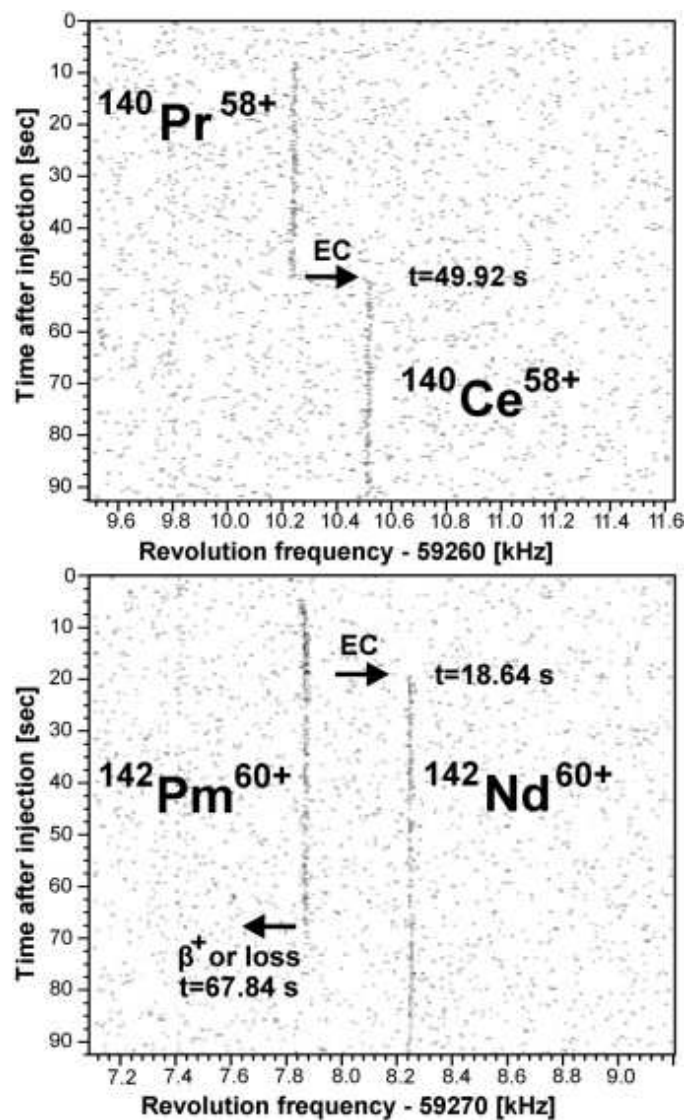
- Synchrotron SIS, wiązka samaru  $^{152}\text{Sm}$
- Zderzenie  $^{152}\text{Sm}$  z tarczą Be: puls  $1\mu\text{s}$ , produkcja ionów wtórnych → dobrze określone czasy powstawania
- FRS (*fragment separator*) – tworzenie wiązki wtórnej
- ESR (*experimental storage ring*)
- chłodzenie wiązki wtórnej: stochastyczne (5 sek.), poprzez zderzenia z poprzeczną wiązką zimnych elektronów (6–11 sek.)
- monitoring wiązki (*Schottky noise*)



Badano rozpady jonów prazeodymu i prometu



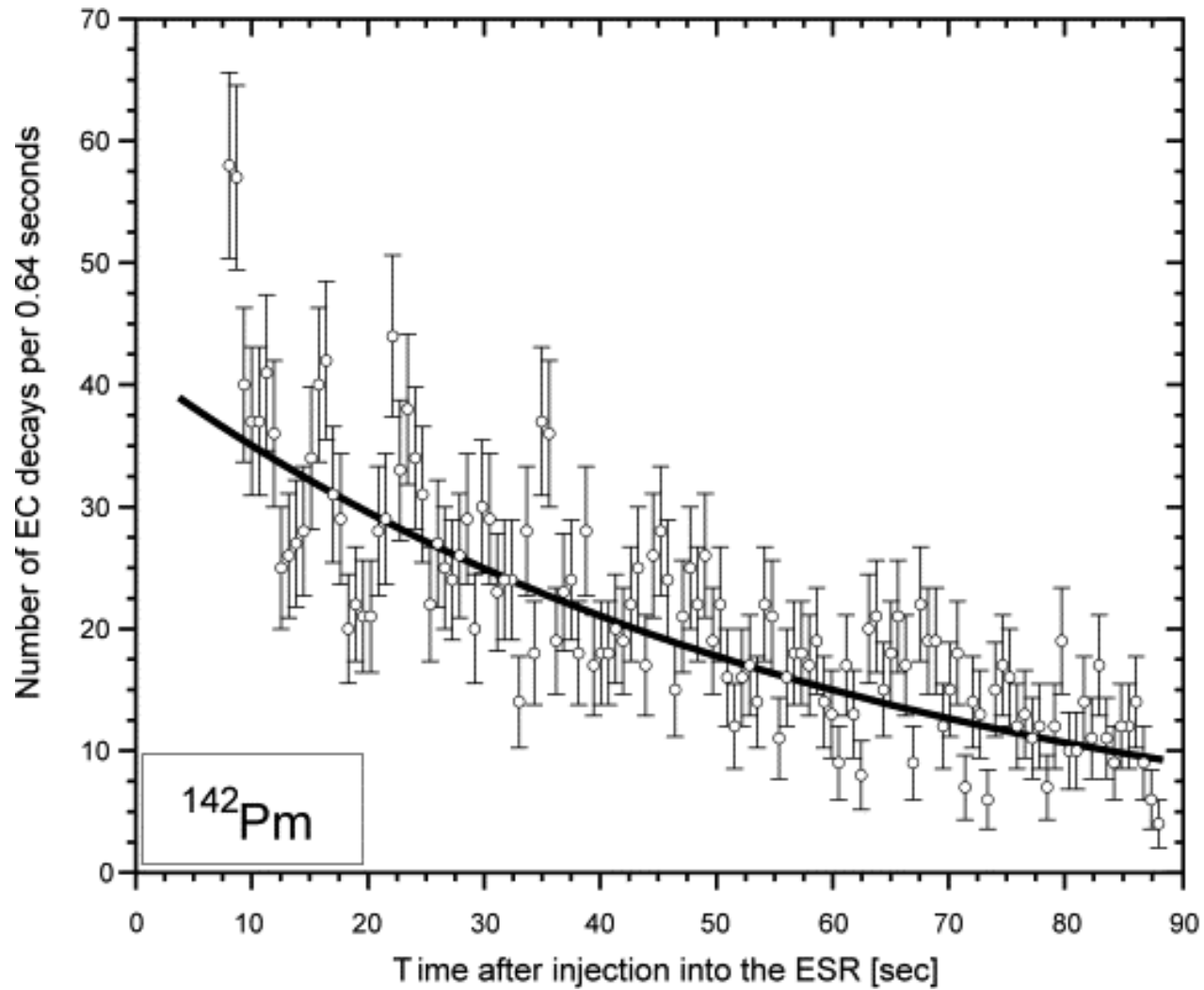
Półokresy rozpadu rzędu minuty!



### Krótkie podsumowanie cech doświadczenia:

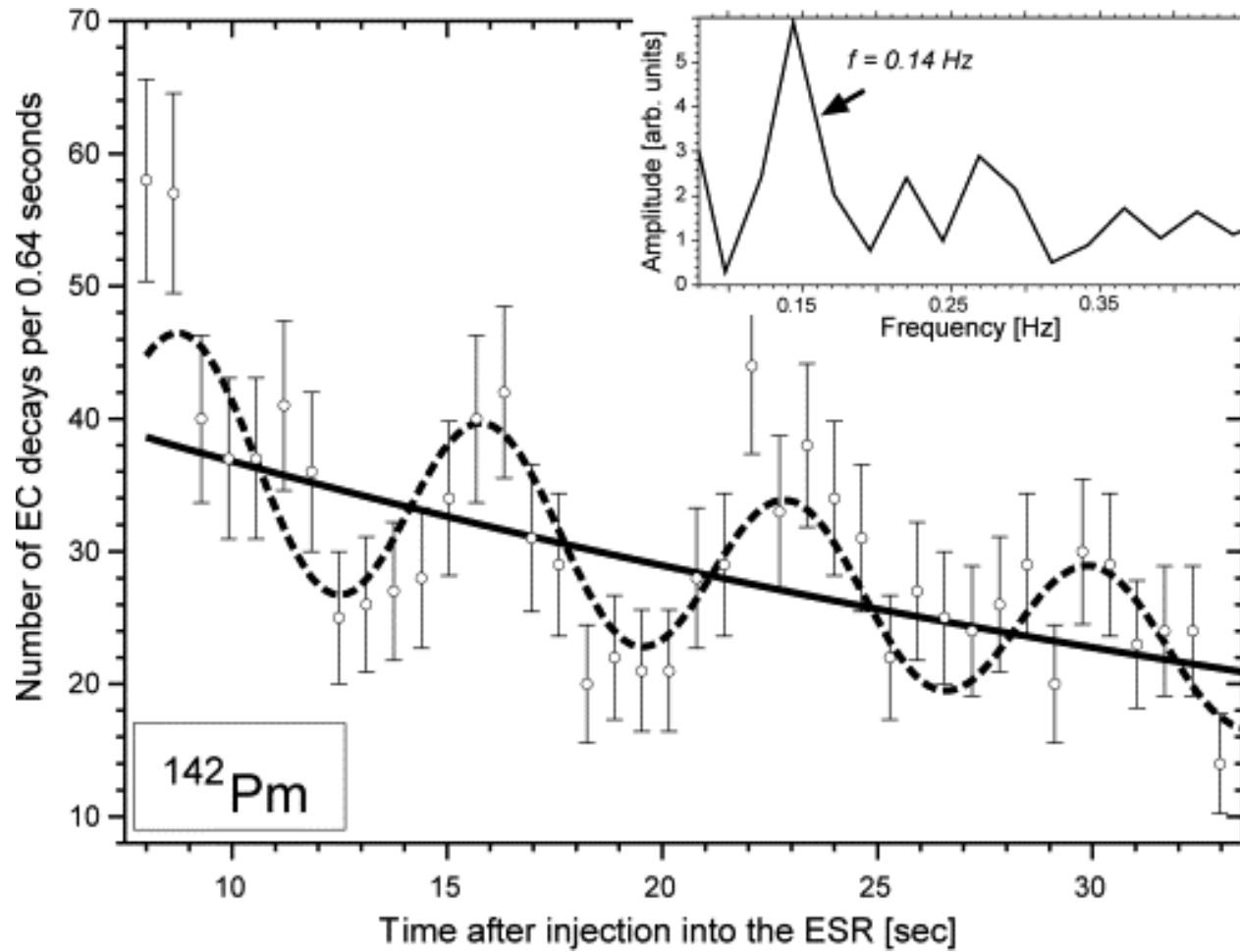
- wiązka jednego typu jonów
- o dobrze określonej energii/prędkości (chłodzenie,  $\Delta v/v \rightarrow 0$ )
- co najwyżej 3 jony na raz w ESR (przeciętnie 1–2)
- niemalże ciągły monitoring pojedynczych cząstek w pierścieniu ESR (por.  $f \sim 2\text{MHz}$  z czasem życia rzędu 1 minuty)
- łatwo rozróżnialne rozpady  $\beta$  i EC (zmiana lub nie ładunku jonu, zmiana energii wiązania)

Wyniki: Pm, fit wykładniczy

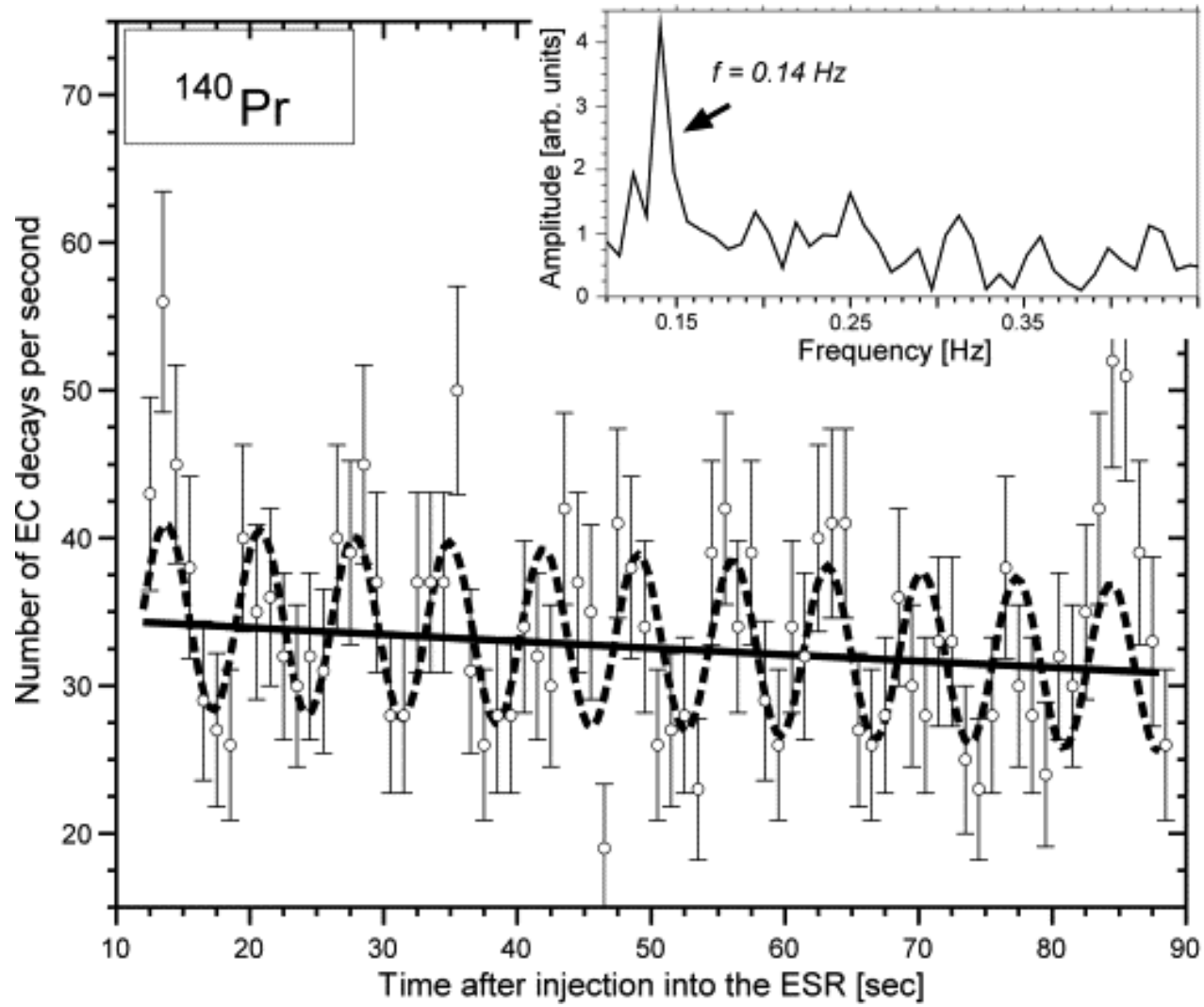




Wyniki: Pm, fit wykładniczy+oscylacje



Wyniki: Pr, fit wykładniczy+oscylacje



Dla  $\lambda = \lambda_{\beta^+} + \lambda_{EC} + \lambda_{\text{loss}}$

$$\text{Fit (1) : } \quad \frac{dN_{EC}}{dt} = N_0 e^{-\lambda t} \lambda_{EC}$$

$$\text{Fit (2) : } \quad \frac{dN_{EC}}{dt} = N_0 e^{-\lambda t} \lambda_{EC} [1 + a \cos(\omega t + \phi)]$$

Fit	$\chi^2/\text{dof}$		$T$		$\phi$	
	Pr	Pm	Pr	Pm	Pr	Pm
(1)	107,2/73	63,77/38	–	–	–	–
(2)	67,18/70	31,82/35	7,06(8) s	7,10(22) s	-0,3(3)	-1,3(4)

Kwantyle rozkładu  $\chi^2$ :

$$107,2/73 \rightarrow 0,995 \quad 63,77/38 \rightarrow 0,995$$

$$67,18/70 \rightarrow 0,45 \quad 31,82/35 \rightarrow 0,38$$

Pierwszy pomysł:

rozważamy rozpad słaby



uczestniczą w nim neutrina



neutrina oscylują



Czy może to mieć implikacje w postaci oscylacji  $\lambda_{EC}$ ?

*Oscylacje neutrin w kilka minut*

Oscylacje neutrin w kilka minut

## Oscylacje dwóch neutrin

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

$$|\nu_e(t)\rangle = -\sin \theta e^{-iE_1 t} |\nu_1\rangle + \cos \theta e^{-iE_2 t} |\nu_2\rangle$$

$$\mathcal{P}_{\nu_e \rightarrow \nu_e} = |\langle \nu_e(t) | \nu_e(t) \rangle|^2 = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{E_2 - E_1}{2} t\right)$$

Dla  $m_i \ll E_i$ ,  $E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} = p \sqrt{1 + m_i^2/p^2} \approx p(1 + \frac{1}{2} \frac{m_i^2}{p^2}) = p + \frac{m_i^2}{2p} \approx E + \frac{m_i^2}{2E}$

$$\mathcal{P}_{\nu_e \rightarrow \nu_e} = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2}{4E} t\right) = 1 - \mathcal{P}_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}$$

Średnia droga oscylacji:  $L_\mu = \frac{4\pi E \hbar}{\Delta m^2 c^3} = 2,48(E/\text{MeV})(\text{eV}^2/\Delta m^2)$  metrów

Dla trzech neutrin macierz mieszania bez ewentualnych faz

$$\begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

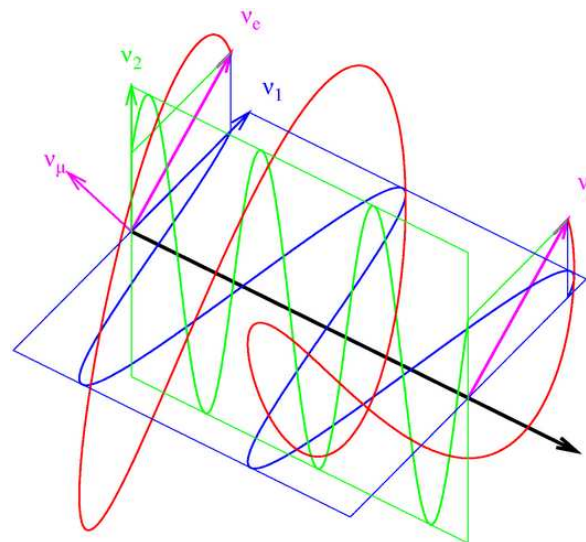
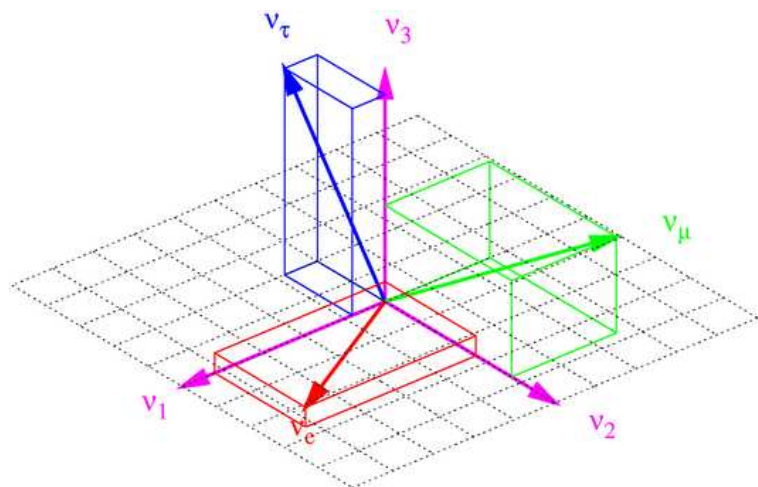
$$\Delta m_{23}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 (\text{atmosfer.})$$

$$\Delta m_{12}^2 = 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 (\text{słoneczne})$$

$$\sin^2 2\theta_{23} = 1.00$$

$$\sin^2 \theta_{12} = 0.305$$

$$\sin^2 \theta_{13} \leq 0.033 \quad (90\% \text{ c.l.})$$



Najpopularniejszy model przewiduje więc:

- istnienie dwóch baz: oddziaływania i masowej („fizycznej”)
- neutrina biorą udział w procesach słabych jako stany własne oddziaływania; nazywa się je  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  i  $\nu_\tau$
- $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  i  $\nu_\tau$  nie mają określonej masy (!)
- $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  i  $\nu_\tau$  są superpozycjami stanów  $\nu_{1,2,3}$  o dobrze określonej masie; tworzone są jako koherentna mieszanka tych stanów (zgodne fazy)
- podczas propagacji stany masowe „rozłóżą się” ze względu na różne masy ( $\Rightarrow$  różne prędkości); prowadzi to do oscylacji



*Kto jest za a kto przeciw i dlaczego?*

Kto jest za a kto przeciw i dlaczego?

Za uznaniem neutrin źródłem oscylacji w GSI:

Ivanov, Reda, Kienle, nucl-th/0801.2121

Ivanov, Kyshen, Pitschmann, Kienle, PRL 101 (2008) 182501

Faber, nucl-th/0801.3262

Lipkin, hep-ph/0801.1465

Lipkin, hep-ph/0805.0435

Walker, Nature 453 (2008) 864

Przeciw:

Kienert, Kopp, Lindner, Merle, hep-ph/0808.2389

Giunti, hep-ph/0801.4639

Giunti, PLB 665 (2008) 92

Burkhardt et al., hep-ph/0804.1099

Peshkin et al., hep-ph/0804.4891

Peshkin et al., hep-ph/0811.1765

Gal, nucl-th/0809.1213

Cohen, Glashow, Ligeti, hep-ph/0810.4602

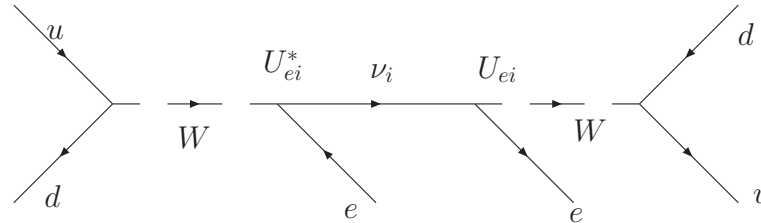
## Rozumowanie **błędne**:

- wyliczam amplitudę procesu, gdy końcowym stanem neutrina jest  $\nu_1$
- wyliczam amplitudę procesu, gdy końcowym stanem neutrina jest  $\nu_2$
- wyliczam amplitudę procesu, gdy końcowym stanem neutrina jest  $\nu_3$
- (te amplitudy mają różne fazy!)
- dodaję je do siebie **koherentnie**

$$\mathcal{A}(m \rightarrow d + \nu_e) = \sum_{j=1}^3 U_{ej} \mathcal{A}(m \rightarrow d + \nu_j)$$

- pozostają człony zespolone dające oscylacje

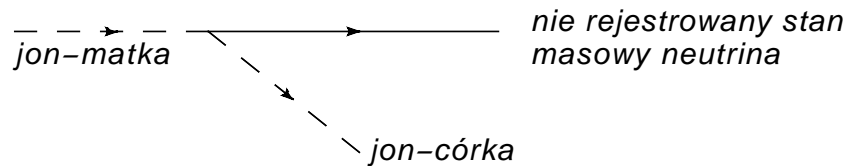
Kto jest za a kto przeciw i dlaczego?



Faktycznie, dla oscylacji właściwa jest **koherentna** suma amplitud cząstkowych

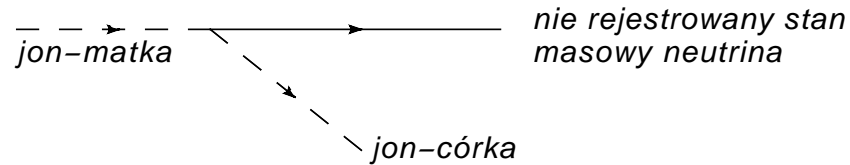
$$\mathcal{A} \sim \sum_{j=1}^3 |U_{ej}|^2 e^{-ip_j^\mu x_\mu}$$

ale w GSI sytuacja jest **inna**:



Brak drugiego wierzchołka („detekcja” neutrina) zmienia sytuację. W idealnym przypadku (nieskończona zdolność rozdzielcza eksperymentu) kinematyka procesu ustaliłaby końcowy stan masowy. Przy pewnym rozrzucie pędów/energii wszystkie 3 stany masowe mają swój wkład do pełnej amplitudy procesu.

*Kto jest za a kto przeciw i dlaczego?*



Ponieważ neutrino nie jest wykrywane w tym doświadczeniu, wkłady do pełnej amplitudy procesu od poszczególnych procesów cząstkowych powinny być sumowane **niekoherentnie!** Prowadzi to do:

$$\mathcal{A}(m \rightarrow d + \nu_e) = \mathcal{A}(m \rightarrow d + [\sum_{j=1}^3 U_{ej} \nu_j])$$

$$\mathcal{P} \sim \sum_{j=1}^3 |U_{ej}|^2 = 1 \Rightarrow \text{oscylacji nie ma!}$$

To samo bardziej formalnie na paczkach falowych

Macierz gęstości ( $M$  to jon-matka,  $D$  to jon-córka):

$$\rho_\psi = |M\rangle\langle M|$$

Detekcja:

$$\rho_{det} = \sum_{j=1}^3 \int d^3 p_\nu |D; \nu_j; \vec{p}_\nu\rangle\langle D; \nu_j; \vec{p}_\nu|$$

Prawdopodobieństwo detekcji:

$$\mathcal{P} = \text{tr}(\rho_{det}\rho_\psi) = \sum_{j=1}^3 \int d^3 p_\nu |\langle D; \nu_j; \vec{p}_\nu | M \rangle|^2$$

Jak widać, sumowanie jest niekoherentne i nie prowadzi do oscylacji czasowej amplitudy rozpadu.

Inna propozycja (Lindner i spółka, również Giunti - dudnienia kwantowe):  
Założmy że istnieją dodatkowe stopnie swobody (wzbudzenia wewnętrzne)  
jonu-matki tak, że powstaje on jako superpozycja stanów o różnych masach:

$$|M\rangle = \sum_{\sigma} \alpha_{\sigma} |M_{\sigma}\rangle$$

Wtedy

$$\langle D; \nu_j; \vec{p}_{\nu} | M \rangle \sim \sum_{\sigma} \alpha_{\sigma} \exp(-f_{\sigma} + i \phi_{\sigma})$$

$$\mathcal{P} \sim \exp(i(\phi_{\rho} - \phi_{\tau}))$$

Propozycja się nie obroniła (Ivanov, Faber) stwierdzeniu, iż taki sam efekt powinno się obserwować w innych doświadczeniach z tymi samymi jonami i rozpadem  $\beta$  a tak nie jest.

**Riposta:** Gdyby rozszczepienie stanów przenieść z jonu-matki na elektron, rozpad  $\beta$  by tego nie widział, ale EC tak.

## Argument przyczynowy (Carlo Giunti)

W analogii do doświadczenia dwuszczelinowego:

- padająca fala płaska zamienia się w fale kuliste
- proces ten zależy od ułamka natężenia fali padającej, przechodzącego przez przesłonę, a ten ułamek zależy od kształtu i rozmiaru otworów (szczelin)
- zjawisko interferencji nie może wpływać na sposób przechodzenia fali przez szczeliny, gdyż zachodzi **później**

Podobnie, oscylacje neutrin, będących produktami rozpadu, nie mogą wpływać na stałą rozpadu (przyczynowość)!



Propozycja w zamian: **dudnienia kwantowe**, które w zasadzie są tym samym co proponował Lindner.

$$|M(t=0)\rangle = \mathcal{A}_1|M_1\rangle + \mathcal{A}_2|M_2\rangle$$

$$|M(t)\rangle = (\mathcal{A}_1e^{-iE_1t}|M_1\rangle + \mathcal{A}_2e^{-iE_2t}|M_2\rangle)e^{-\Gamma t/2}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{EC}(t) = |\langle\nu_e, D|S|M(t)\rangle|^2 &= [1 + A \cos(\Delta Et + \phi)] |\langle\nu_e, D|S|M_1\rangle|^2 e^{-\Gamma t} \\ &\simeq [1 + A \cos(\Delta Et + \phi)] |\langle\nu_e, D|S|M_2\rangle|^2 e^{-\Gamma t} \end{aligned}$$

$$A = 2|\mathcal{A}_1||\mathcal{A}_2| \qquad \Delta E = E_2 - E_1$$

Z dopasowania do danych doświadczalnych:

$$\Delta E({}_{59}^{140}\text{Pr}^{58+}) = (5,86 \pm 0,07) \cdot 10^{-16} \text{ eV} \quad A({}_{59}^{140}\text{Pr}^{58+}) = 0,18 \pm 0,03$$

$$\Delta E({}_{61}^{142}\text{Pm}^{60+}) = (5,82 \pm 0,18) \cdot 10^{-16} \text{ eV} \quad A({}_{61}^{142}\text{Pm}^{60+}) = 0,23 \pm 0,04$$

Daje to wyjątkowo małe rozszczepienie energii  $\sim 10^{-16}$  eV oraz

$$\frac{|\mathcal{A}_1|^2}{|\mathcal{A}_2|^2} \sim \frac{1}{99} \quad \text{lub} \quad \frac{|\mathcal{A}_2|^2}{|\mathcal{A}_1|^2} \sim \frac{1}{99}$$

Nie jest znany żaden mechanizm prowadzący do  $\Delta E \sim 10^{-16}$  eV oraz prawdopodobieństw dla dwóch stanów energetycznych w stosunku około 1/100!

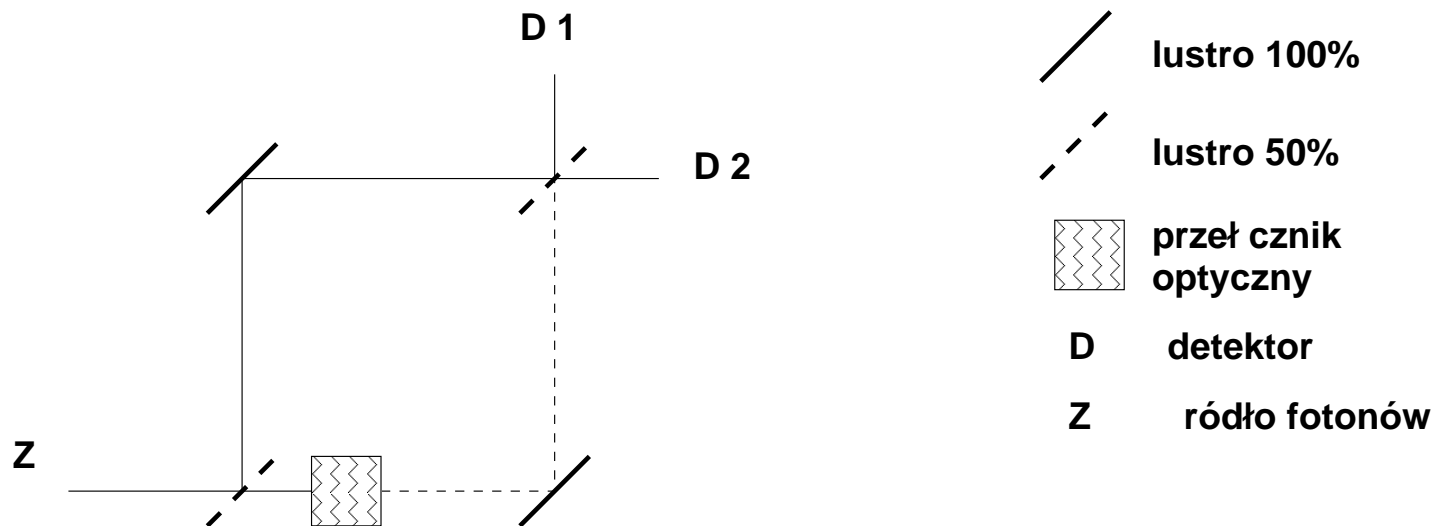
Uwaga na niekorzyść argumentu przyczynowego

A co z doświadczeniami z opóźnionym wyborem? Pomysł ten wyszedł już ze stadium *Gedankeneksperiment*, np.

Science 16 February 2007: Vol. 315. no. 5814, pp. 966 - 968

Experimental Realization of Wheeler's Delayed-Choice Gedanken Experiment,

Vincent Jacques, E Wu, Frédéric Grosshans, François Treussart, Philippe Grangier, Alain Aspect, Jean-François Roch



Istnieją też inne propozycje wyjaśnienia zjawiska GSI,  
nie odwołujące się do oscylacji neutrin

Np.:

G. Lambiase, G. Papini, G Scarpetta,

Spin-rotation coupling in non-exponential decay of hydrogenlike heavy ions,  
nucl-th/0811.2302v1

- sprzężenie  $\omega$  ruchu kołowego jonu w akceleratorze ze spinem elektronu
- mechanizm tłumaczący anomalny moment magnetyczny mionu ( $g - 2$ )
- końcowa precesja spinu będzie zależna od promienia ESR

$$\Omega \sim 1/R,$$

a więc zjawiska tego nie będzie w przypadku akceleratorów liniowych oraz w doświadczeniach z zatrzymywaniem jonów na grubej folii

## Podsumowanie

- wyniki doświadczenia wskazują na anomalne zachowanie się stałej rozpadu
- wykluczono, iż zależność czasowa może pochodzić z **procedury zbierania wyników**, chociaż teoretycy podkreślają, że analizowany jest sygnał po FFT, nie bezpośredni
- nie wykluczono, iż jest to wynik **słabej statystyki**:  
 $N = 2650$  (Pr) i  $N = 2740$  (Pm)
- **analiza statystyczna** wyników jest dziwna, gdyż odjęcie dopasowania od danych daje rozrzut wyników dużo mniejszy od przewidywanego ( $\sqrt{N}$ ); jest to podejrzenie dobre dopasowanie
- **test Mann'a–Whitney'a** (pozwala ustalić prawdopodobieństwo, że fluktuacje pozostałe po odjęciu dopasowania od danych są losowe) wypada na poziomie 5%, podczas gdy prawdziwie losowe fluktuacje powinny dawać ok. 30% (dopasowanie czysto wykładnicze – 15%)

Podsumowanie c.d.

- mimo to grupa doświadczalna upiera się, iż **nie jest to efekt aparaturowy**; przeprowadzono dalsze pomiary z jonami jodu  $^{122}\text{I}$  i  $^{118}\text{Sb}$
- *bardzo wstępne (1/5 danych) wyniki dla jodu pasują do oscylacji!*
- wykluczono oscylacje neutrin (przynajmniej na bazie standardowej teorii)
- być może zjawisko **dudnień kwantowych** na poziomie stanów elektronu, ale kłopoty z parametrami liczbowymi
- być może **mamy do czynienia z zupełnie nowym zjawiskiem, które objawia się w rozpadzie słabym**, lub efektem znanym z innych sytuacji (np. sprzężenie  $\vec{\omega} \cdot \vec{s}$ )
- lub jest to jednak (bardziej prawdopodobne) efekt wytworzony przez aparaturę (antenę, sąsiednie pomieszczenie...), o czym świadczyłby makroskopowy okres zmian  $\sim 7$  sekund