

Eksperyment BRAND - na tropie "Nowej Fizyki"

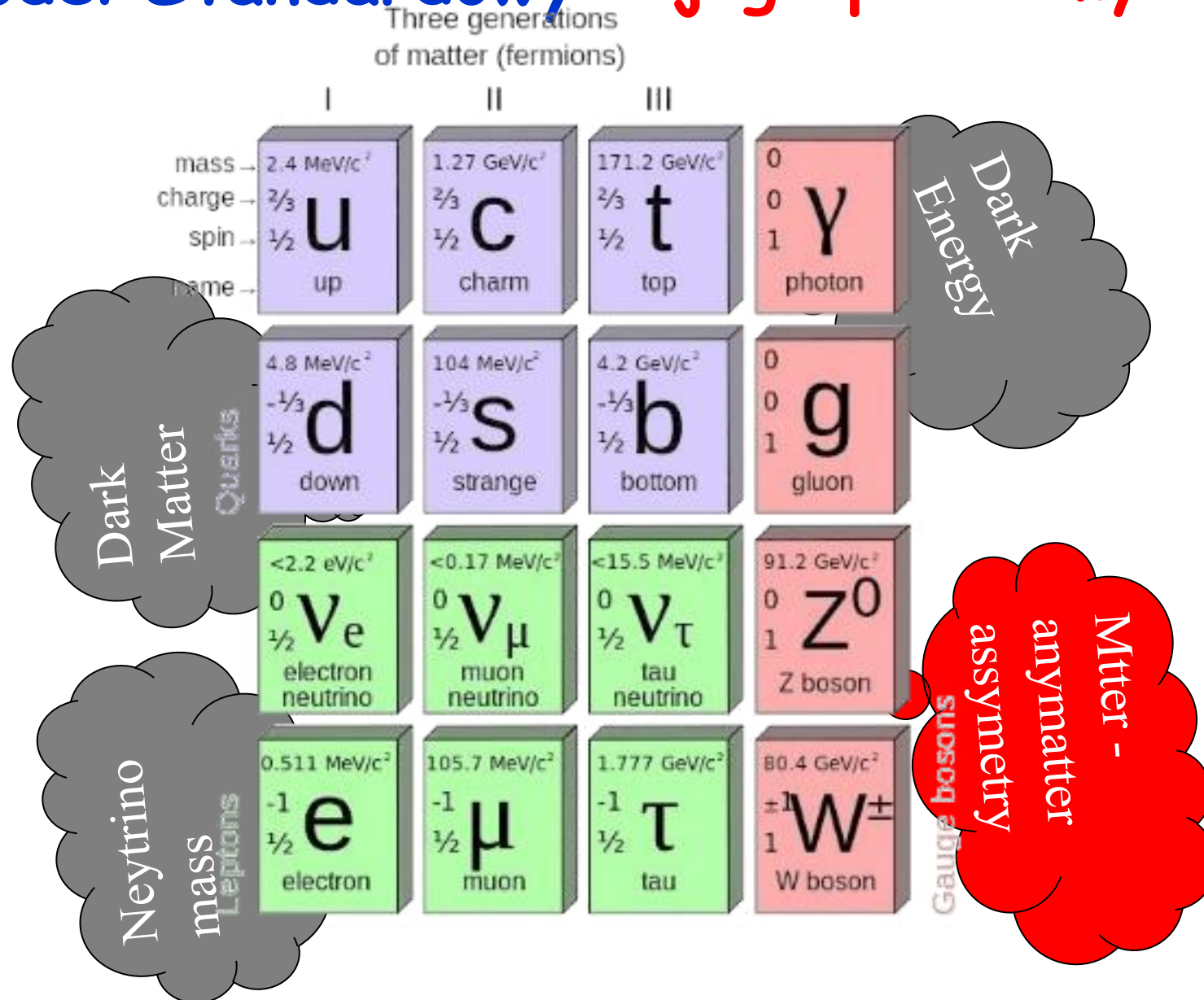
Poszukiwanie łamania symetrii odwrócenia czasu
poprzez pomiar korelacji kierunkowych w rozpadzie swobodnego neutronu

A.Kozela^{a)}, K.Bodek^{b)}, J.H.Choi^{d)}, K.Dhanmeher^{a)}, M.Engler^{f)}, G.Gupta^{b)},
L.De.Keukeleere^{e)}, M.Kołodziej^{b)}, K.Łojek^{b)}, K.Pysz^{a)}, D.Reis^{f)}, D.Rozpędzik^{b)},
N.Severijns^{e)}, T.Soldner^{e)}, N.Yazdandoost^{f)}, A.Young^{d)}, J.Zejma^{b)}



- a) Institute of Nuclear Physics, PAN, Cracow, Poland
- b) Institute of Physics, Jagellonian University, Cracow, Poland
- c) Institut Laue-Langevin, Grenoble, France
- d) Department of Physics and Astronomy, North Carolina State University, Raleigh, USA
- e) Institute of Nuclear and Radiation Physics, KU Leuven, Belgium
- f) Department of Chemistry, University Mainz, Mainz, Germany

Model Standardowy i jego problemy



Łamanie symetrii odwrócenia czasu (TRV)

□ Macierz Cabibbo-Kobayashi-Maskawy:

- TRV sparametryzowane przez zespoloną fazę δ_{KM} ,

$$\begin{pmatrix} 1 - \frac{1}{2} \lambda^2 & \lambda & A\lambda^3 \rho e^{i\delta_{KM}} \\ -\lambda & 1 - \frac{1}{2} \lambda^2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3 [1 - \rho e^{-i\delta_{KM}}] & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4)$$

- Wiele rzędów wielkości za słaby by wytłumaczyć asymetrię pomiędzy materią i antymaterią

□ θ -term w efektywnym Lagrangianie oddziaływań silnych

$$L = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - \theta \cdot q(x)$$

„Strong CP problem”

- Generuje nieobserwowany nEDM ($d_n \approx 2.9 \cdot 10^{-26}$ ecm $\Rightarrow \theta < 10^{-9}$) ...

□ Oddziaływanie w stanie końcowym (FSI)

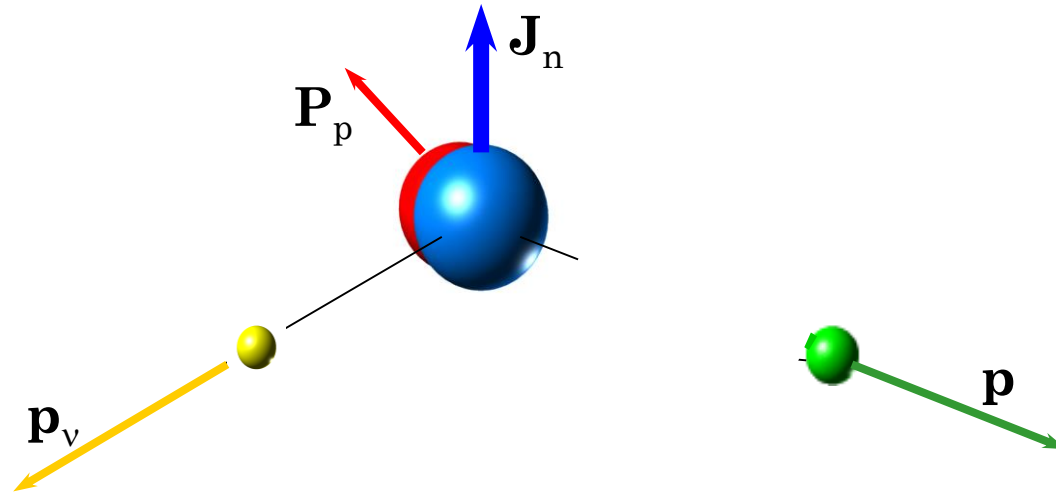
TRV w oddziaływaniu słabym?

- Ogólna forma Lorenzowsko-niezmienniczego Hamiltonianu oddziaływania słabego dla rozpadu *neutronu*:

$$H = \bar{e}\gamma_\lambda (C_V + C'_V\gamma_5)v_e\bar{p}\gamma^\lambda n + \bar{e}\gamma_\lambda\gamma_5 (C_A + C'_A\gamma_5)v_e\bar{p}\gamma^\lambda\gamma_5 n \\ + \bar{e}(C_S + C'_S\gamma_5)v_e\bar{p}n + \bar{e}\frac{\sigma_{\lambda\mu}}{\sqrt{2}}(C_T + C'_T\gamma_5)v_e\bar{p}\frac{\sigma_{\lambda\mu}}{\sqrt{2}}n \\ + \bar{e}\gamma_5(C_P + C'_P\gamma_5)v_e\bar{p}\gamma^5 n + H.c.$$

- W modelu Standardowym: oddziaływanie V-A, ($C_V = C'_V = 1$, $C_A = C'_A = \lambda = -1.27$, **reszta = 0**) ale faktyczne ograniczenia są skończone, na poziomie % i mogą skrywać egzotyczne sprzężenia odpowiedzialne za TRV.
- Dokładniejsze ograniczenia na C_i - precyzyjniejsze testy of proponowanych rozszerzeń Modelu Standardowego: Left-Right Symmetric Models, Leptoquark exchange, Supersymmetric Models ...

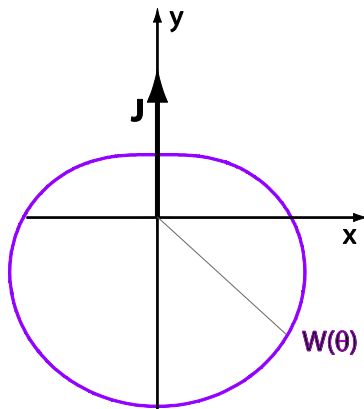
Korelacje kierunkowe w rozpadzie neutronu



(~885.7s)

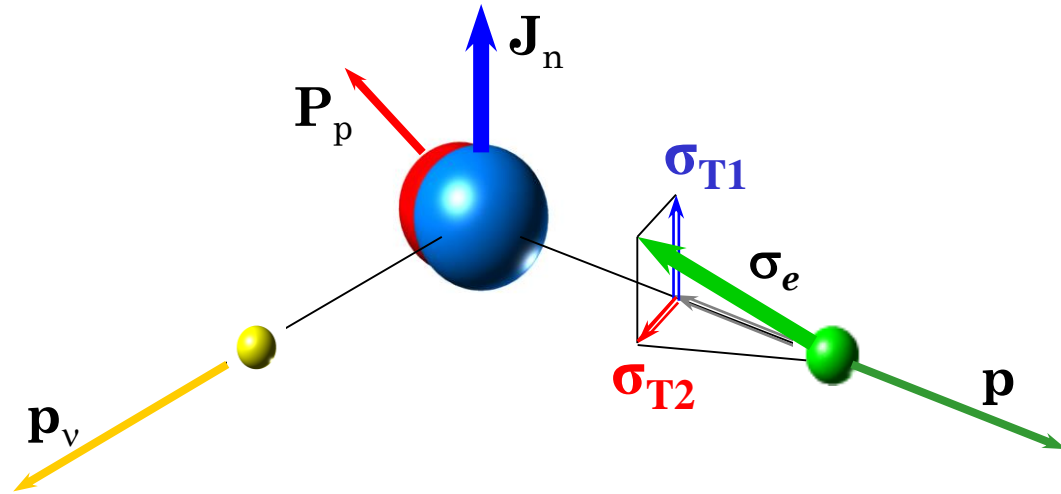


$$W(\theta, E) \propto 1 + A \frac{\vec{J} \cdot \vec{p}}{E} + \dots$$



A- asymetria rozpadu (-0.1173)

Współczynniki korelacji w rozpadzie neutronu



(~885.7s)

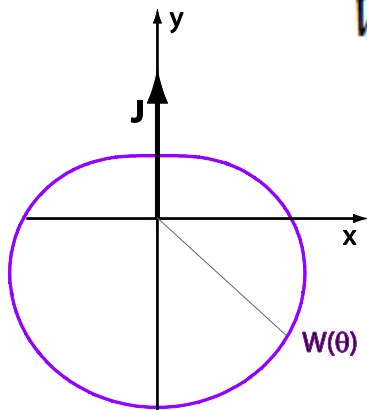


$$T p = - p$$

$$T \sigma = - \sigma$$

$$T J = - J$$

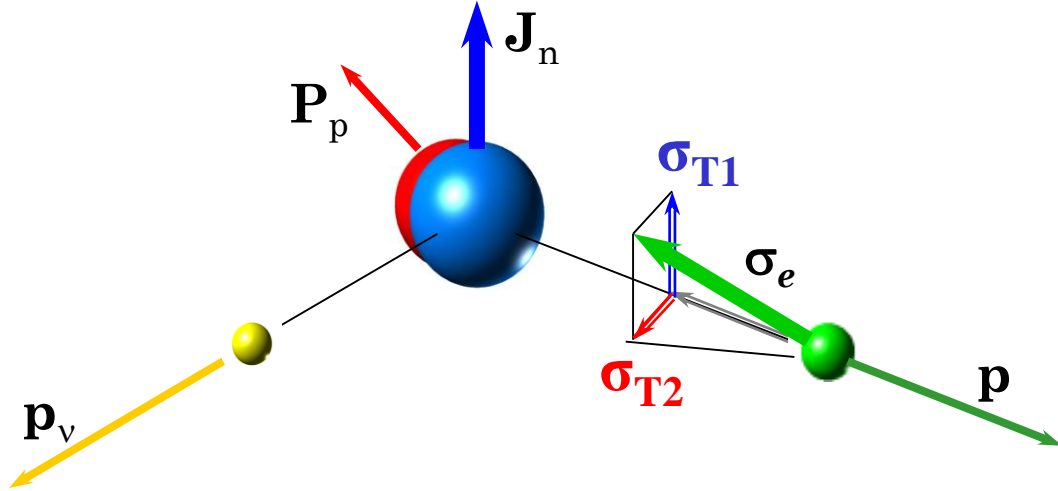
$$W(\theta, E, \sigma_T) \propto 1 + A \frac{\vec{J} \cdot \vec{p}}{E} + N \vec{J} \cdot \hat{\sigma} + R \frac{\vec{J} \cdot \vec{p} \times \hat{\sigma}}{E} + \dots$$



A - asymetria rozpadu (-0.1173)

N, R - współczynniki korelacji

Współczynniki korelacji w rozpadzie neutronu



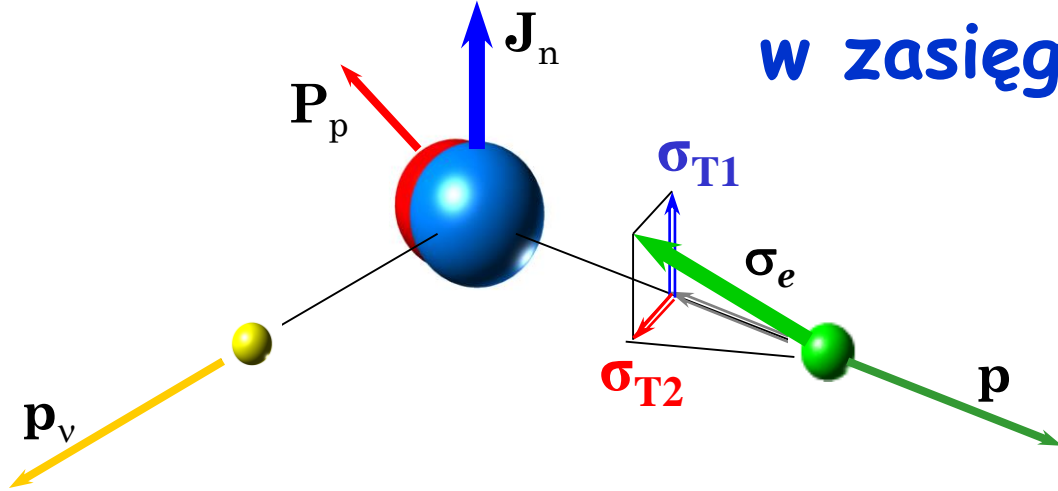
PDG:

$$\begin{aligned}
 W(J, \sigma, E, E_\nu, p, q) \propto & 1 + a \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{q}}{E E_\nu} + b \frac{m}{E} + \frac{\langle J \rangle}{j} \left(A \frac{p}{E} + B \frac{q}{E_\nu} + C \frac{q}{E_p} + D \frac{\mathbf{p} \times \mathbf{q}}{E E_\nu} \right) + \\
 & \sigma \left(G \frac{p}{E} + H \frac{q}{E_\nu} + K \frac{p}{E+m} \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{q}}{E E_\nu} + L \frac{\mathbf{p} \times \mathbf{q}}{E E_\nu} \right) + \\
 & \frac{\langle J \rangle}{j} \left(N \frac{\sigma}{E} + Q \frac{\vec{p} \cdot \vec{p} \cdot \sigma}{E E+m} + R \frac{\mathbf{p} \times \sigma}{E} + S \sigma \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{q}}{E E_\nu} + T q \frac{\sigma \cdot \mathbf{p}}{E E_\nu} \right) + \\
 & \frac{\langle J \rangle}{j} \left(U p \frac{\sigma \cdot \mathbf{q}}{E E_\nu} + V \frac{\sigma \times \mathbf{q}}{E_\nu} + W \frac{\mathbf{p} \times \mathbf{q}}{E E_\nu} \frac{\mathbf{p} \cdot \sigma}{E+m} \right)
 \end{aligned}$$

J.D.Jackson, SB Treiman, HW Wyld,
Nucl.Phys, 4206-212, 1957

Współczynniki korelacji w rozpadzie neutronu

w zasięgu eksperymentu BRAND



$$\begin{aligned}
 W(J, \sigma, E, E_v, p, q) \propto & 1 + a \frac{p \cdot q}{E E_v} + \boxed{b} \frac{m}{E} + \frac{\langle J \rangle}{j} \left(A \frac{p}{E} + B \frac{q}{E_v} + C \frac{q}{E_p} + D \frac{p \times q}{E E_v} \right) + \\
 & \sigma_T \left(H \frac{q}{E_v} + L \frac{p \times q}{E E_v} + N \frac{\langle J \rangle}{j} + R \frac{\langle J \rangle}{j} \times \frac{p}{E} \right) + \\
 & \sigma_T \left(S \frac{\langle J \rangle}{j} \frac{p \cdot q}{E E_v} + U \frac{\langle J \rangle}{j} \frac{p \cdot q}{E E_v} + V \frac{q}{E_v} \times \frac{\langle J \rangle}{j} \right)
 \end{aligned}$$

Dlaczego neutron?

- ❑ Najprostsze i najdokładniejsze przejście od mierzonych obserwacji do stałych podstawowych oddziaływania słabego.
- ❑ Brak efektów struktury jądra.
 - Elementy macierze Fermiego i Gamow-Tellera znane dokładnie:
 $M_F = 1, M_{GT} = \sqrt{3}.$
- ❑ Małe i dokładnie wyliczalne poprawki na oddziaływanie w stanie końcowym i odrzut...
 - W stanie końcowym tylko proton, $Z=1$ - słabe oddziaływanie elektromagnetyczne.
 - Brak wpływu elektronów z powłok atomowych.
 - Stosunkowo mała asymetria rozpadu.
- ❑ Zbudowany z kwarków u i d .

Korelacje kierunkowe i egzotyczne sprzężenia w oddziaływaniu słabym

TRV

$$X = X_{SM} + X_{FSI} + c_{\text{Re } S} \text{Re } S + c_{\text{Re } T} \text{Re } T + c_{\text{Im } S} \text{Im } S + c_{\text{Im } T} \text{Im } T$$

gdzie:

$$a = \frac{1-\lambda^2}{1+3\lambda^2}$$

$$A = -2\lambda \frac{1+\lambda}{1+3\lambda^2}$$

$$B = 2\lambda \frac{\lambda-1}{1+3\lambda^2}$$

$$G = -1$$

$$K = \frac{\lambda^2-1}{1+3\lambda^2}$$

$$Q = 2\lambda \frac{1+\lambda}{1+3\lambda^2}$$

$$b=D=H=L=N=R=S=U=W=0$$

$$N_{fsi} = \frac{m}{E} \cdot \frac{2\lambda(1-\lambda)}{1+3\lambda^2} = -\frac{m}{E} \cdot A$$

$$R_{fsi} = \frac{\alpha m}{p} \cdot \frac{2\lambda(1-\lambda)}{1+3\lambda^2} = -\frac{\alpha m}{p} \cdot A$$

$$S = \frac{C_S + C_{S'}}{C_V}$$


$$T = \frac{C_T + C_{T'}}{C_A}$$

$c_{\text{Re } S}, c_{\text{Re } T}, c_{\text{Im } S}, c_{\text{Im } T}$

są funkcjami $\lambda = \frac{C_A}{C_V}$ i wielkości kinematycznych

J.D.Jackson, SB Treiman, HW Wyld, Nucl.Phys, 4206-212, 1957

Korelacje kierunkowe i egzotyczne sprzężenia w oddziaływaniu słabym

	SM (λ)	FSI (λ)	c(ReS)	c(Re \mathcal{T})	c(ImS)	c(Im \mathcal{T})
<i>a</i>	-0.104793	0	-0.171405 [†]	0.171405 [†]	-0.000727	+0.001171
<i>b</i>	0	0	+0.171405	+0.828595	0	0
<i>A</i>	-0.117233	0	0	0	-0.000923	+0.001420
<i>B</i>	+0.987560	0	-0.126422	+0.194539	0	0
<i>D</i>	0	0	0	0	+0.000923	-0.000923
<i>H</i>	0	+0.060888	-0.171405	+0.276198	0	0
<i>L</i>	0	-0.000444	0	0	+0.171405	-0.276198
<i>N</i>	0	+0.068116	-0.217582	+0.334815	0	0
<i>R</i>	0	+0.000497	0	0	-0.217582	+0.334815
<i>S</i>	0	-0.001845	+0.217582	-0.217582	0 	0
<i>U</i>	0	0	-0.217582	+0.217582	0	0
<i>V</i>	0	0	0	0	-0.217582	+0.217582

W 1-szym rzędzie
Bez odrzutu
Ładunek punktowy

* Kinematical factor averaged over electron kinetic energy $E_k = (200,783)$ keV

† $(|C_S|^2 + |C'_S|^2)/2$ instead of ReS and $(|C_T|^2 + |C'_T|^2)/2$ instead of ReT, respectively

Courtesy of K. Bodek

Eksperyment nTRV - wyniki

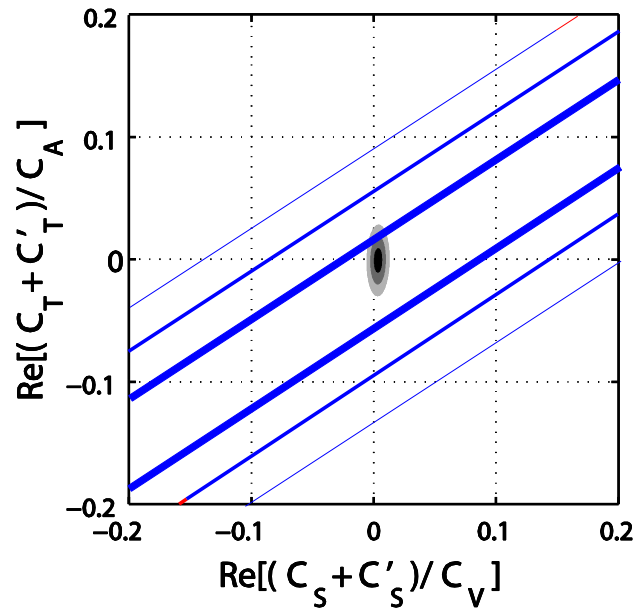
$$N \approx 0.276 \cdot \text{Re}(S) + 0.335 \cdot \text{Re}(T) - A \cdot \frac{m}{E} \quad N_{\text{FSI}} \sim 0.068 \pm 6 \cdot 10^{-4}$$

$$R \approx 0.276 \cdot \text{Im}(S) + 0.335 \cdot \text{Im}(T) - A \cdot \frac{\alpha m}{p} \quad R_{\text{FSI}} \sim 0.0006 \pm 6 \cdot 10^{-6}$$

$$T = \frac{C_T + C'_T}{C_A}$$

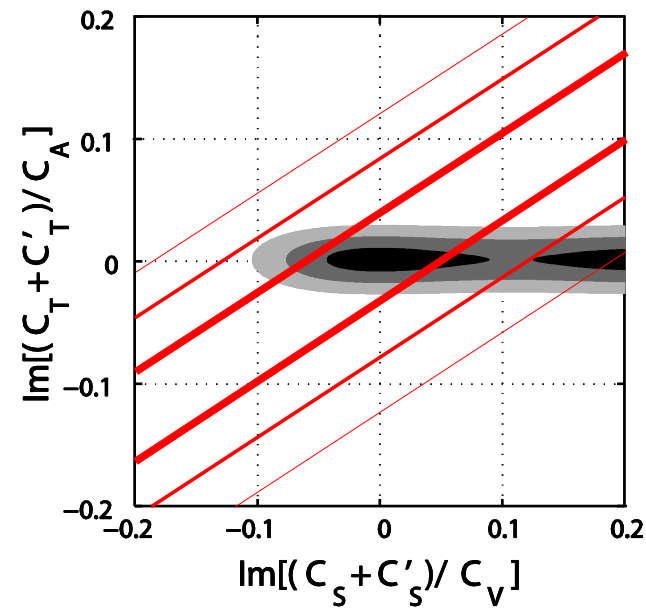
$$S = \frac{C_S + C'_S}{C_V}$$

Istniejące ograniczenia



$$N = (62 \pm 12 \pm 5) \cdot 10^{-3}$$

i nasz wynik



$$R = (4 \pm 12 \pm 5) \cdot 10^{-3}$$

A.Kozela et al.,
Phys. Rev C **85**, 045501(2012)

Eksperyment nTRV - wyniki

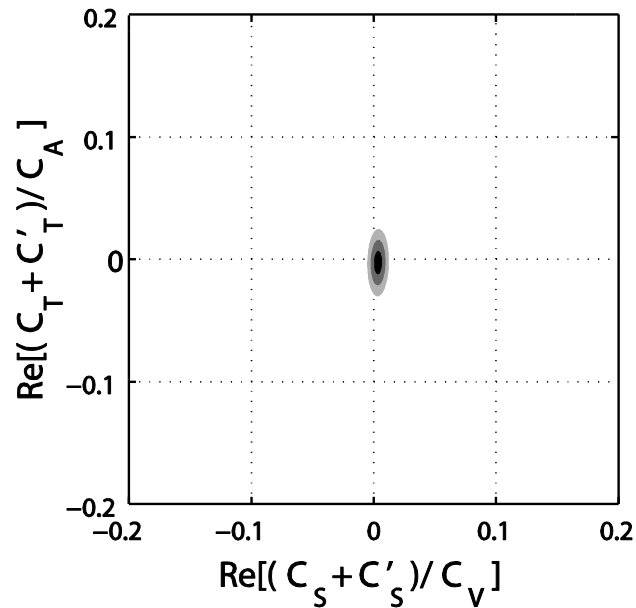
$$N \approx 0.276 \cdot \text{Re}(S) + 0.335 \cdot \text{Re}(T) - A \cdot \frac{m}{E} \quad N_{\text{FSI}} \sim 0.068 \pm 6 \cdot 10^{-4}$$

$$R \approx 0.276 \cdot \text{Im}(S) + 0.335 \cdot \text{Im}(T) - A \cdot \frac{\alpha m}{p} \quad R_{\text{FSI}} \sim 0.0006 \pm 6 \cdot 10^{-6}$$

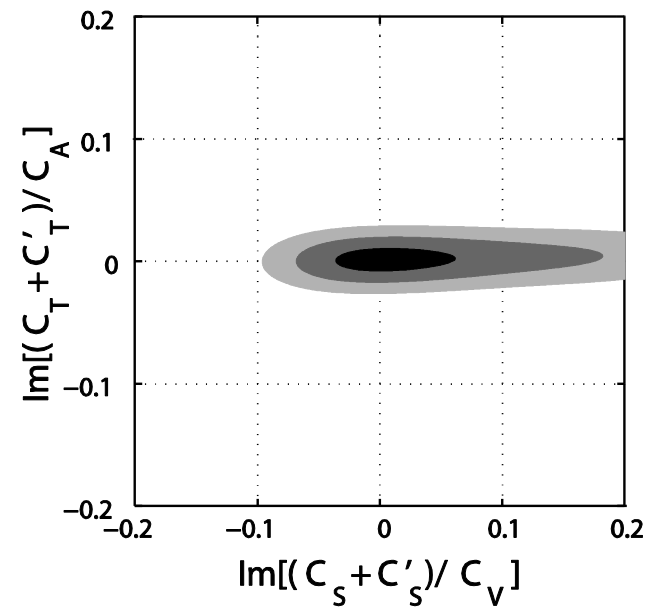
$$T = \frac{C_T + C'_T}{C_A}$$

$$S = \frac{C_S + C'_S}{C_V}$$

Istniejące ograniczenia



$$N = (62 \pm 12 \pm 5) \cdot 10^{-3}$$



$$R = (4 \pm 12 \pm 5) \cdot 10^{-3}$$

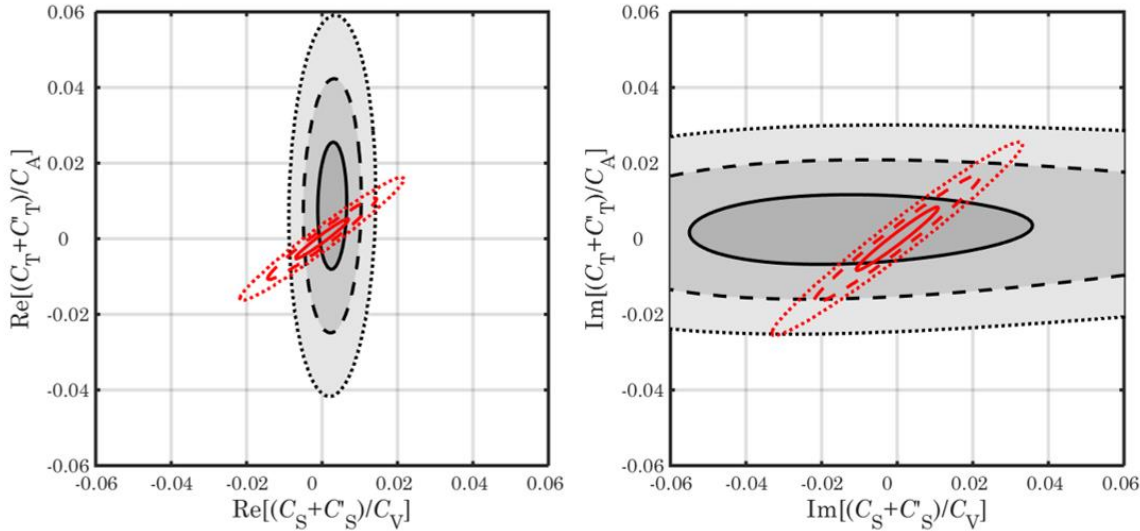
stat \pm syst

A.Kozela et al.,
Phys. Rev C **85**, 045501(2012)

Eksperyment BRaND oczekiwana dokadność

(ograniczenia dla dokadności $5 \cdot 10^{-4}$)

Courtesy of K. Bodek

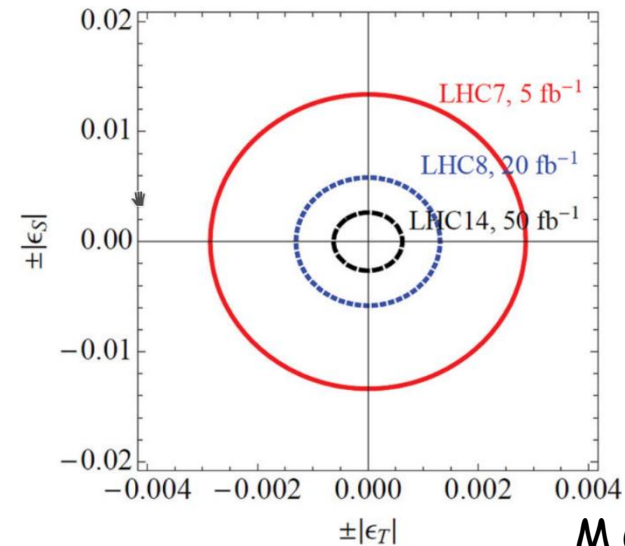
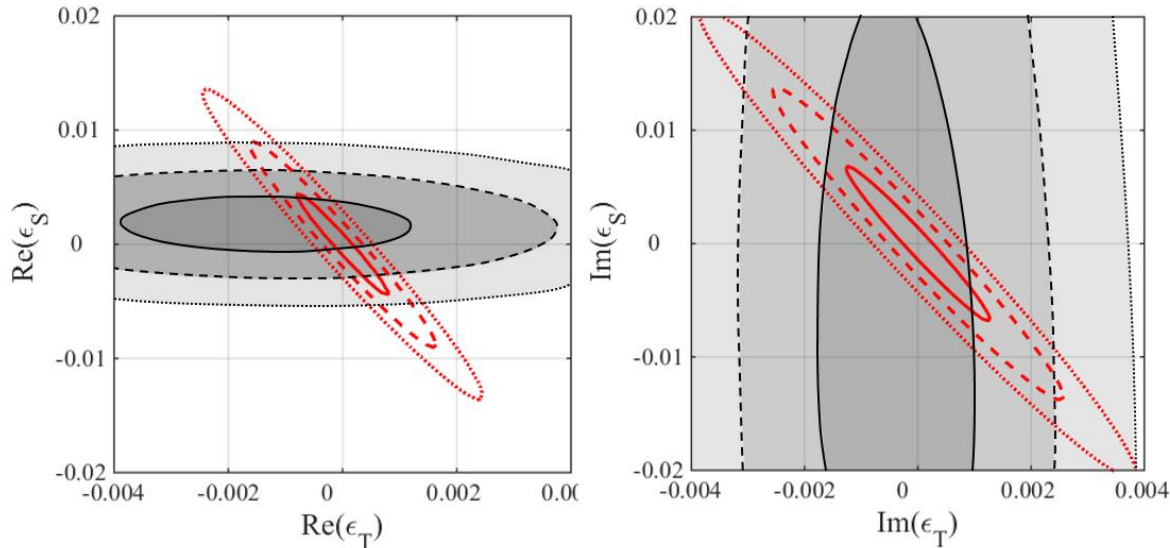


$$W(J, \sigma, E, E_\nu, p, q) \propto 1 + a \frac{p \cdot q}{E E_\nu} + b \frac{m}{E} + \frac{\langle J \rangle}{j} \left(A \frac{p}{E} + B \frac{q}{E_\nu} + C \frac{q}{E_p} + D \frac{p \times q}{E E_\nu} \right) +$$

$$\sigma_T \left(H \frac{q}{E_\nu} + L \frac{p \times q}{E E_\nu} + N \frac{\langle J \rangle}{j} + R \frac{\langle J \rangle}{j} \times \frac{p}{E} \right) +$$

$$\sigma_T \left(S \frac{\langle J \rangle}{j} \frac{p \cdot q}{E E_\nu} + U \frac{\langle J \rangle}{j} \frac{p \cdot q}{E E_\nu} + V \frac{q}{E_\nu} \times \frac{\langle J \rangle}{j} \right)$$

Przejsie od $C_{T,S}$ i $C'_{T,S}$ do $\epsilon_{S,T}$ poprzez EFT
T.Bhattacharya et al., Phys. Rev D **85**, 054512(2012)



M.Gonzalez-Alonso et al.

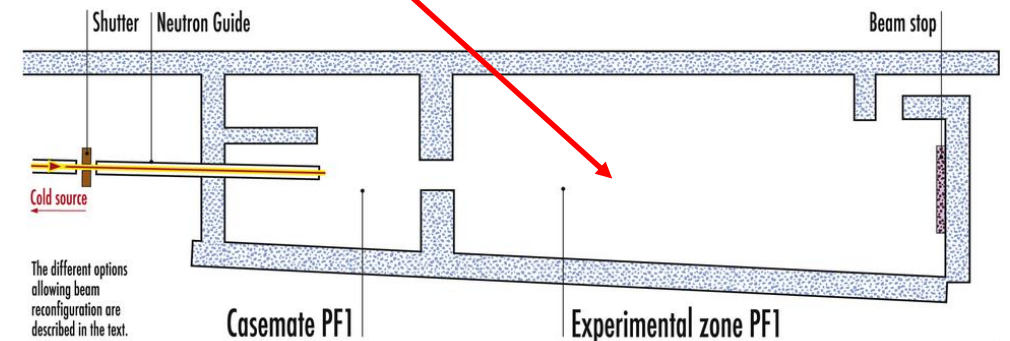
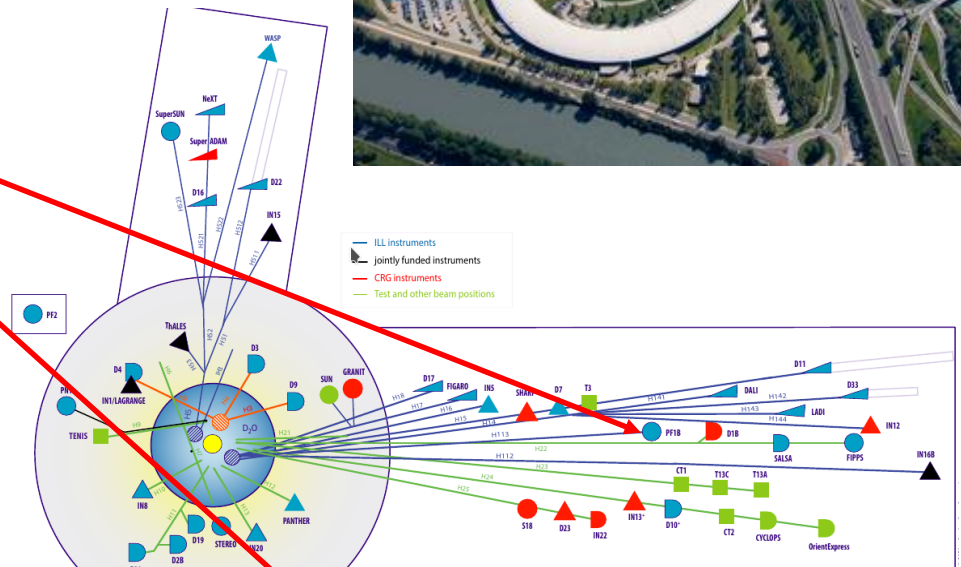
Eksperyment BRAND - czego potrzebujemy

- ❑ Spin neutronu
- ❑ Pęd elektronu
- ❑ Poprzeczne składowe polaryzacji elektronu
- ❑ Pęd protonu

Spin neutronu: wiązka zimnych neutronów +

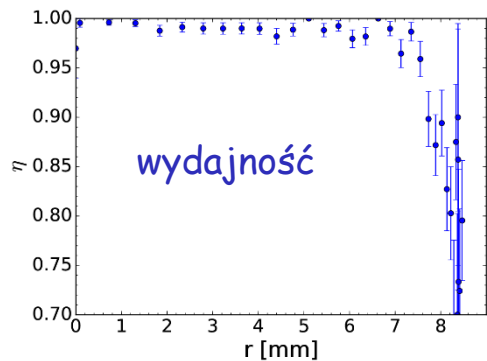
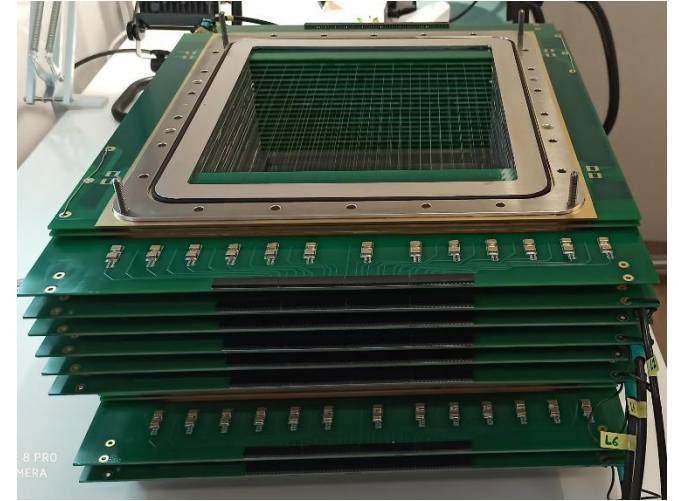
Jednorodne pole magnetyczne utrzymujące ich polaryzację

- ❑ PF1b areal w ILL, Grenoble
- ❑ Polaryzacja > 99.7% (80%)
- ❑ "Zimne": średnia długość $\sim 4.3 \text{ \AA}$
($V \sim 1000 \text{ m/s}$)
- ❑ Intensywność $2 \cdot 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{s}$
- ❑ Przekrój $6 \times 6 \text{ cm}^2$
- ❑ Dywergencja $\sim 1\%$
- ❑ Pełne prowadzenie w próżni (He)

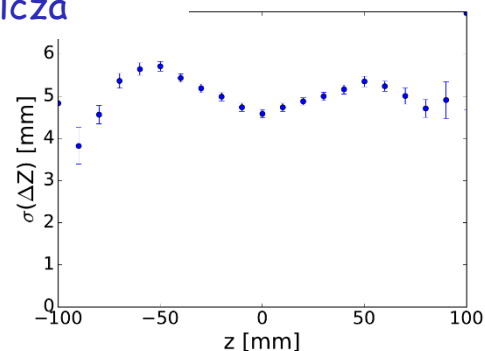
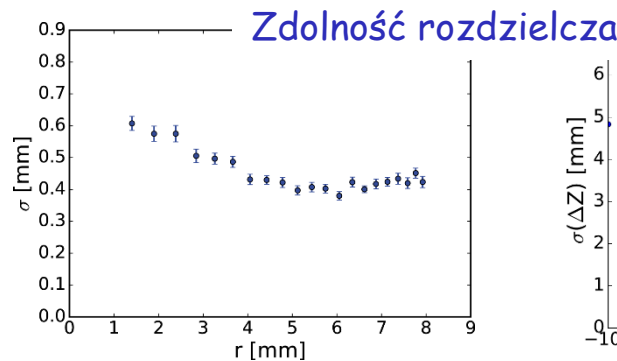


Pęd elektronu - rekonstrukcja toru lotu

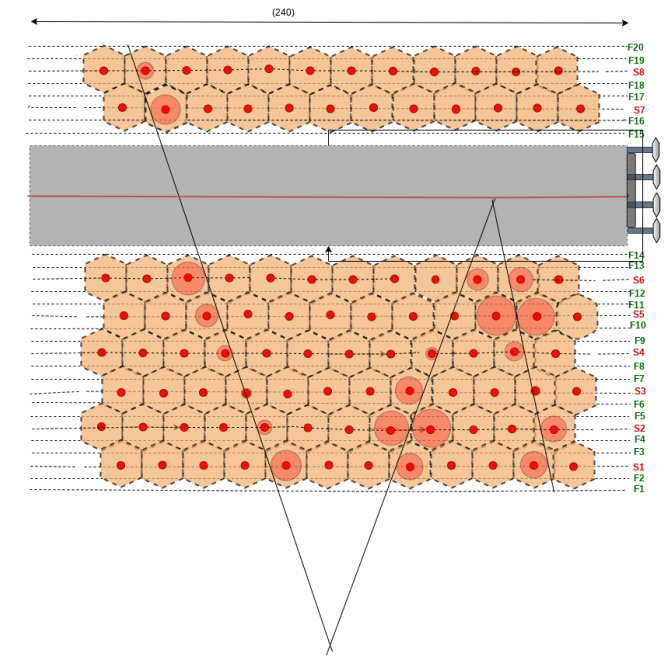
- ❑ Maksymalna energia elektronu z rozpadu neutronu 782 keV
- ❑ Rekonstrukcja śladu w wielodrutowej komorze **dryfowej**
 - Lepsza zdolność rozdzielcza z czasu dryfu (**x5**)
 - Zastosowanie metody podziału ładunku (**2x mniej płaszczyzn przy porównywalnej do nTRV rozdzielczości**)
- ❑ Heksagonalna geometria celi (**2x mniej drutów**)
- ❑ Mieszanka 1/4/95 alcohol/izobutan/He (**~2x rzadsza**)
- ❑ Wydajność **~97%**



Adam Kozela

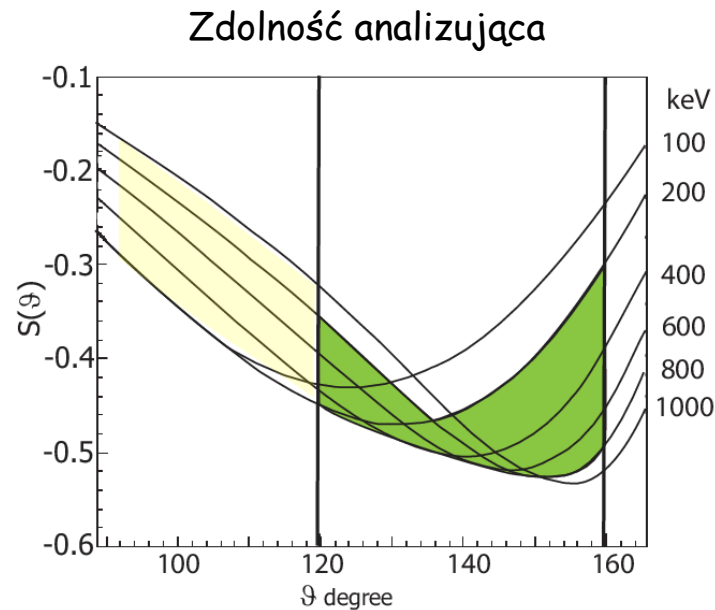
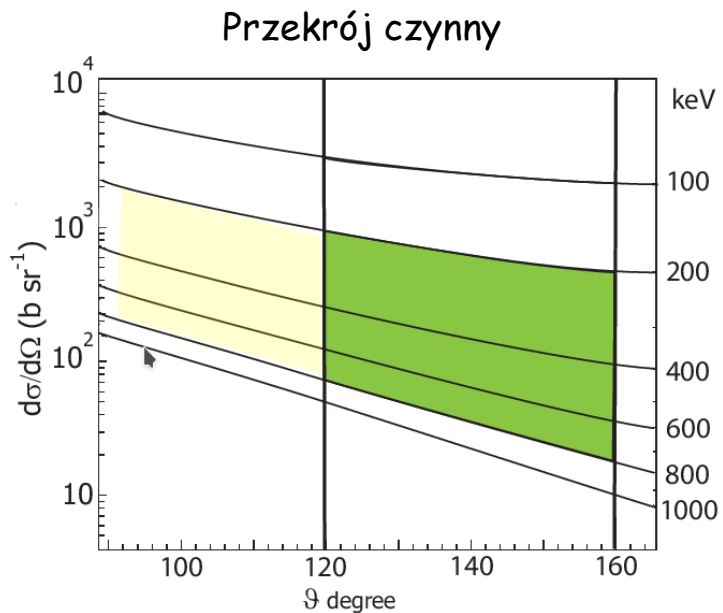
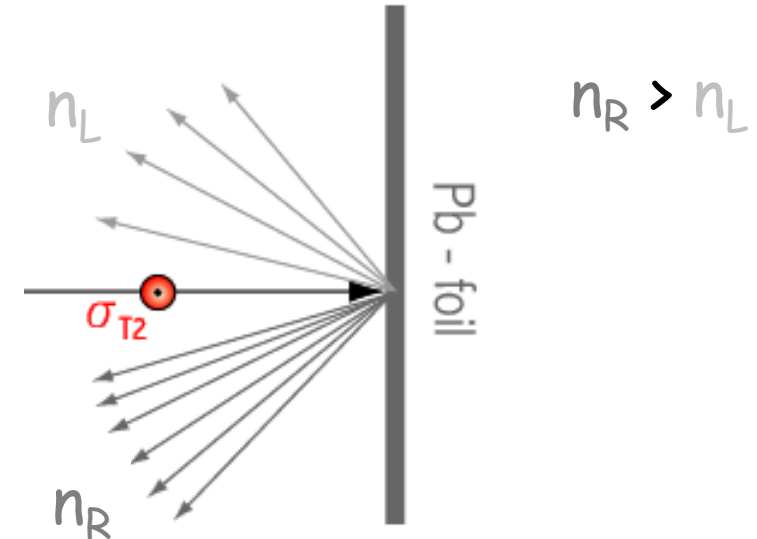


29/04/2021



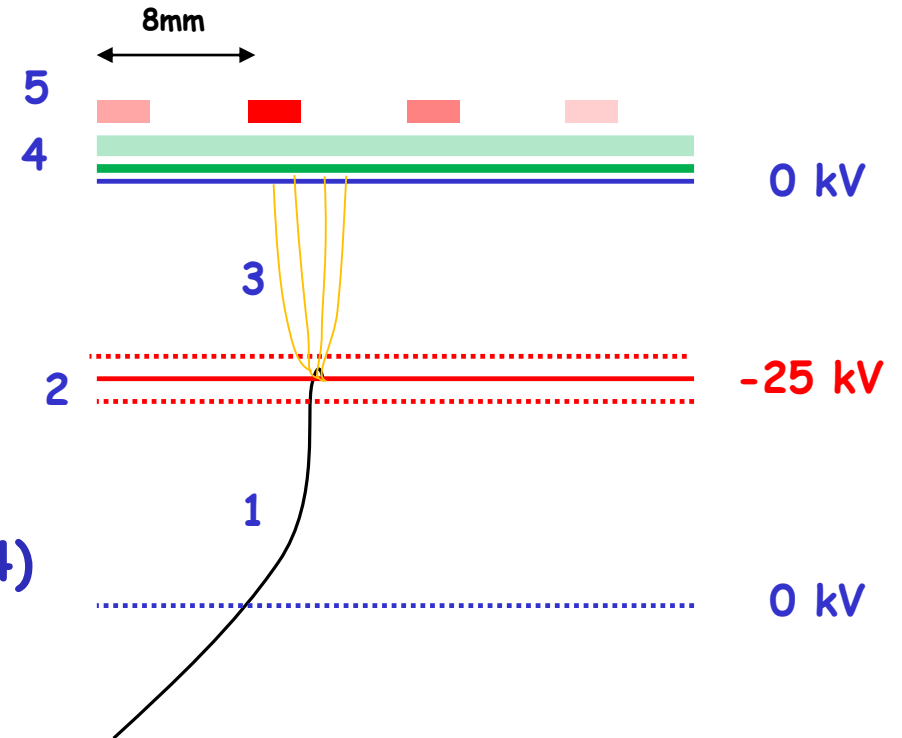
Poprzeczna polaryzacja elektronu

- ❑ Rekonstrukcja trajektorii
- ❑ Rozpraszanie wsteczne od ciężkich jąder (Pb, Au, U)
- ❑ Polarimetria Motta
- ❑ Powiększona akceptancja kąta rozpraszania Motta



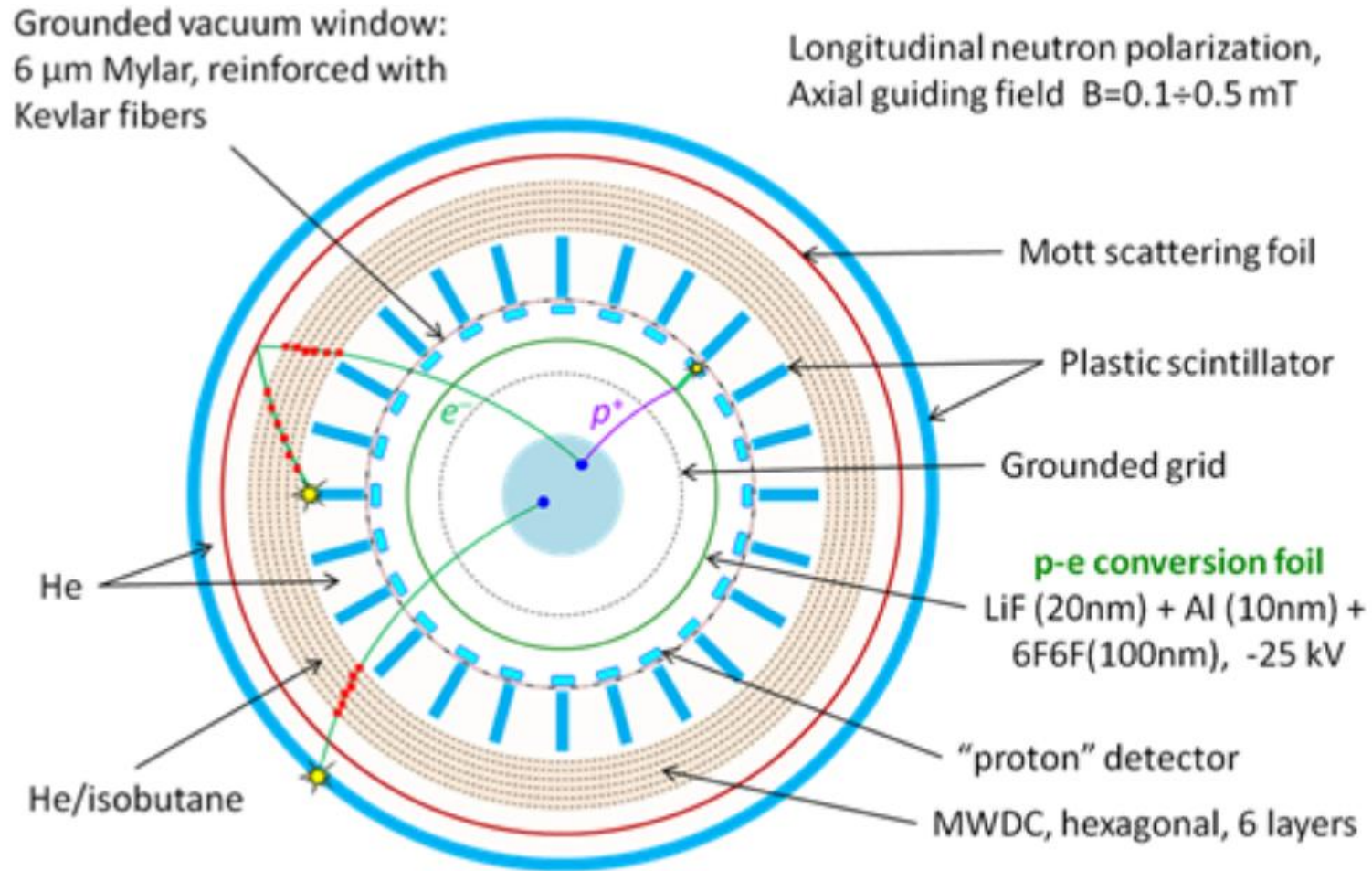
Detekcja protonów

- ❑ Maksymalna energia protonu z rozpadu neutronu **750 eV**
- ❑ Neutralizacja protonów - dobra próżnia $<10^{-4}$
- ❑ Przyspieszenie wstępne w polu elektrycznym (1)
- ❑ Konwersja protonu do elektronów (~ 10)
- ❑ Folia konwertująca: **110 nm** (2)
 - 80nm 6F6Fpoliamid + 20nm LiF + 10nm Al
- ❑ Przyspieszenie elektronów ($\sim 250\text{keV}$) (3)
- ❑ Detekcja elektronów w cienkim scyntylatorze (**35 μm**) (4)
- ❑ Brak czułości na elektrony z rozpadu neutronu
- ❑ Pozycyjnie czuła detekcja światła SiPM (i protonu) (5)



Brand - zasada działania

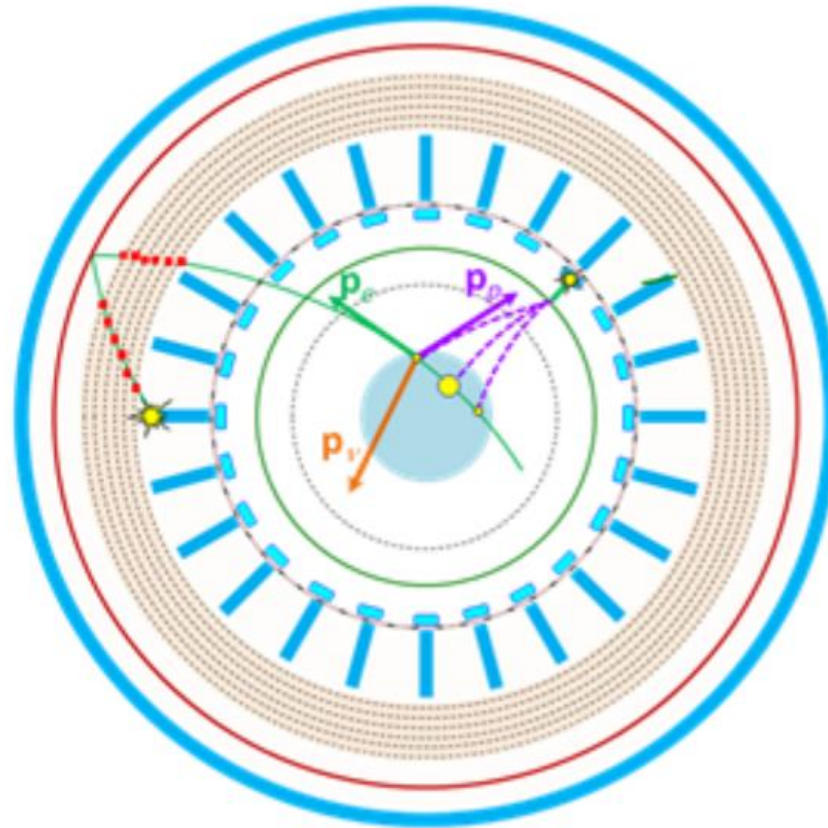
Projekt pierwotny



Courtesy of K. Bodek

Rekonstrukcja pędu protonu

Principle of vertex reconstruction with
3-body kinematics

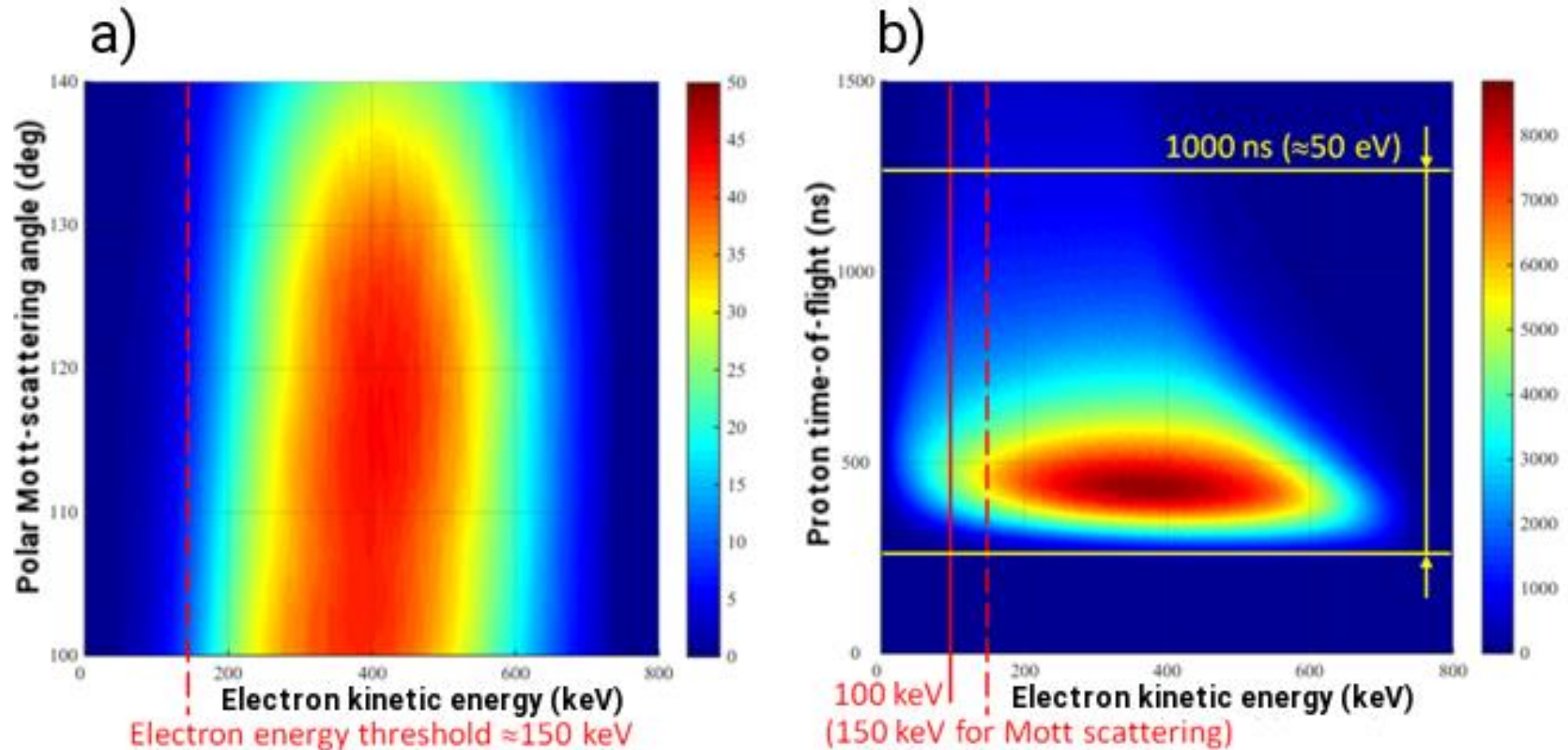


Courtesy of K. Bodek

Miejsce rozpadu neutronu leży na przecięciu toru lotu elektronu i objętości wiązki

Dla każdego punktu tego przecięcia możemy z czasu przelotu policzyć pęd protonu, oraz wagi uwzględniające rozkład gęstości wiązki oraz wyniki fitu kinematycznego dla reakcji rozpadu neutronu.

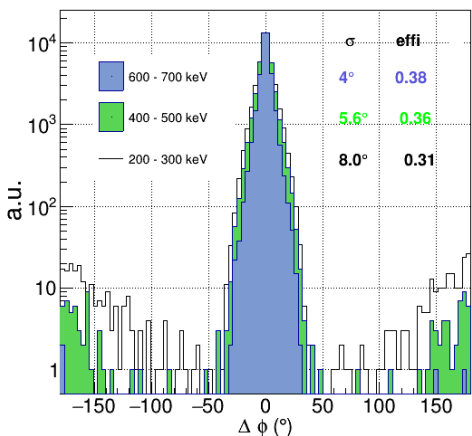
BRAND figure-of-merit



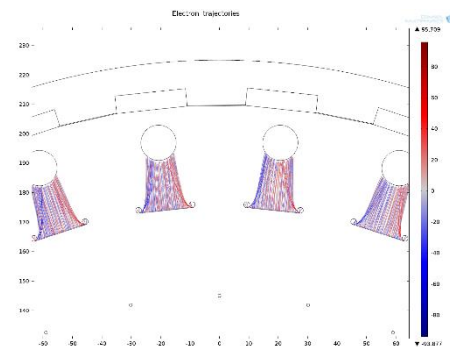
Courtesy of K. Bodek

Symulacje Monte-Carlo z polem elektrycznym (COMSOL)

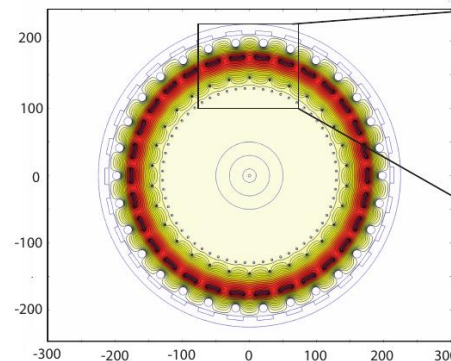
- Wpływ na transport protonów i elektronów (wydajność detekcji, zmiana kąta)
- Różne konfiguracje elektrod
- Efekty ogniskujące
- Rozpraszanie wsteczne elektronów od ścianek komory próżniowej (różne materiały)



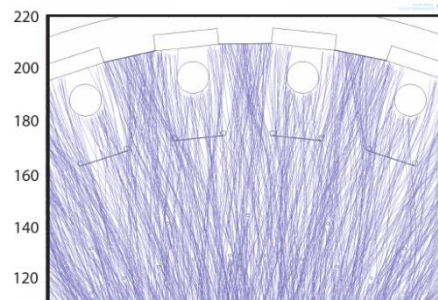
Adam Kozela



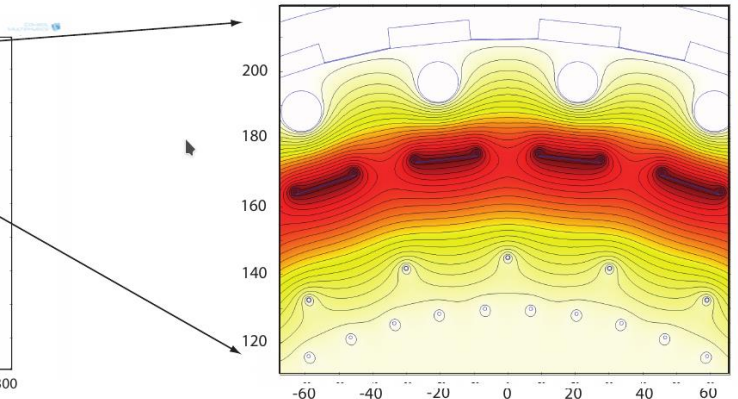
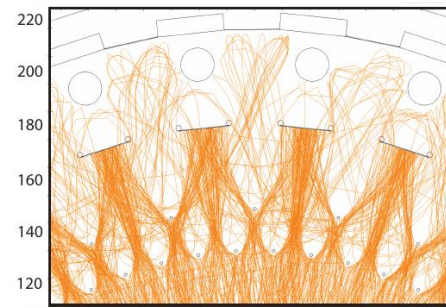
Electric potential



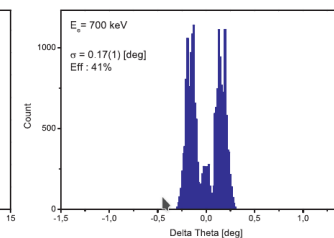
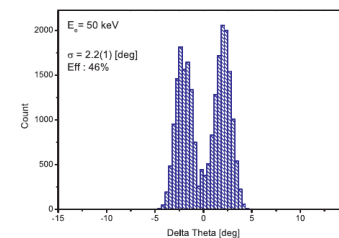
Tracking of decay electrons



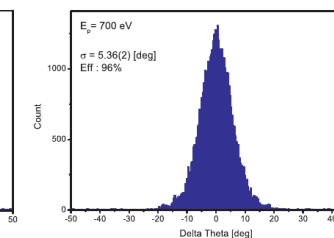
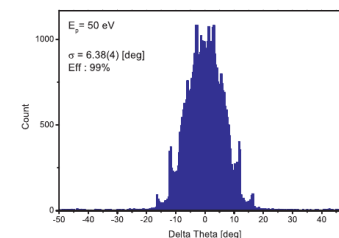
Tracking of decay protons



Approximately 43% of all decay electrons leave the vacuum chamber changing their original direction by less than 4 degree



More than 95% of all decay protons reach the conversion foil changing their original direction by less than 15 degrees

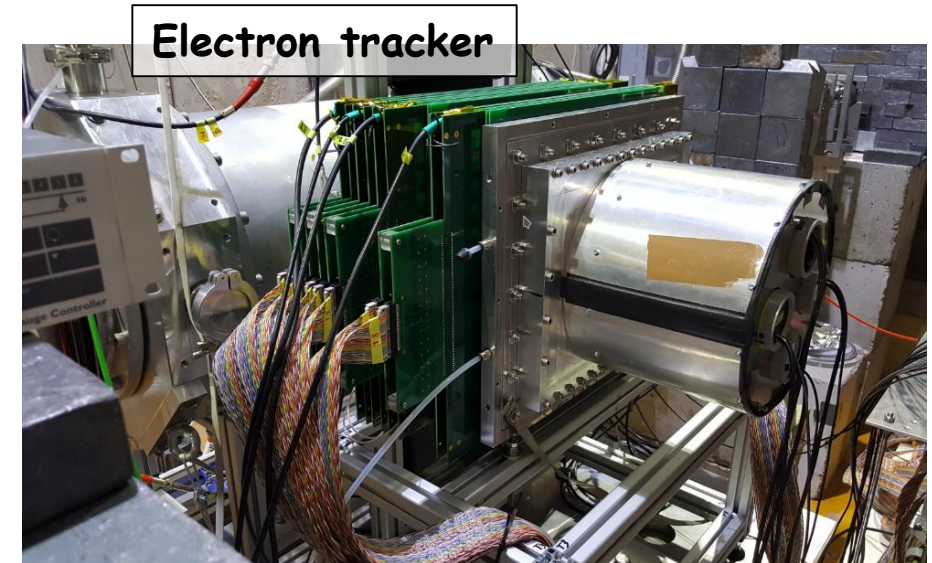
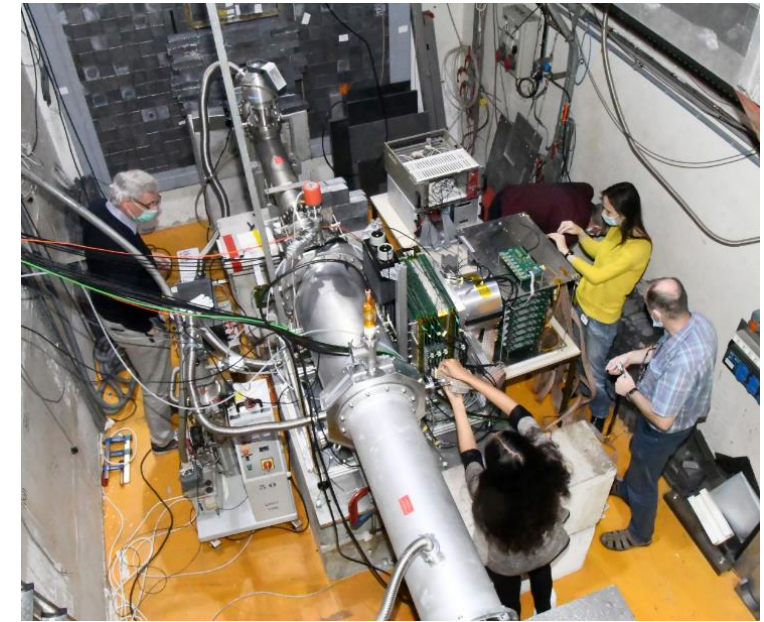
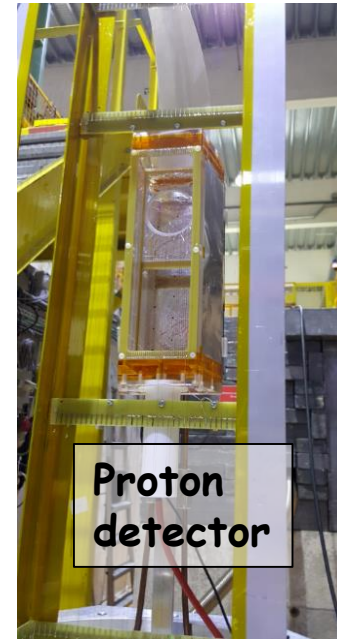


29/04/2021

Pierwszy pomiar w ILL, Grenoble wrzesień 2020

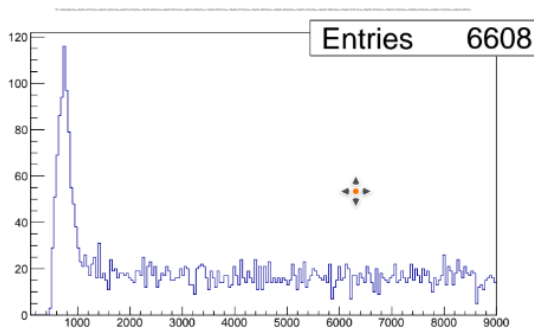
□ Test detektora w realnych warunkach

- Instalacja detektora elektronów
- Komory próżniowej z cienkimi oknami dla elektronów
- Detektora protonów z folią konwertera
- Upgrade polaryzatora wiązki
- Test nowej elektroniki front-end
- Nowy system akwizycji danych

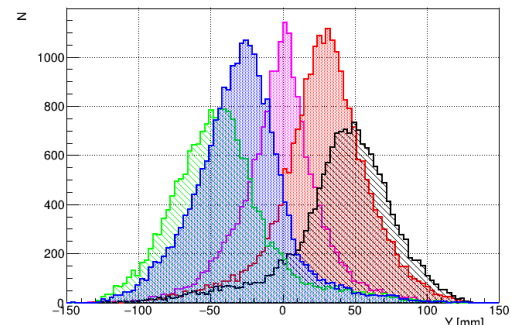


Wstępne rezultatu testu z września 2020

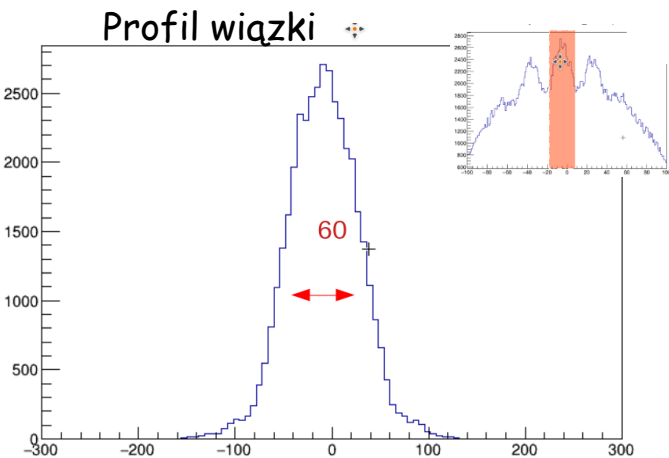
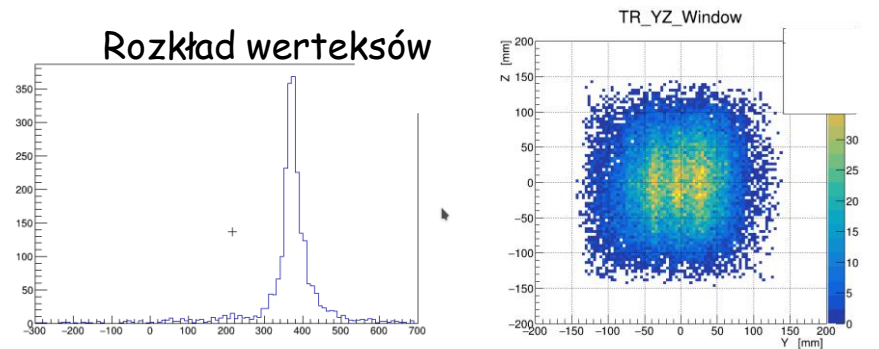
- ❑ Wszystkie składowe systemu detekcyjnego pracowały
- ❑ Zebrano ~200GB danych
- ❑ Potwierdzono niski poziom tła od wiązki neutronów
- ❑ Trwają prace nad rekonstrukcją toru elektronów z podziału ładunku, ale z czasu dryfu mamy:
 - Rozkłady na oknie próżniowym
 - Rozkłady pozycji werteksów Motta
 - Profile wiązki neutronów
 - Koincydencje detektora protonowego z elektronami



Adam Kozela

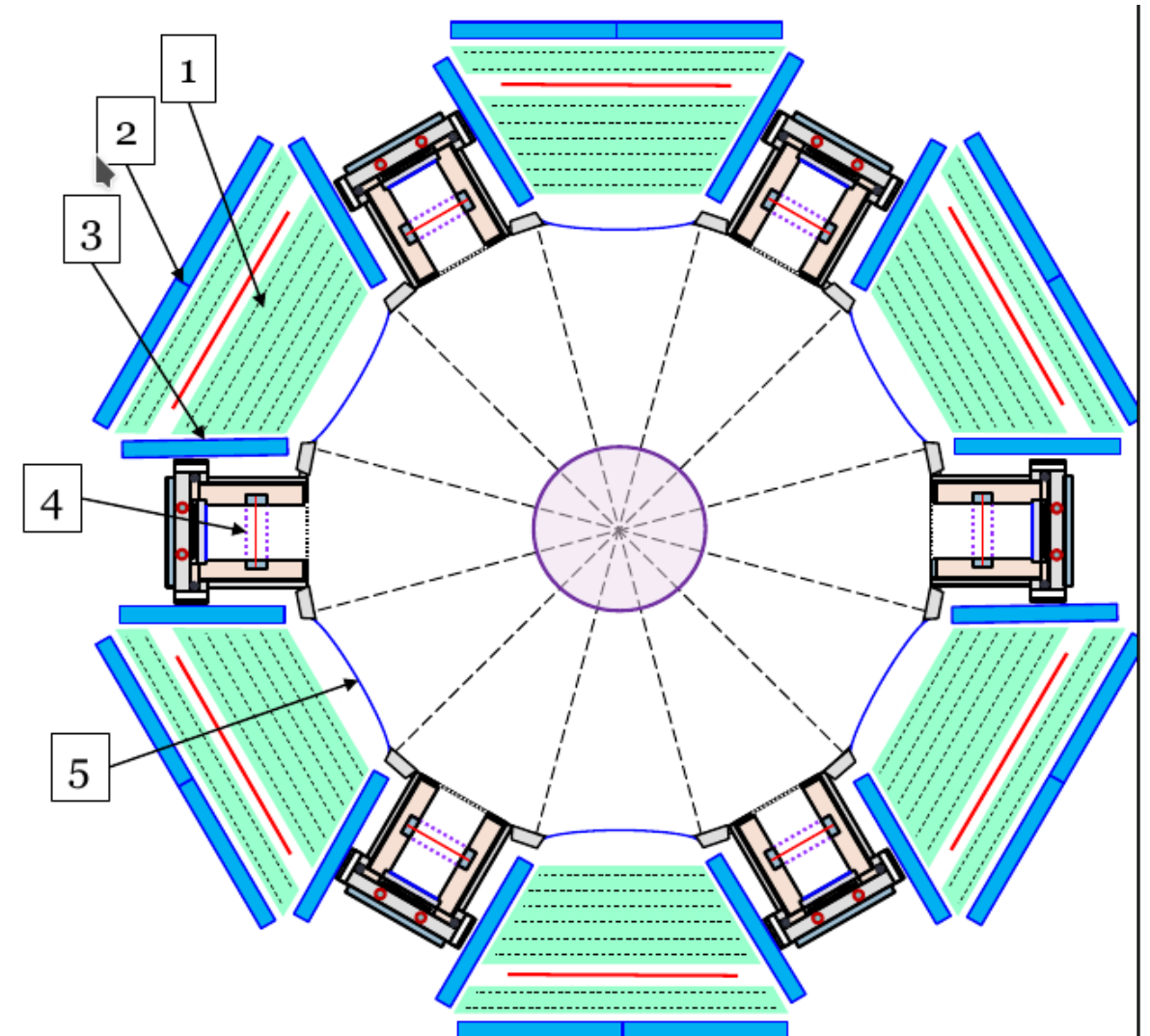
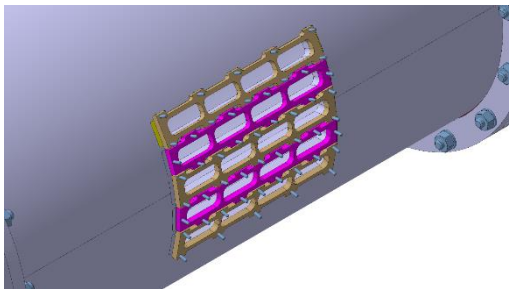


29/04/2021



Nowa koncepcja detektora?

1. Wielodrutowa komora dryfowa
2. Scyntylatory trygerujące elektrony wprost
3. Scyntylatory Motta
4. Detektor protonów
5. Okno próżniowe



Podsumowanie i plany

- ❑ Pierwszy test z wiązką przeprowadzony w ILL (5 dni, wrzesień 2020).
- ❑ Kolejna kampania pomiarowa we wrześniu 2021 - 4 tygodnie:
 - Magnetyczne pole wiodące, analiza polaryzacji
 - Duże okno próżniowe na elektrony z rozpadu neutronu
 - 4-6 razy większa powierzchnia folii konwertera protonów
 - Nowe detektory elektronów Motta o wielokrotnie większej akceptancji kątowej
 - Redukcja zaobserwowanych szumów w elektronice front-end
 - Nowe funkcjonalności tryggera
- ❑ 2021-2023: Sfinalizowanie ostatecznego projektu, budowa 1/6 detektora, poprawa precyzji w stosunku do nTRV o czynnik $2\div 3$ stat. i syst.
- ❑ 2023-2025: ukończenie całości detektora, poprawa precyzji w stosunku do nTRV o czynnik ~ 20 stat. i 5 syst.

Thank You