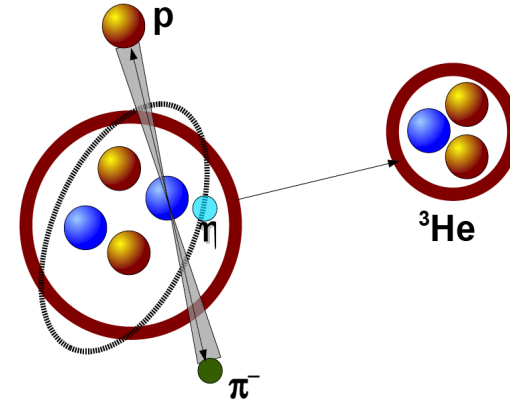


J-PET



Search for new kind of nuclear matter
and
development of novel detector technologies

Wojciech Krzemień



**INNOWACYJNA
GOSPODARKA**
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



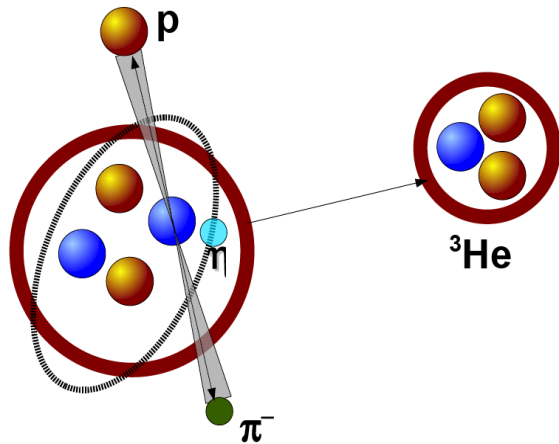
UNIWERSYTET
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO

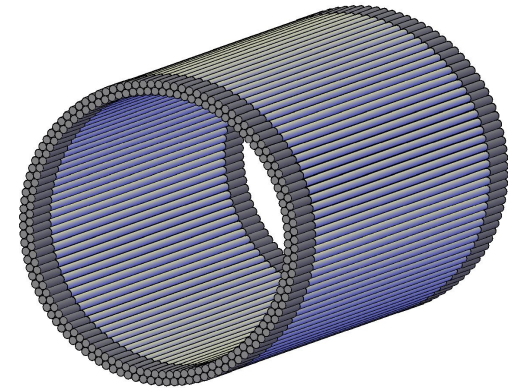


Topics



Search for new kind of nuclear matter (mesic nuclei)

with WASA-at-COSY



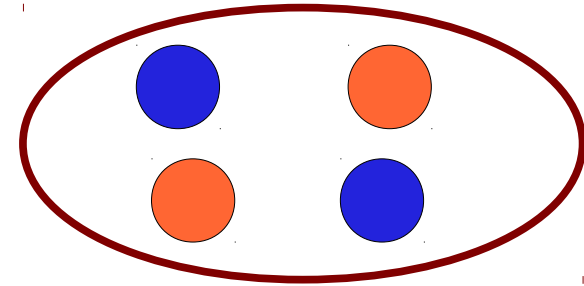
Positron emission tomography

J-PET project

„Exotic“ systems

Classical nucleus:

Bound state of nucleons



„Exotic“ systems

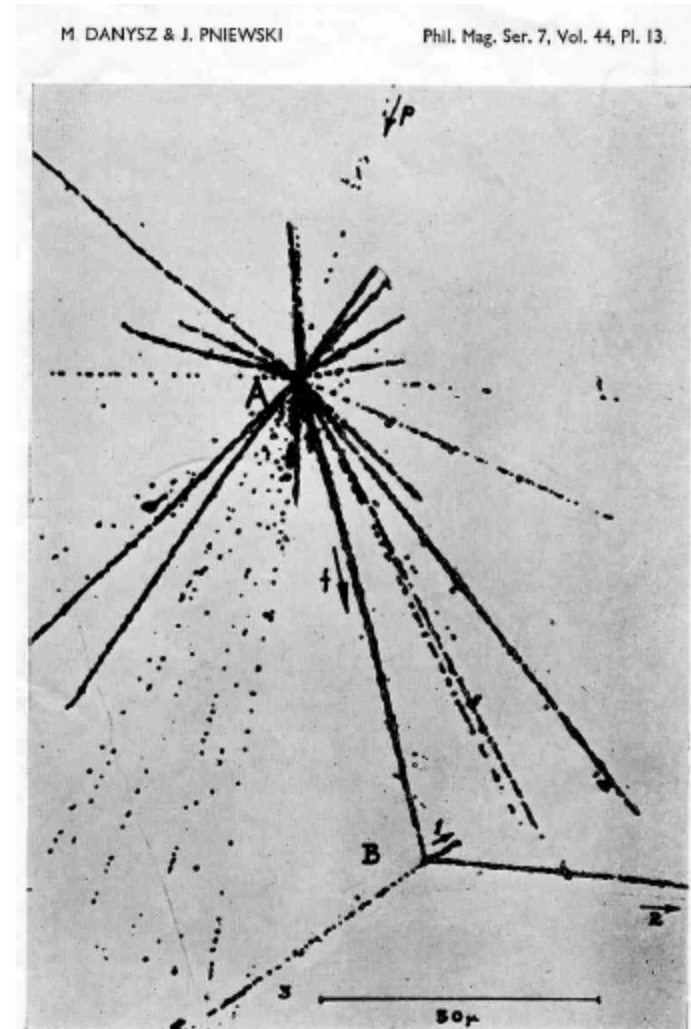
Classical nucleus:

Bound state of nucleons

Hypernuclei:

Bound states of nucleons

+ hyperion Λ, Σ

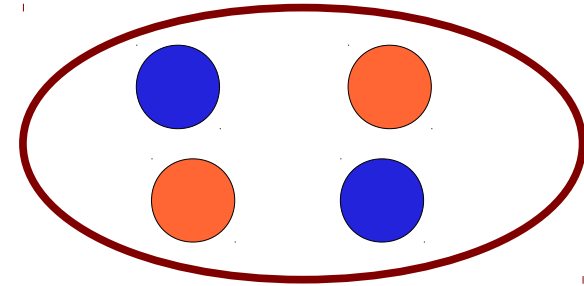


M. Danysz and J. Pniewski,
J. Phil. Mag.44(1953), 348

„Exotic“ systems

Classical nucleus:

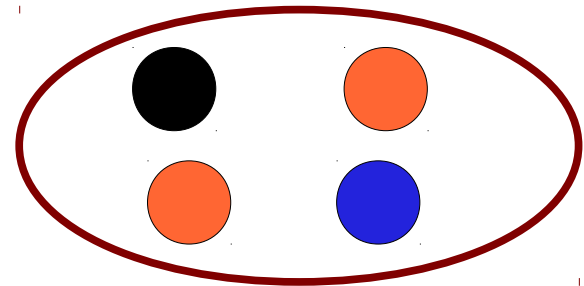
Bound state of nucleons



Hypernuclei:

Bound states of nucleons

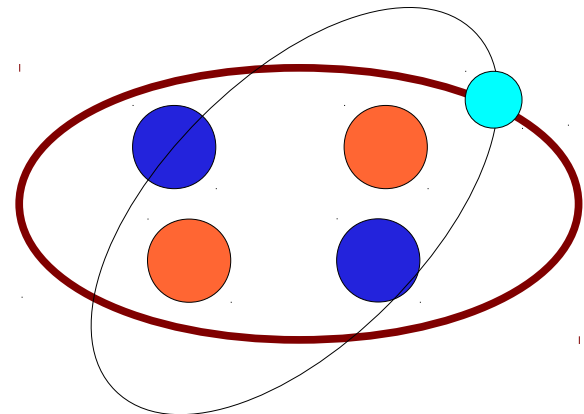
+ hyperion Λ, Σ



Mesic atoms and nuclei:

Bound state of nucleons

+ meson $\pi, K, \eta, \eta', \omega, \dots$



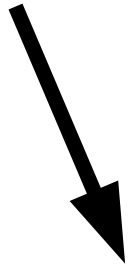
Search for eta-mesic nuclei

$$m_{\eta} = 547.3 \text{ MeV}$$

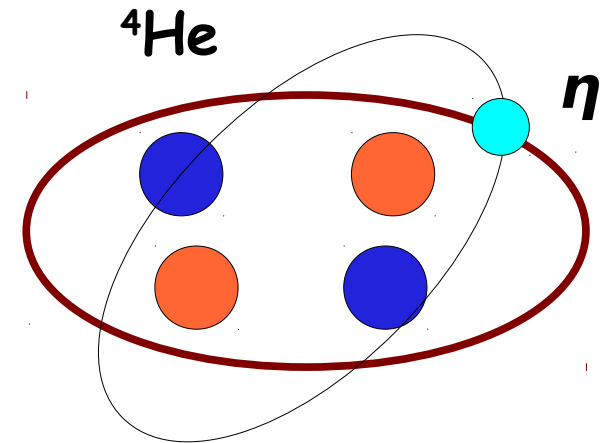
$$\Gamma = 1.18 \text{ keV}$$

spin, isospin, charge, strangeness... = 0

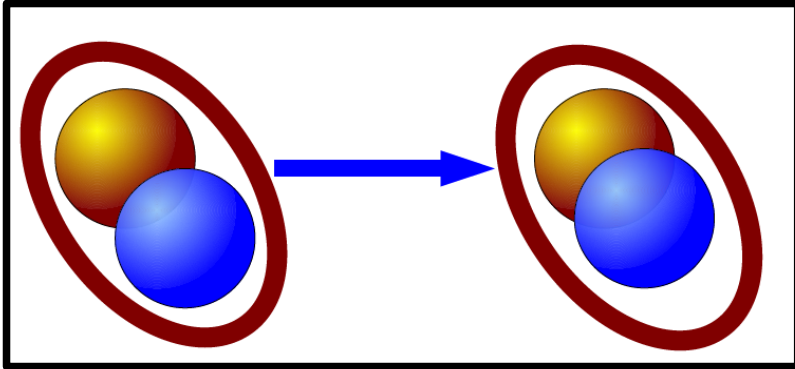
$$\tau = 10^{-18} \text{ s}$$



Beam unavailable. We have to create η meson in the final state to study it.

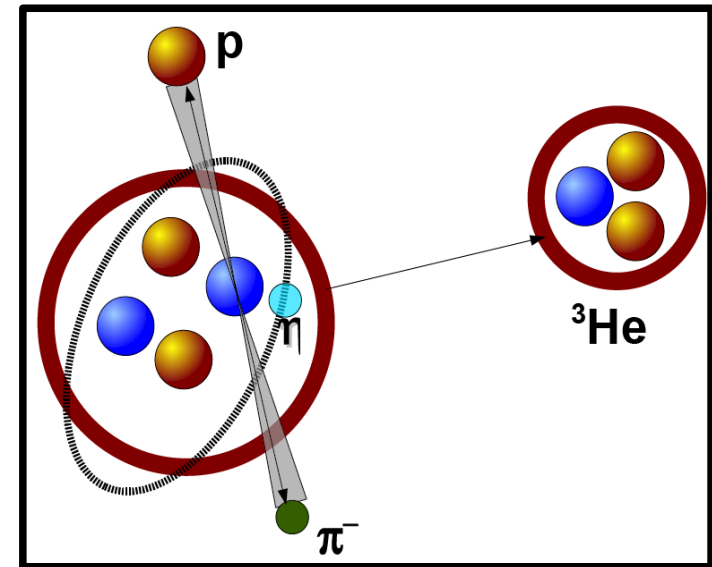
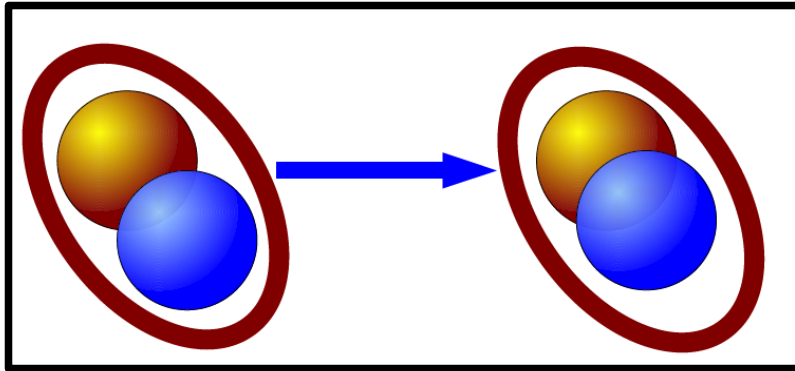


Deuteron-deuteron collisions

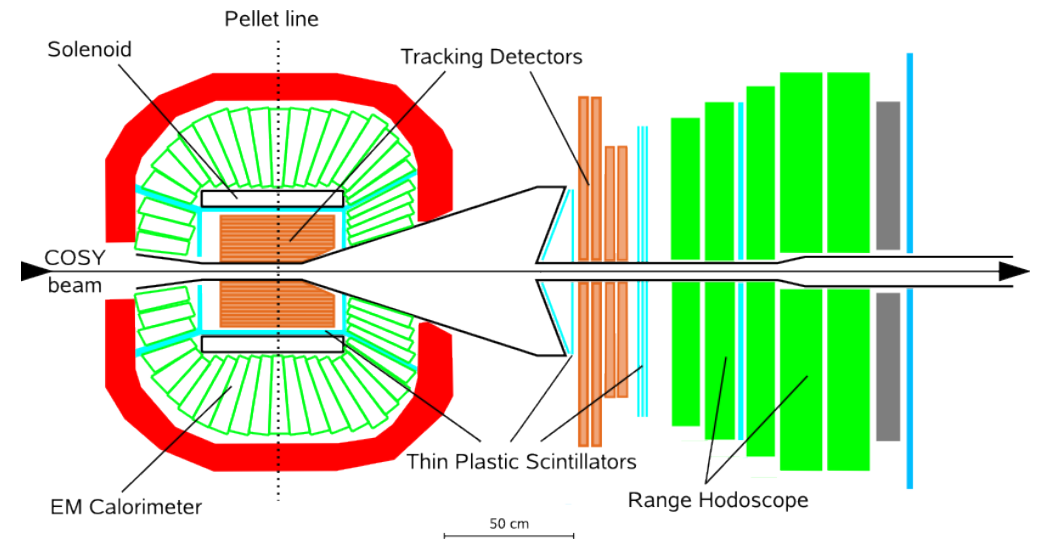


(COoler Synchrotron)
Juelich, Germany

Deuteron-deuteron collisions

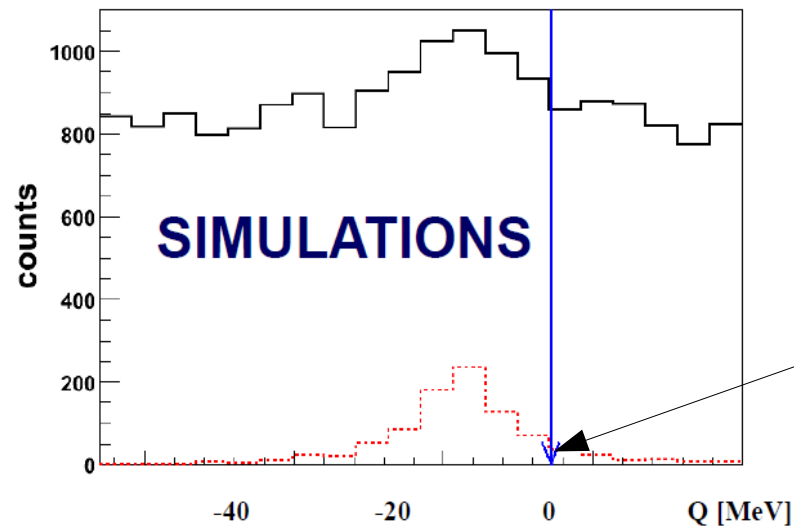
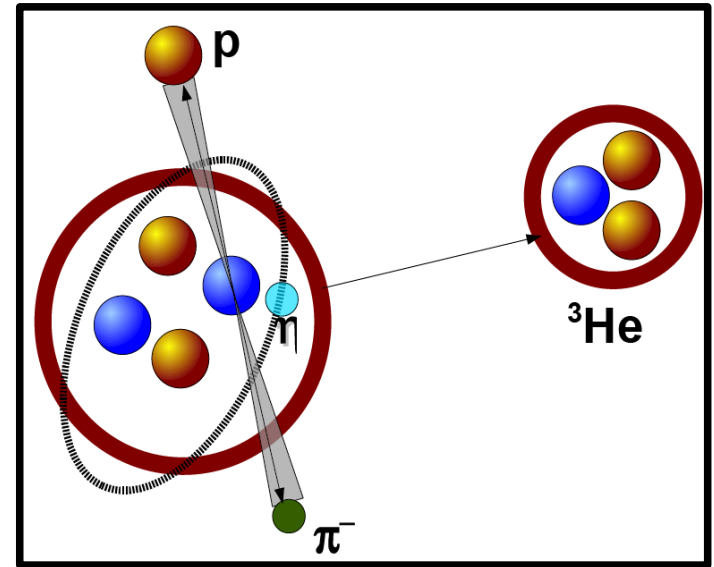
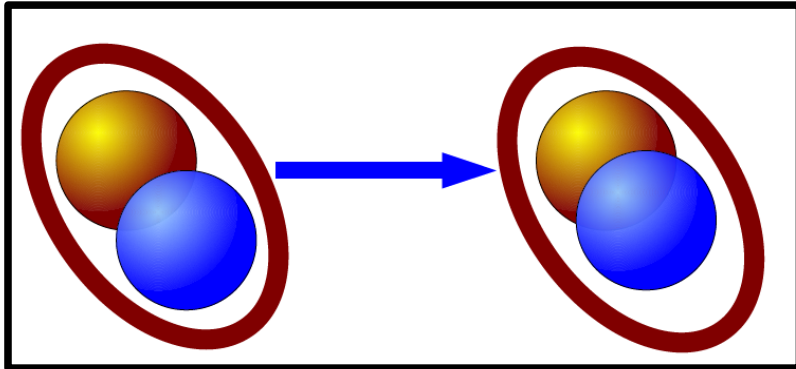


(COoler Synchrotron)
Juelich, Germany



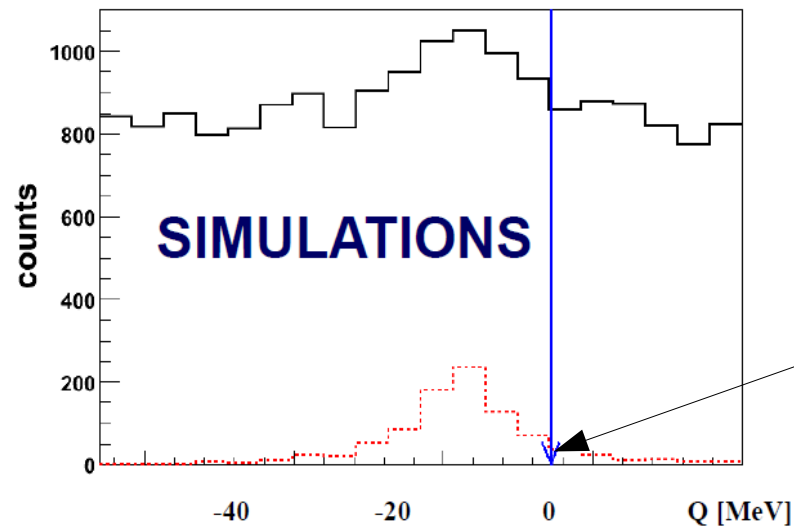
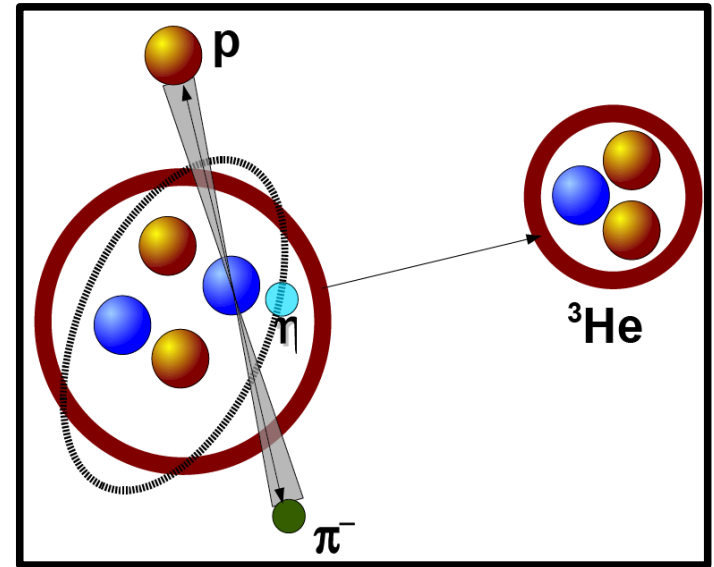
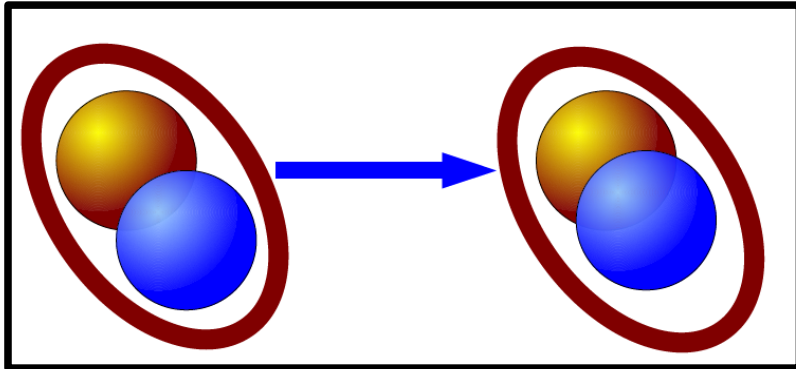
(Wide Angle Shower Apparatus)

Idea of measurement



$$E_{\text{threshold}} = m_{\text{He}} + m_{\eta}$$

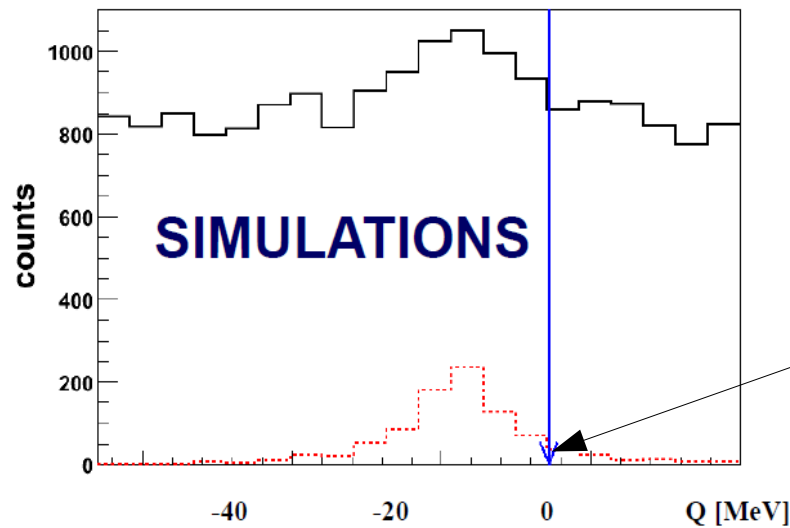
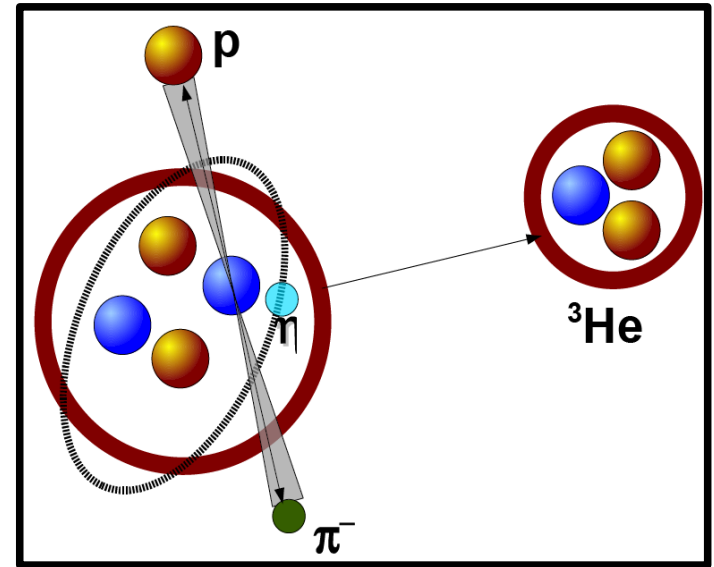
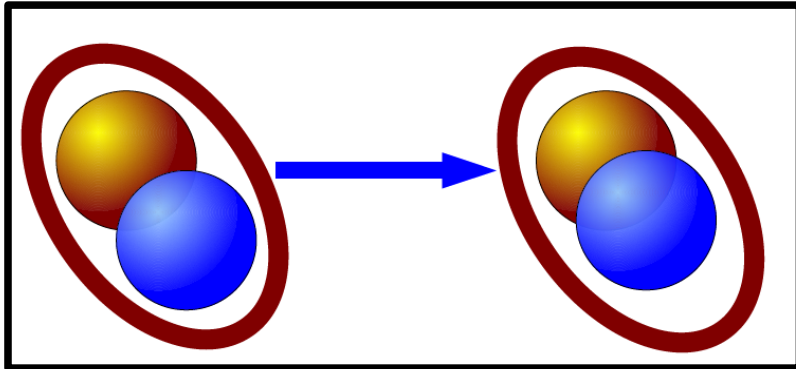
Idea of measurement



$$E_{\text{threshold}} = m_{\text{He}} + m_{\eta}$$

$$m_{\text{Bound}} = m_A + m_{\eta} - E_{\text{BE}}$$

Idea of measurement

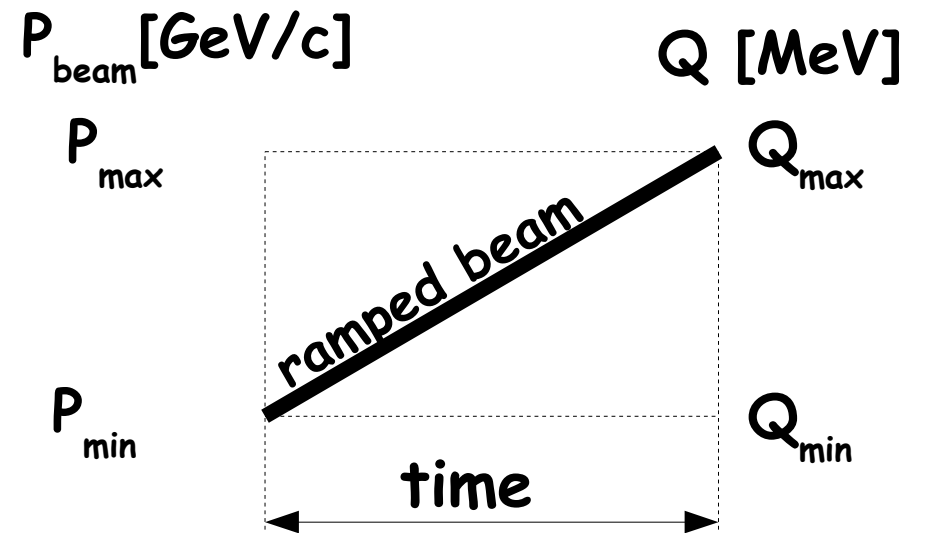


$$E_{\text{threshold}} = m_{\text{He}} + m_{\eta}$$

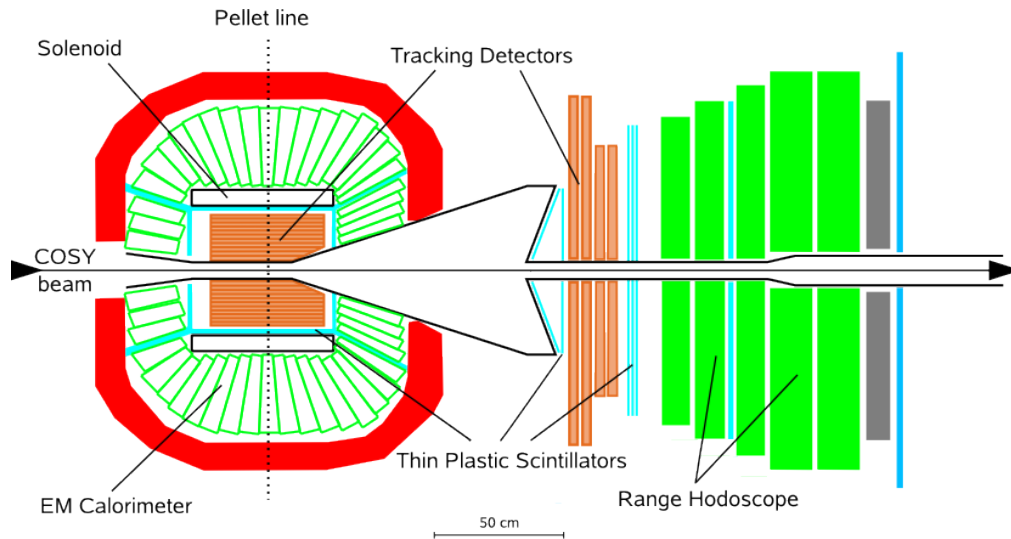
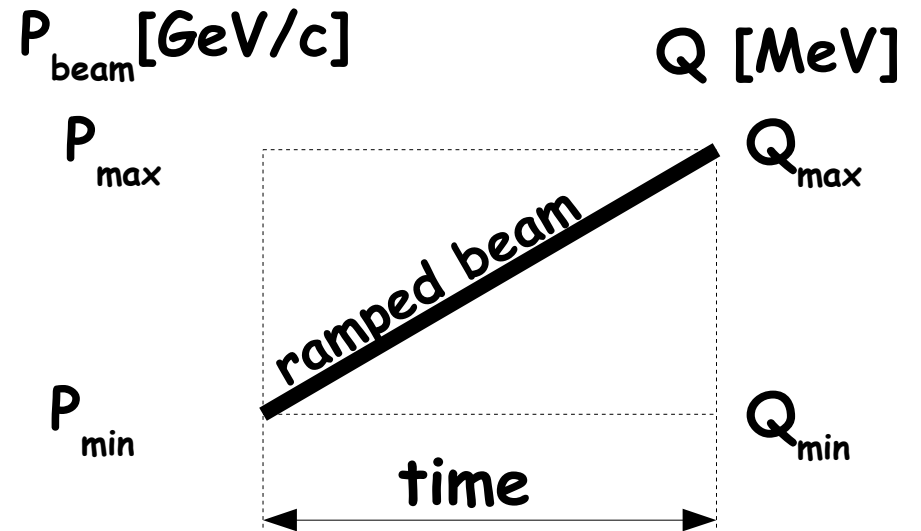
$$m_{\text{Bound}} = m_A + m_{\eta} - E_{\text{BE}}$$

**Search for a resonance-like structure
with maximum below the $\eta\text{-}^4\text{He}$ production threshold**

Main advantages



Main advantages

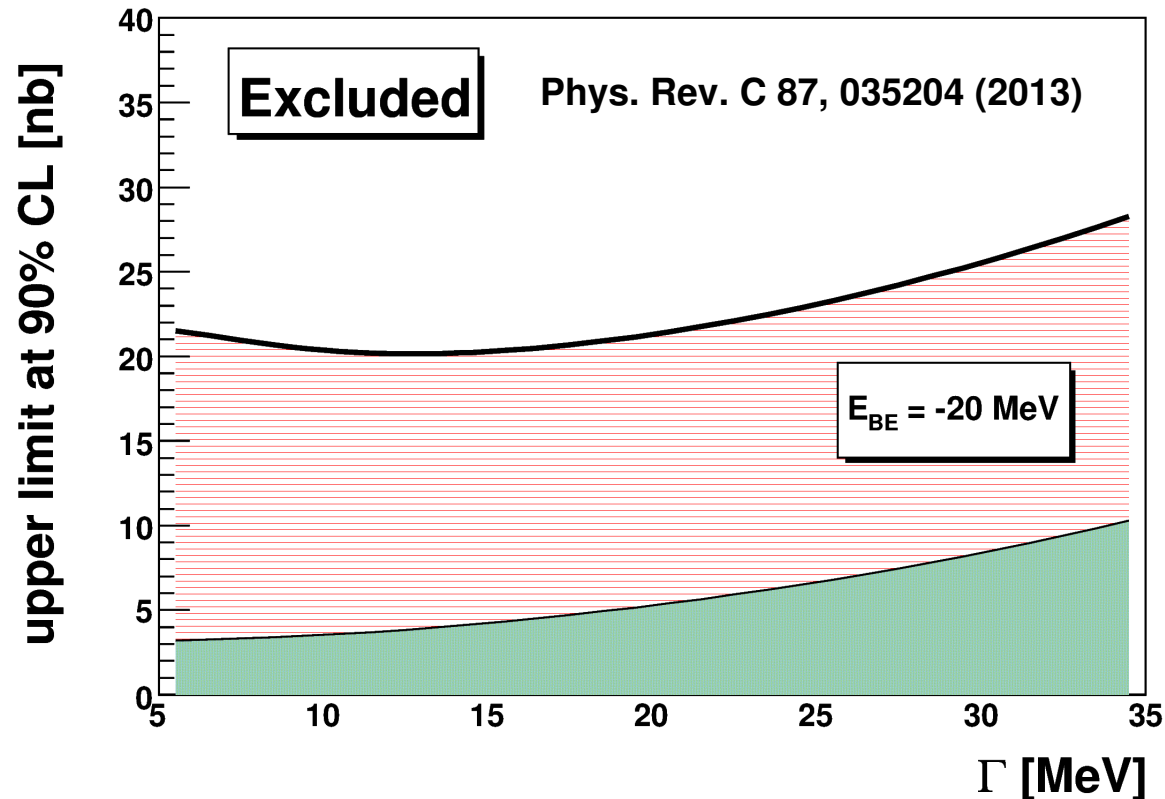


- exclusive measurement
- high-acceptance detector

Sensitivity of order of several nb in MeV energy bin

Results

Upper limit of the maximum cross-section
for the reaction $dd \rightarrow (^4\text{He} - \eta)_{\text{bound}} \rightarrow {}^3\text{He} p \pi^-$

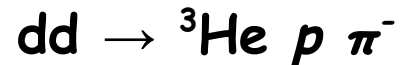


First experiment in June 2008 (only 15 hours)

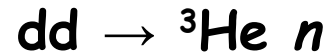
Experiments

November-December 2010

Channels:



Normalization:



Magdalena Skurzok's PhD thesis

Q: -70 to 30 MeV

P: 2.127 to 2.422 GeV/c

~20 x more statistics

May-June 2014

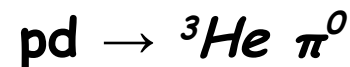
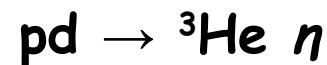
Channels:



Orbiting eta:



Normalization:

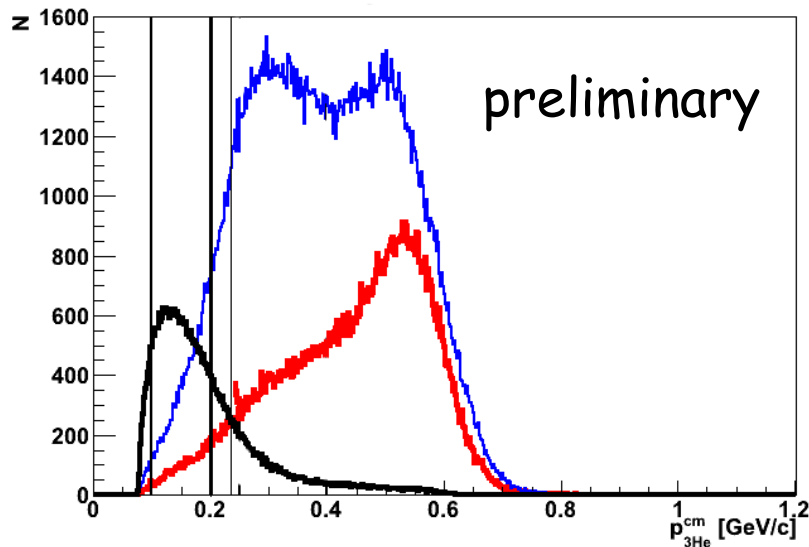


Q: -50 to 20 MeV

P: 1.468 to 1.615 GeV/c

~40 x more statistics

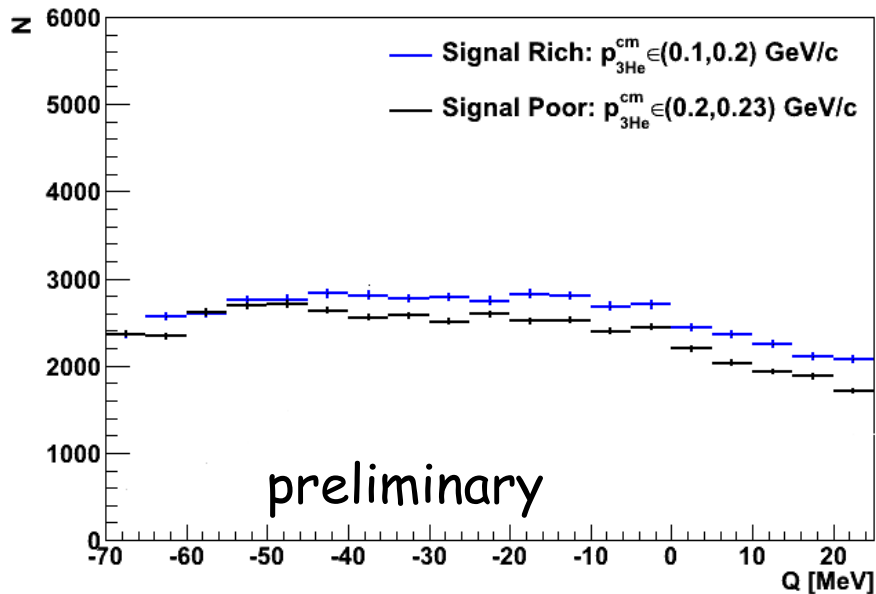
Preliminary results from 2010 experiment



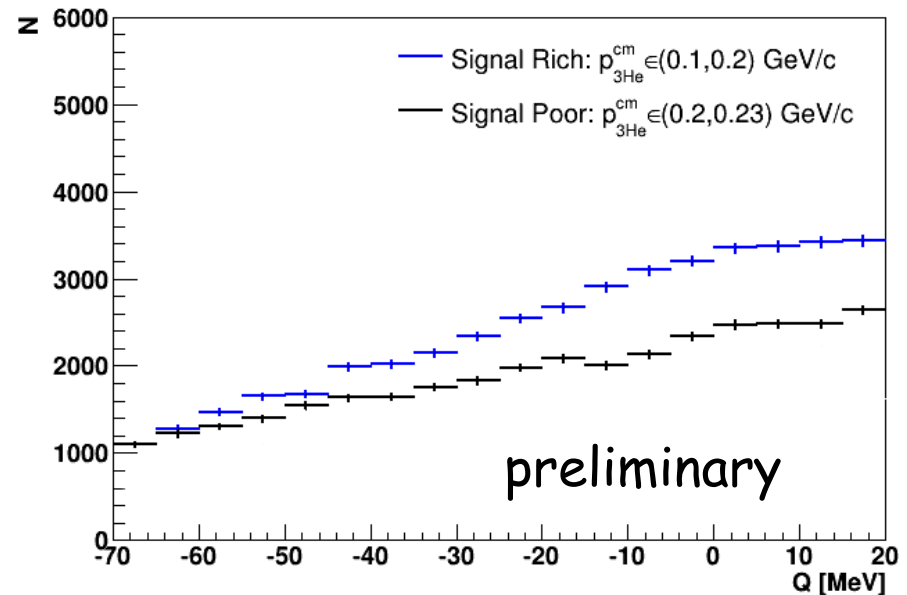
red line: $dd \rightarrow {}^3\text{He} n \pi^0$

blue line: $dd \rightarrow {}^3\text{He} p \pi^-$

black line(MC): $dd \rightarrow ({}^4\text{He} - \eta)_{\text{bound}} \rightarrow {}^3\text{He} n \pi^0$



$dd \rightarrow {}^3\text{He} p \pi^-$



$dd \rightarrow {}^3\text{He} n \pi^0$

Summary

- We search for a light mesic nuclei in η - ^3He and η - ^4He systems
- **Exclusive, high-acceptance** measurements with **ramped beam**

PAST:

- upper limit estimated η - ^3He : from 20 to 27 nb (on 90 % C.L.) (2008 data)

PRESENT:

- analysis is ongoing

FUTURE:

- New data collected (η - ^3He),
- Expected sensitivity of 10 nb per MeV bin

Theory support:

- prof. S. Wycech, NCBJ, Warsaw
- group of prof. S. Hirenzaki. Nara Women University, Japan

Cooperation with Forschungszentrum Juelich (COSY accelerator)

Experiment

- Andrzej Pyszniak
- Magdalena Skurzok
- Khatri Ghanshyambhai
- Jowzaee Sedigheh
- Iryna Ozerianska

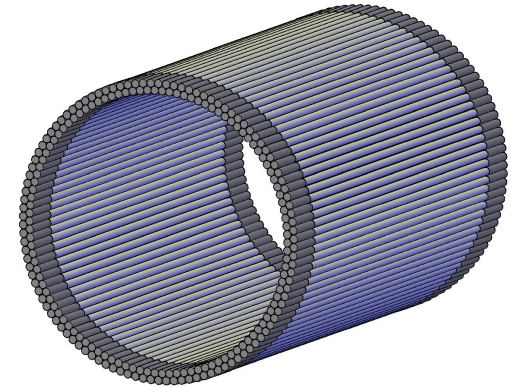
Theory

- Sushil Sharma
- Kacper Topolnicki

J-PET tomography project

TOF-PET tomography prototype based on:

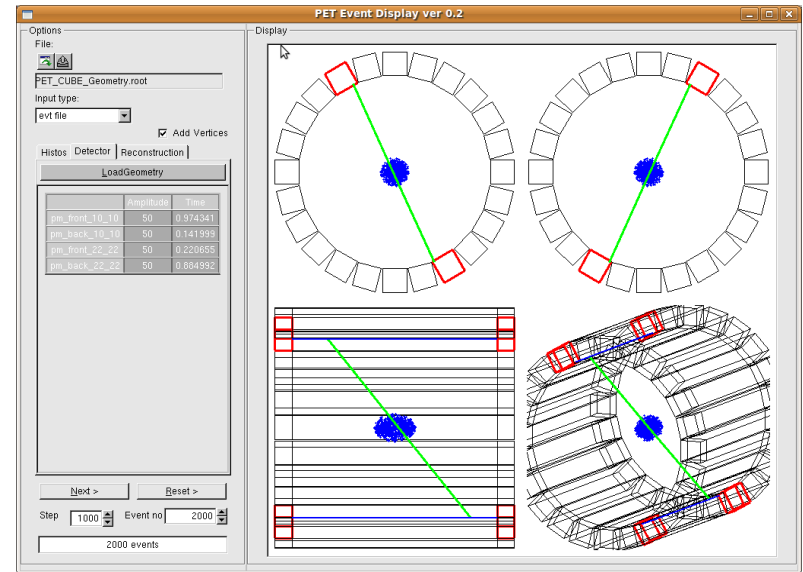
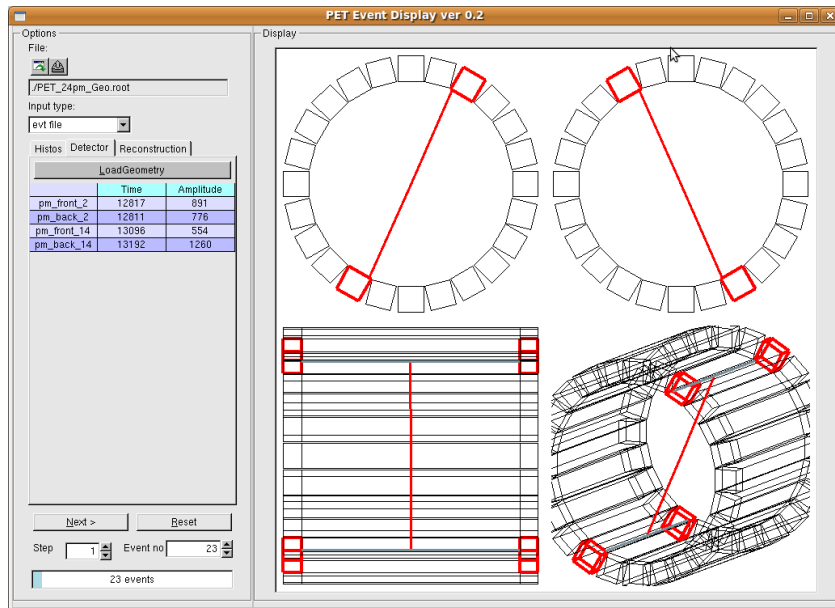
- **polymer scintillators**
- large blocks of materials
- time information rather than amplitudes
- reconstruction of hit position in a scintillator
- fully 3-D image reconstruction



Change of the paradigm in positron emission tomography

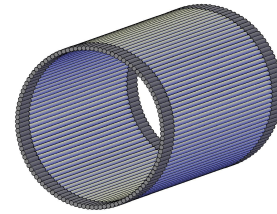
From amplitude-based measurement to time-based measurement

J-PET tomography project

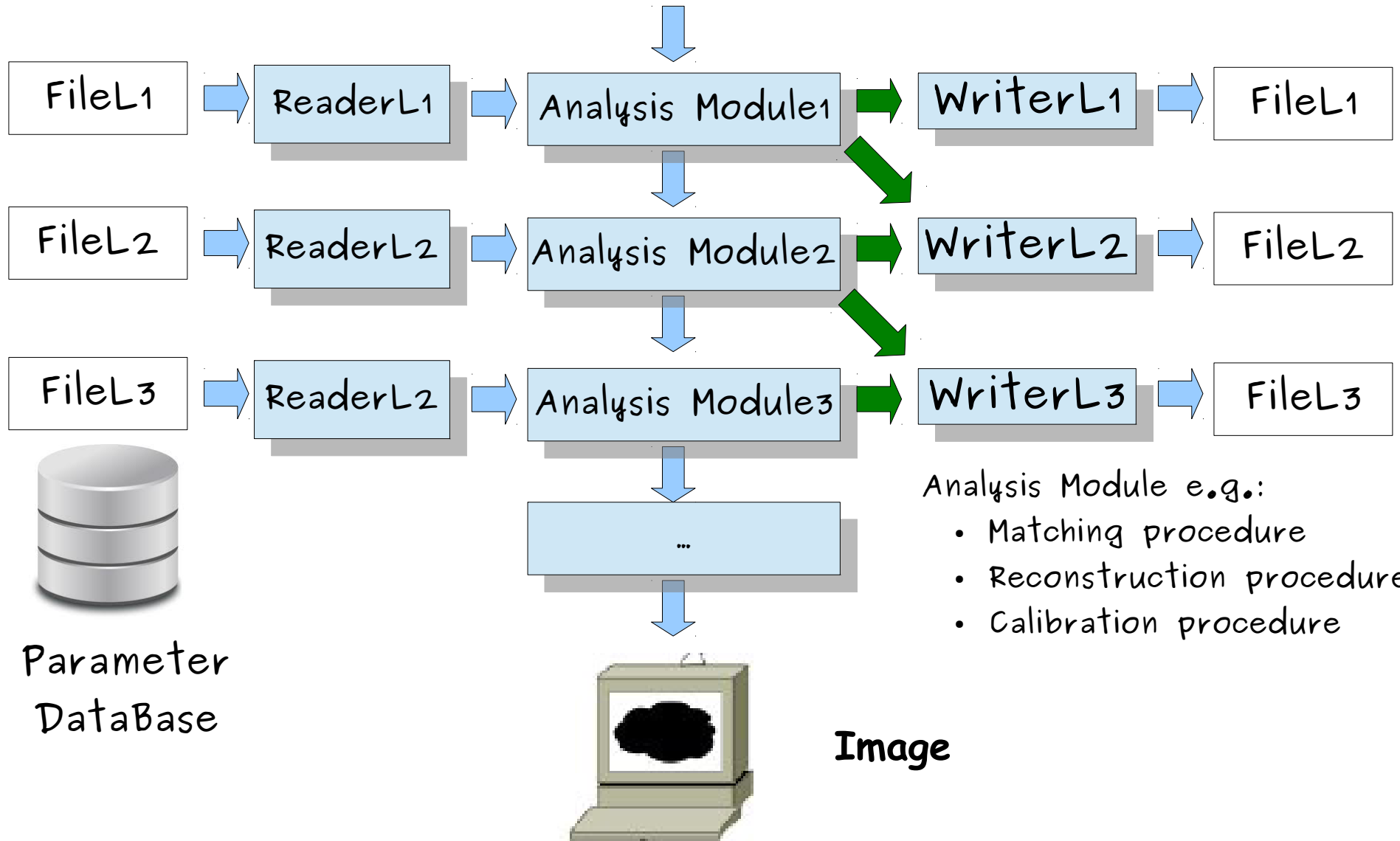


- Help and coordination of the development of different software tools
- Development of applications to visualize detector geometries and test reconstruction procedures on event by event basis.
- Development of fast Monte Carlo package to simulate detector setups

Analysis framework



J-PET Detector



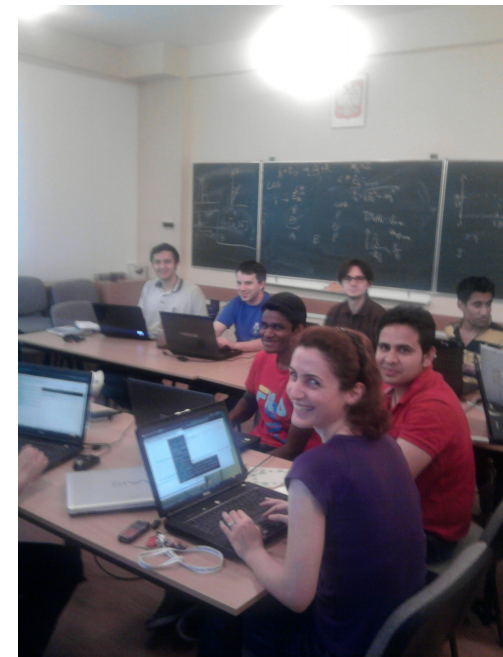
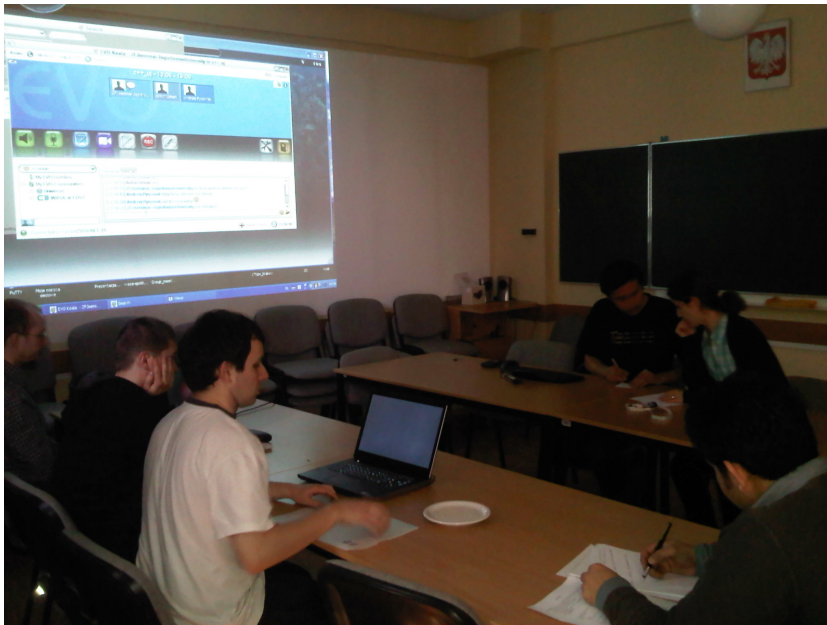
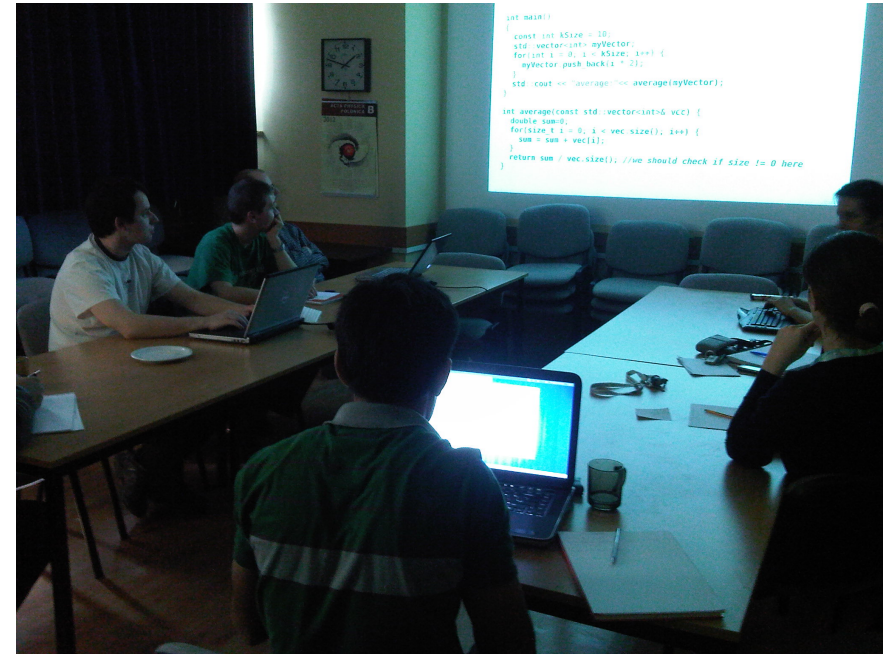
Analysis Module e.g.:

- Matching procedure
- Reconstruction procedure
- Calibration procedure

Analysis framework

- Backbone architecture for development and implementation of low-level reconstruction and calibration procedures
- Developed according to object-oriented approach (C++)
- Technologies & tools: BOOST, git, Doxygen, ROOT

Workshops and lectures in object-oriented programming



My future: CPT symmetry violation

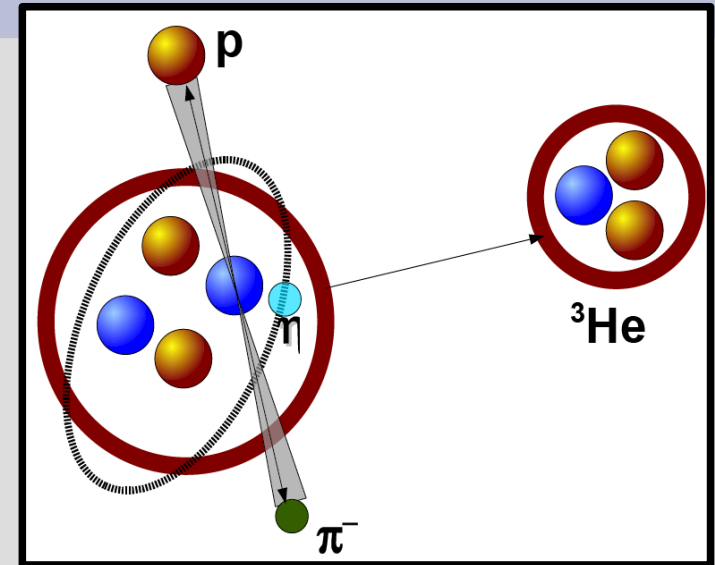
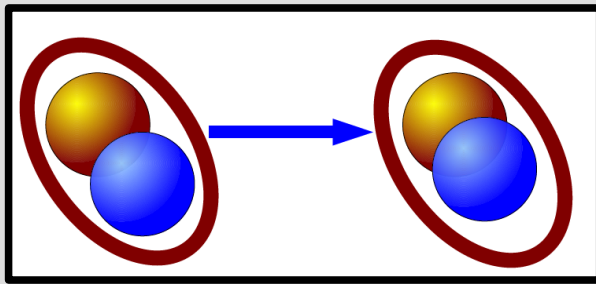
- Proposal for the FUGA grant:
„CPT symmetry violation in neutral meson systems”
- Approved by the National Science Centre as a first on the list.



**NARODOWE CENTRUM
BADAŃ JĄDROWYCH**
Świerk

„It is only slightly overstating the case to say that physics is the study of symmetry”.

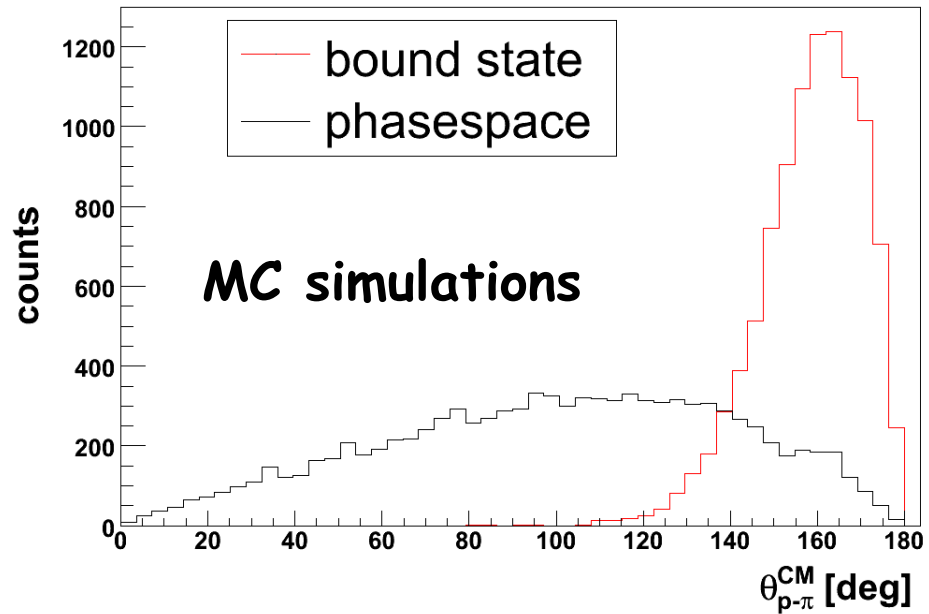
Thank you



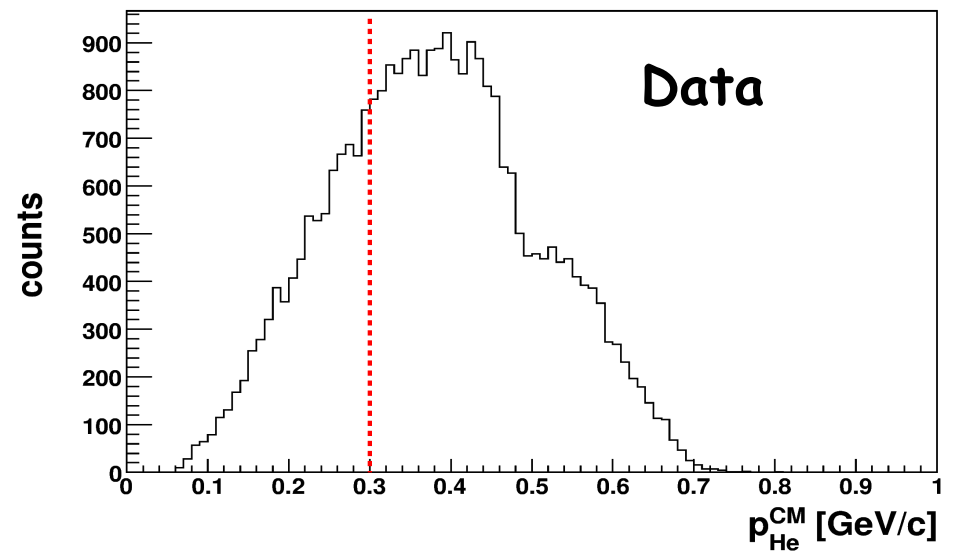
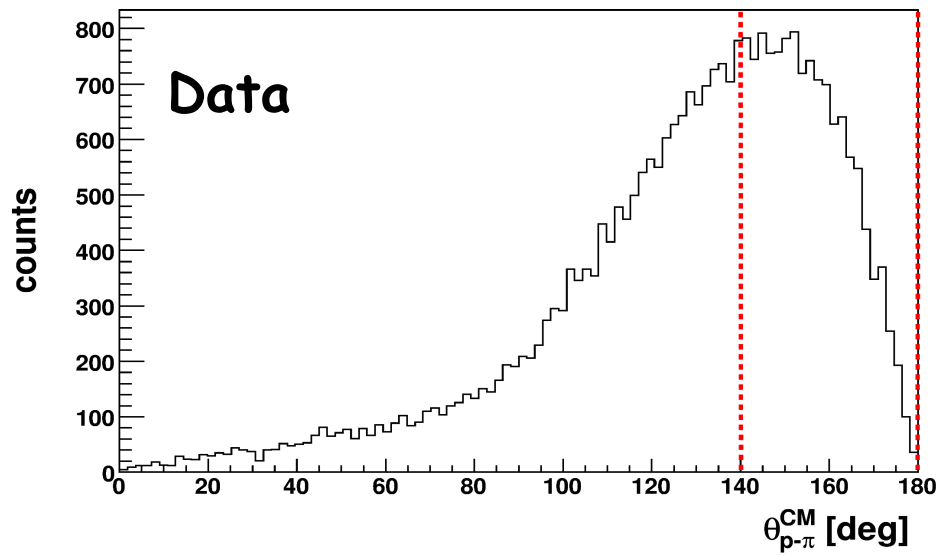
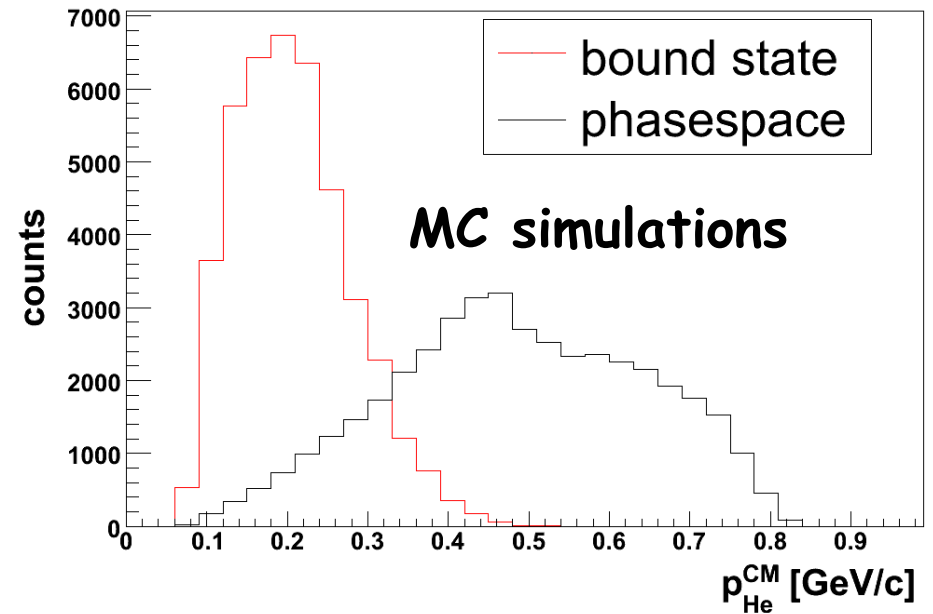
- relative $N\text{-}\pi$ angle in the CM : $\theta_{cm} \sim 180^\circ$
- low ${}^3\text{He}$ momentum in the CM

Signatures of the bound state

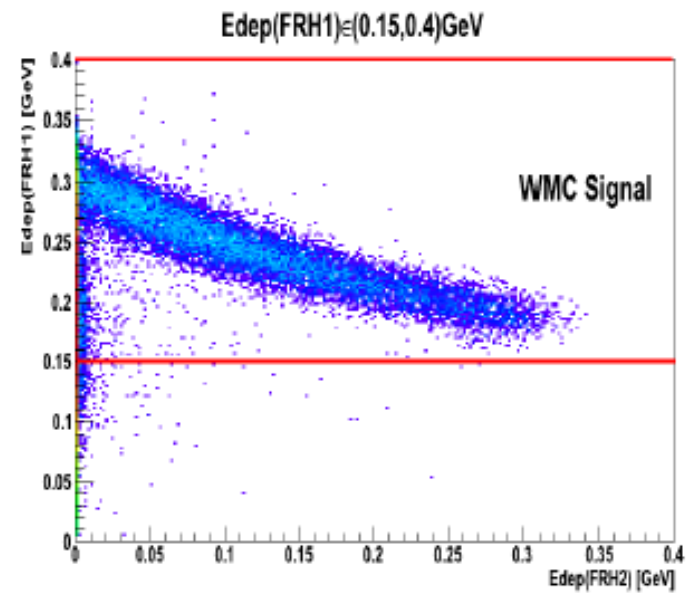
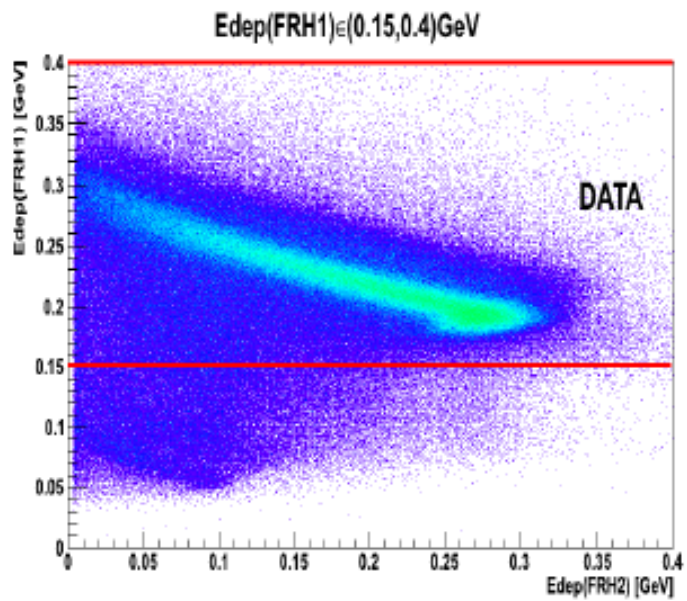
$p-\pi^-$ opening angle in the CM frame



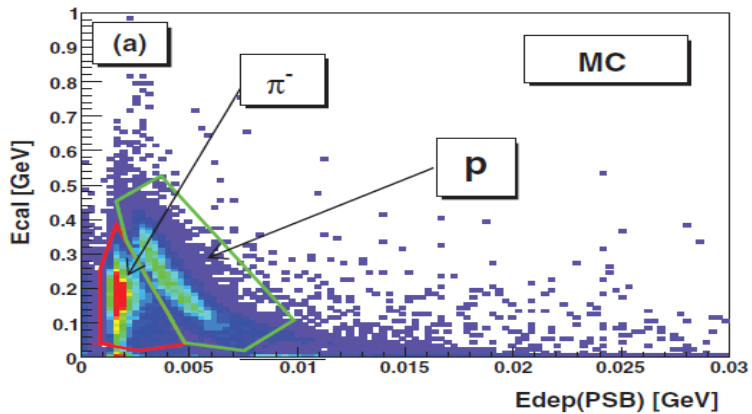
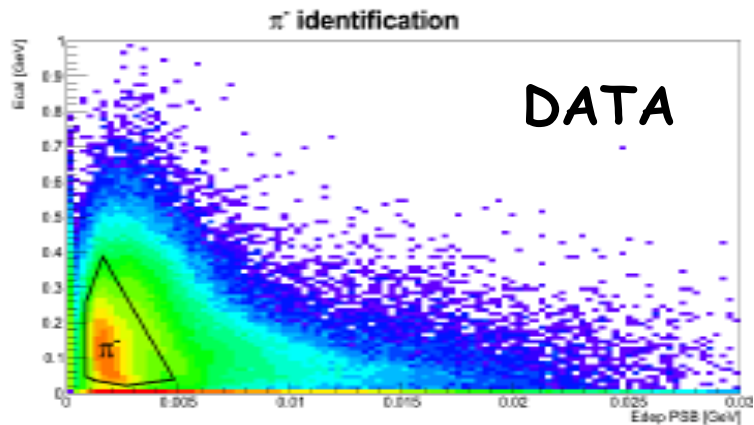
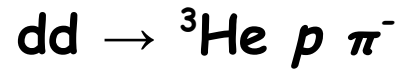
^3He momentum in the CM frame



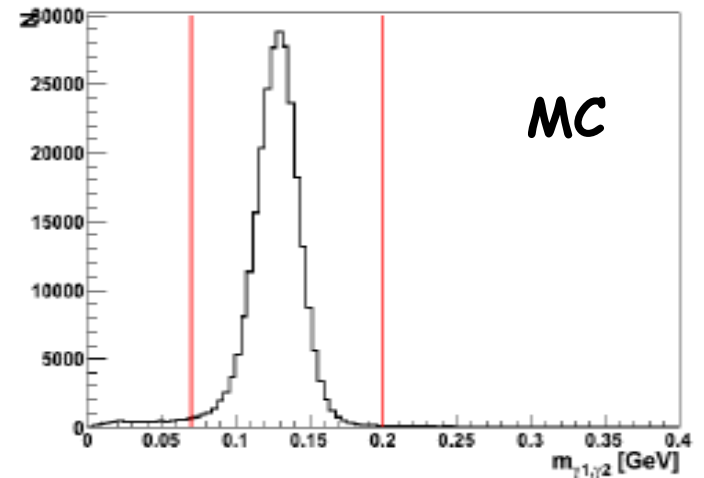
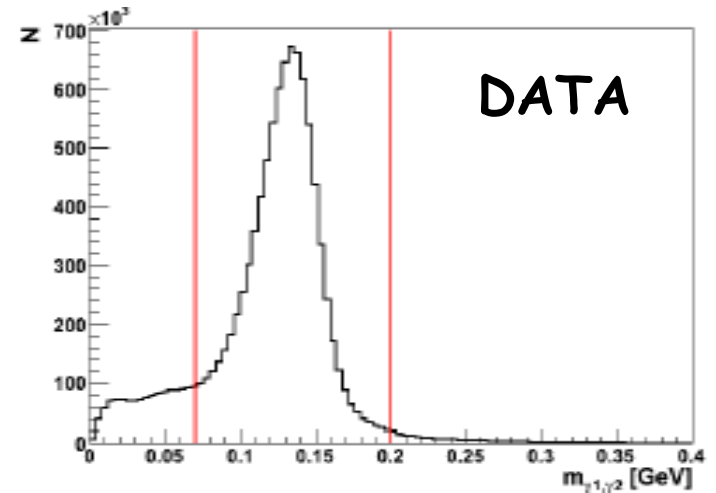
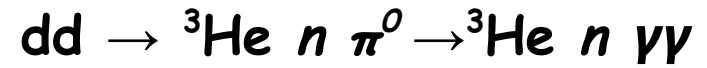
^3He ions identification in Forward Detector



Pion identification in the Central Detector

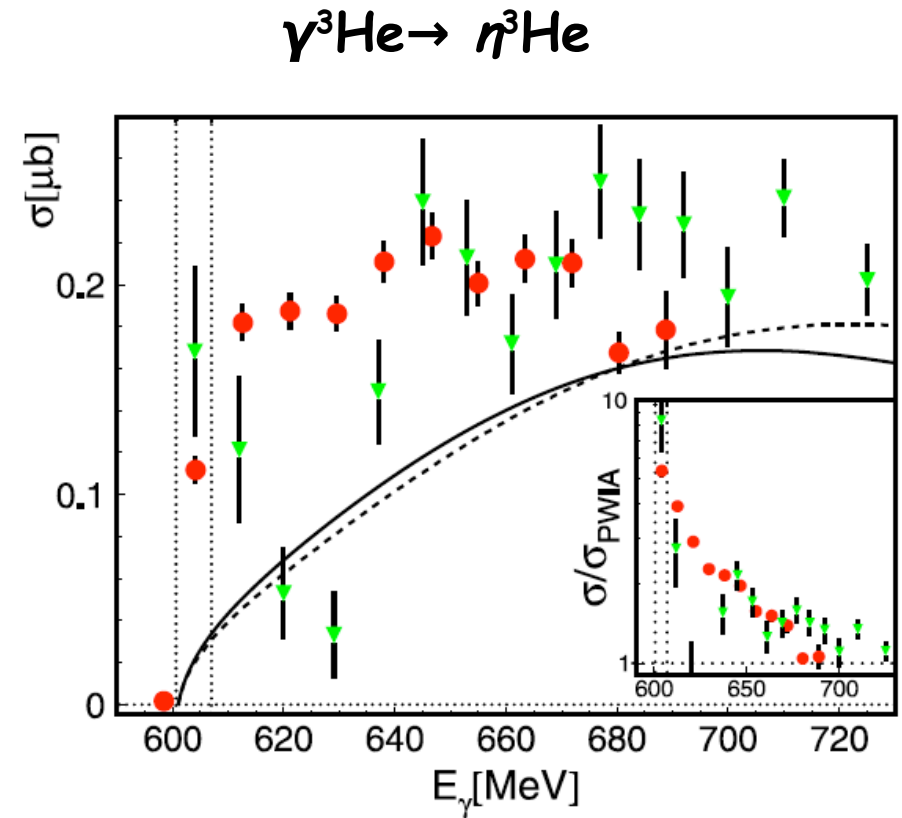
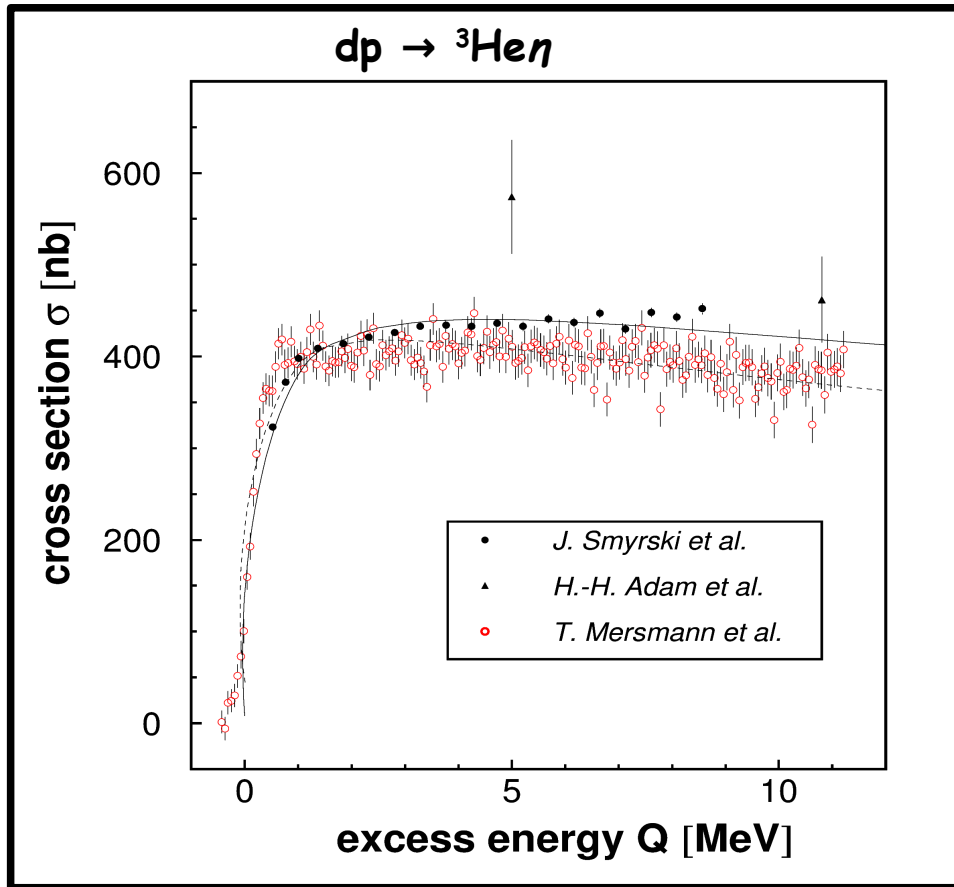


π^- identification



π^0 identification

Experimental indications of existence of the ${}^3\text{He}-\eta$ bound system



ANKE: T. Mersmann et al., Phys. Rev. Lett. **98** 242301 (2007)

COSY-11: J. Smyrski et al., Phys. Lett **B 649** 258-262 (2007)

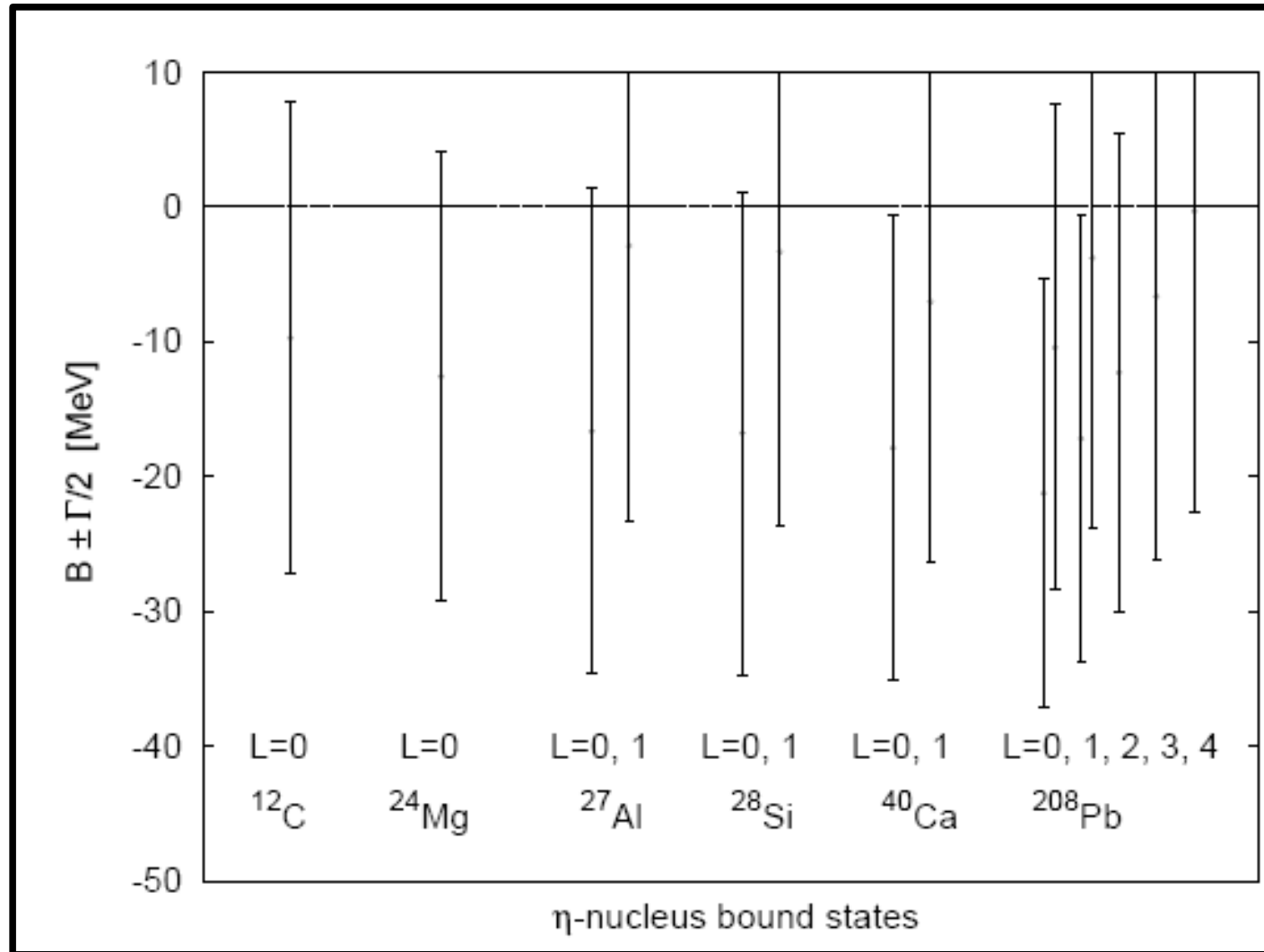
MAMI:

M. Pfeiffer et al., Phys. Rev. Lett. **92** 252001 (2004)

F. Pheron et al., Phys. Lett. **B709** 21 (2012)

Enhancement independent of input channel \rightarrow Strong ${}^3\text{He}-\eta$ FSI

η -mesic nuclei in heavy systems



Dominant decay channels

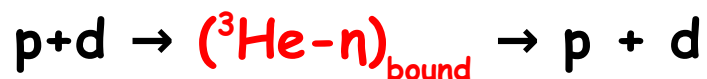
- Via N^* resonance decay:



- Absorption of an orbiting η :



- Non-resonant decay (absorption on two nucleons):



New experiment predictions

Via N^* decay:

- $\sigma(\eta\text{-}^3\text{He}) \sim 80 \text{ nb}$, $\sigma(\text{background}) \sim 2500 \text{ nb}$, sensitivity $\sim 10 \text{ nb}$

Orbiting η :

- $\sigma(\eta\text{-}^3\text{He}) \sim 0.4 \text{ nb}$, $\sigma(\text{background}) \sim 16 \text{ nb}$, sensitivity $\sim 0.4 \text{ nb}$

Colin Wilkin

Is it possible to detect the decay of an η -meson while it is orbiting a nucleus?

Total η width is about 1.3 keV, of which 39% corresponds to 2γ decay. The $^3\eta\text{He}$ width is less than 500 keV. Hence, if this is a quasi-bound system, about one in a thousand should decay through 2γ emission. The 6γ branch will be slightly less.

Small but clean!

COSY accelerator in Juelich (Germany)



Beam:

- Unpolarized and polarized protons or deuterons.

Energy range:

- T_p to 2.8 GeV
- T_d to 2.3 GeV

(maximum momentum: 3.7 GeV/c)

Cooling:

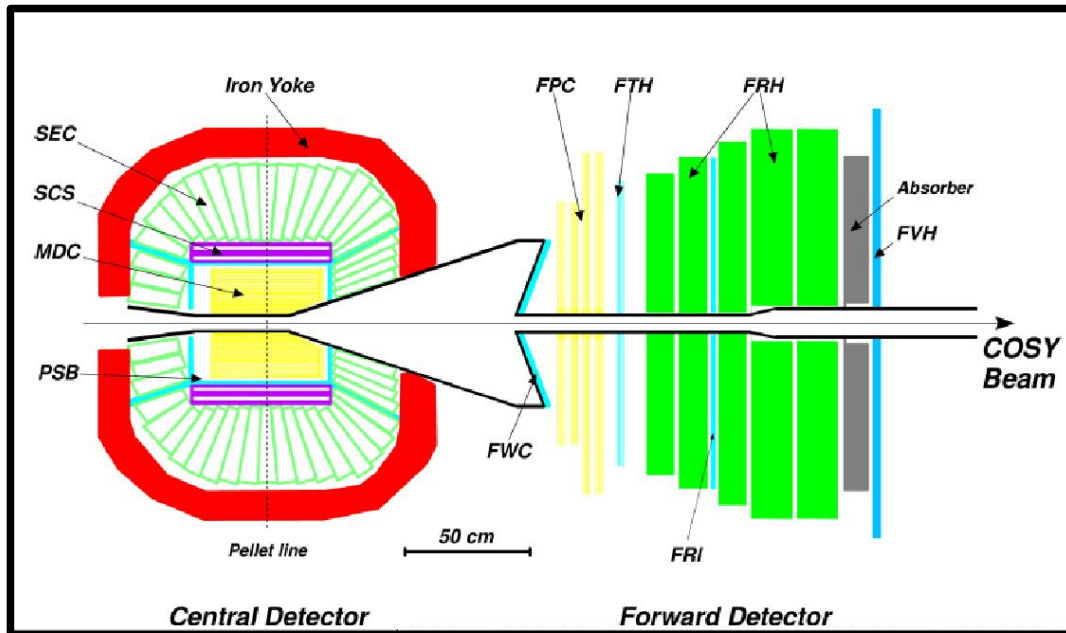
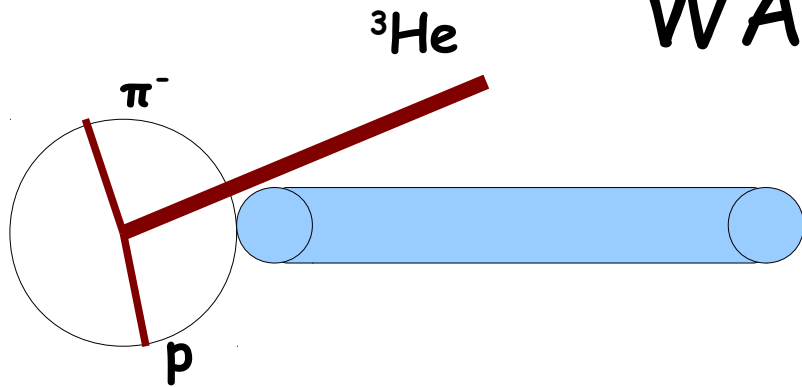
- stochastic
- electron beam

Nb of particles: 10^{11}

Ramped beam

(COoler SYnchrotron)

WASA-at-COSY



Forward detector:

Scattering angle coverage $3^\circ - 18^\circ$

Scattering angle resolution 0.2°

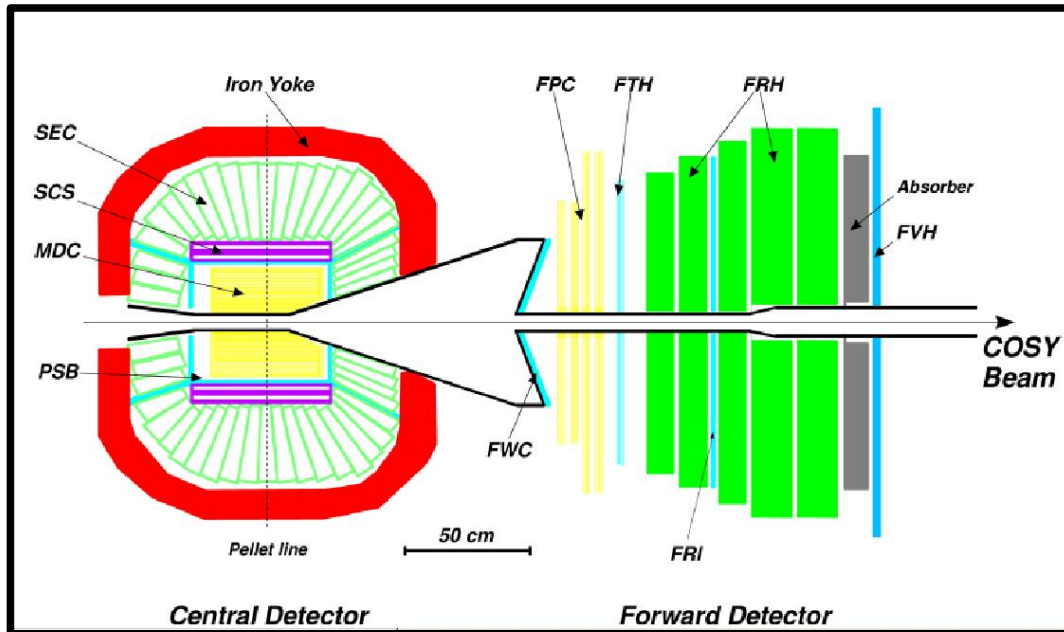
Maximum energies for stopping

$\pi^\pm/p/d/\alpha$ 170/300/400/900 MeV

Time resolution $< 3\text{ns}$

WASA-at-COSY

4 π detector for charged and neutral particles



Central detector:

Max. stopping energy

$\pi^\pm/p/d$ 190/400/450 MeV

Angular resolution

charged $\sim 1.2^\circ$

neutral $\sim 5^\circ$

Symetrie w fizyce

Rola symetrii w fizyce współczesnej:

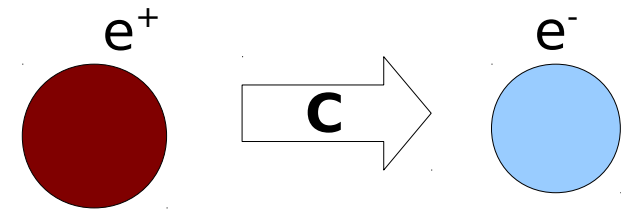
- Uproszczenie opisu zjawisk,
- Fundament wszystkich istniejących teorii oddziaływań,
- Związek symetrii z prawami zachowania (twierdzenie Noether),
- Określenie własności cząstek między innymi pochodzenia masy (mechanizm Higgsa),
- Asymetria materia-antymateria,
- Symetrie jako przesłanka metodologiczna.

„It is only slightly overstating the case to say that physics is the study of symmetry”.

Symetrie C,P, T

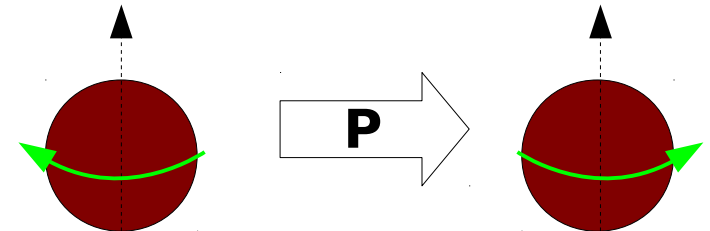
Sprzężenie ładunkowe (cząstka \leftrightarrow antycząstka)

$$C |\bar{\mathbf{r}}, \mathbf{t}, \mathbf{q} \rangle = e^{i\alpha_1} |\bar{\mathbf{r}}, \mathbf{t}, -\mathbf{q} \rangle$$



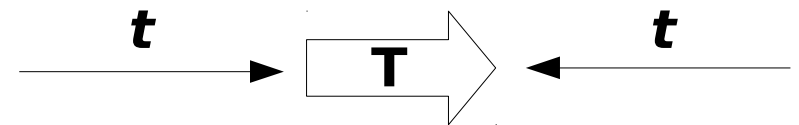
Odbicie przestrzenne (odwrócenie współrzędnych przestrzennych)

$$P |\bar{\mathbf{r}}, \mathbf{t}, \mathbf{q} \rangle = e^{i\alpha_2} |-\bar{\mathbf{r}}, \mathbf{t}, \mathbf{q} \rangle$$



Odbicie czasowe (odwrócenie kierunku upływu czasu)

$$T |\bar{\mathbf{r}}, \mathbf{t}, \mathbf{q} \rangle = e^{i\alpha_3} \langle \bar{\mathbf{r}}, -\mathbf{t}, \mathbf{q} |$$



$\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3$ rzeczywiste fazy

Symetrie C,P, T

Sprzężenie ładunkowe (cząstka \leftrightarrow antycząstka)

$$C |\bar{r}, t, q \rangle = e^{i\alpha_1} |\bar{r}, t, -q \rangle$$

Odbicie przestrzenne (odwrócenie kierunku upływu czasu) (ch)

**Złożenie C, P oraz T = symetria CPT
zachowana ściśle**

Odbicie czasowe (odwrócenie kierunku upływu czasu)

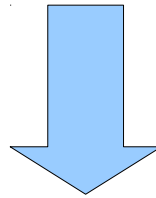
$$T |\bar{r}, t, q \rangle = e^{i\alpha_3} \langle \bar{r}, -t, q |$$

$\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3$ rzeczywiste fazy

Twierdzenie CPT

Założenia:

- hermitowski lokalny Lagranżian,
- niezmienniczość względem transformacji Lorentza,
- obowiązują reguły (anty-) komutacji dla pól.



$$[\text{CPT}, H] = 0$$

Teoria musi być niezmiennicza względem złożenia przekształceń C, P oraz T

Twierdzenie sformułowane w latach '50 przez Schwingera, Ludersa, Josta, Pauliego i Bella

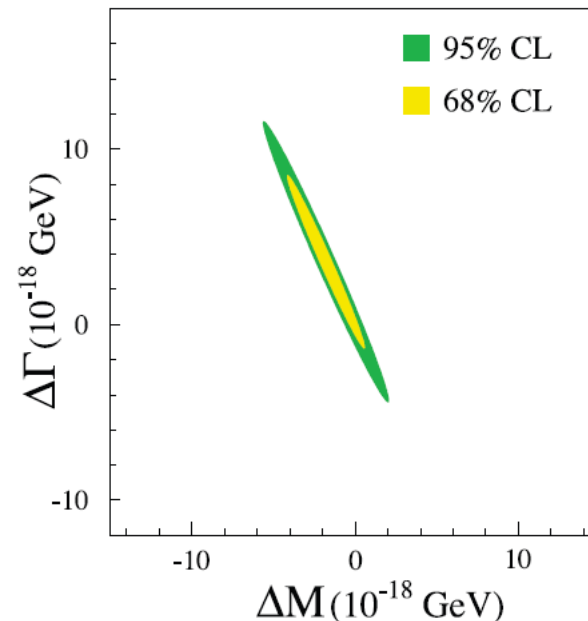
Implikacje twierdzenie CPT

- Identyczne masy cząstek oraz antycząstek,
- Identyczne czasy życia cząstek oraz antycząstek,
- Jednakowe stosunki rozgałęzień dla odpowiednich rozpadów cząstek i antycząstek.

Równość mas i czasów życia:
(cząstka ↔ antycząstka)

$$\Delta M = 0$$

$$\Delta \Gamma = 0$$



J. Beringer et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D86, 010001 (2012)

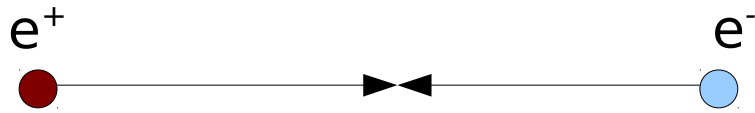
Dokładność:

$$-4.0 \times 10^{-19} \text{ GeV} < m_{K^0} - m_{\bar{K}^0} < 4.0 \times 10^{-19} \text{ GeV} \text{ at } 95 \% \text{ C.L.}$$

KLOE:

D. Babusci et al. Phys. Lett. B 730C (2014)

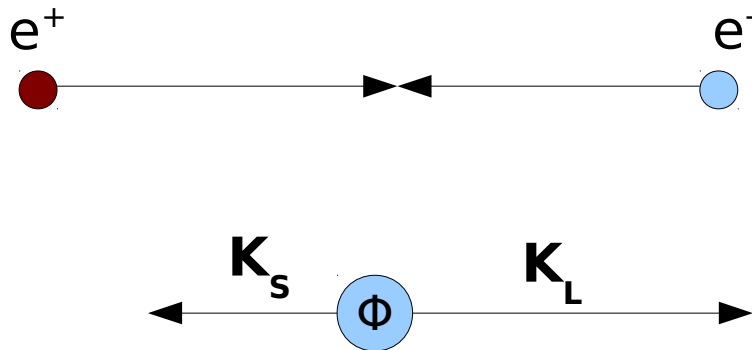
Badanie łamania symetrii CPT w układach kaonów neutralnych



$E = 1020 \text{ MeV}$

$e^+ e^- \rightarrow \Phi$

Badanie łamania symetrii CPT w układach kaonów neutralnych

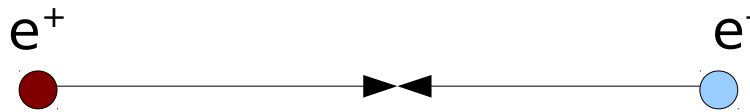


$$E = 1020 \text{ MeV}$$

$$e^+ e^- \rightarrow \Phi$$

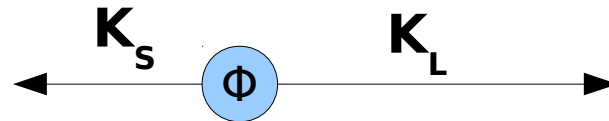
$$\Phi \rightarrow K_S K_L$$

Badanie łamania symetrii CPT w układach kaonów neutralnych



$$E = 1020 \text{ MeV}$$

$$e^+ e^- \rightarrow \Phi$$



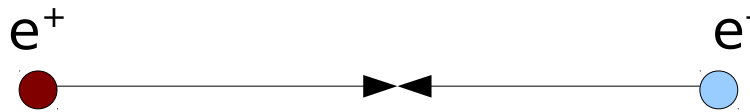
$$\Phi \rightarrow K_S K_L$$

Antysymetryczny stan kwantowy

$$J^{PC} = 1^{--}$$

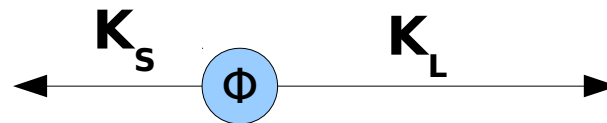
Splątanie kwantowe (EPR)

Badanie łamania symetrii CPT w układach kaonów neutralnych



$E = 1020 \text{ MeV}$

$e^+ e^- \rightarrow \Phi$

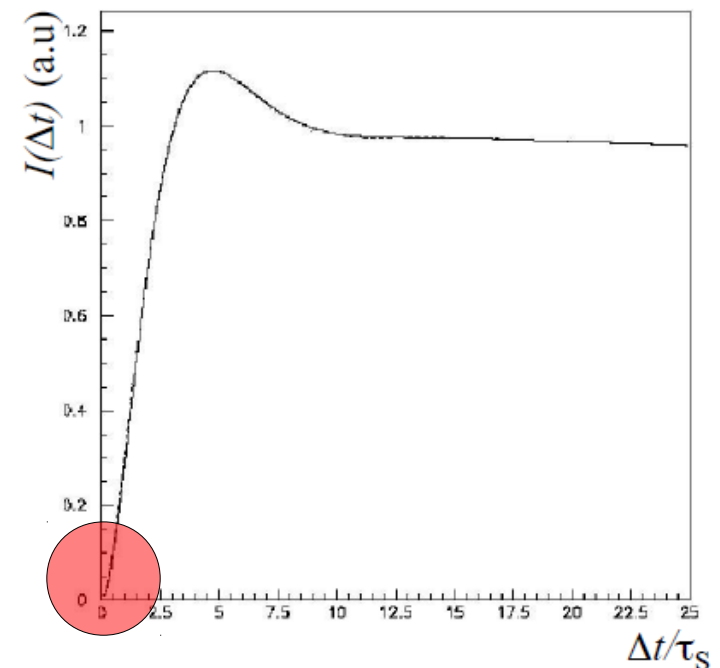
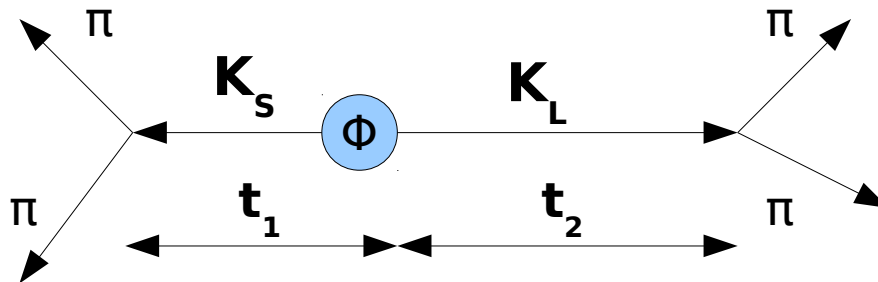


$\Phi \rightarrow K_S K_L$

Antysymetryczny stan kwantowy

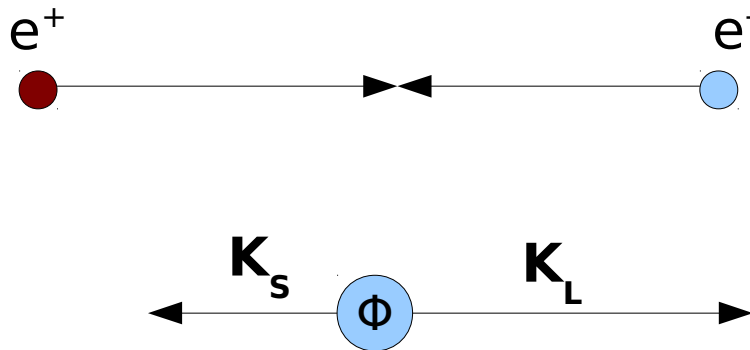
$J^{PC} = 1^{--}$

Splątanie kwantowe (EPR)



interferencja destruktywna

Badanie łamania symetrii CPT w układach kaonów neutralnych



$E = 1020 \text{ MeV}$

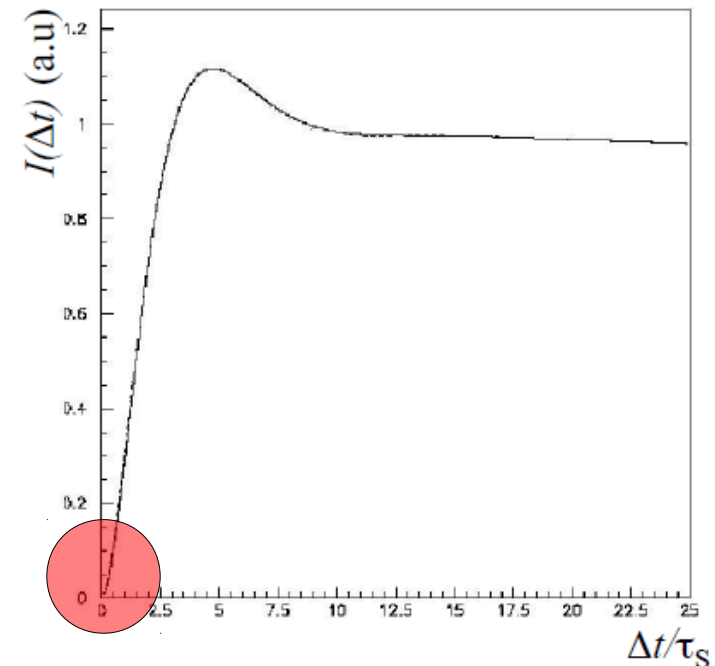
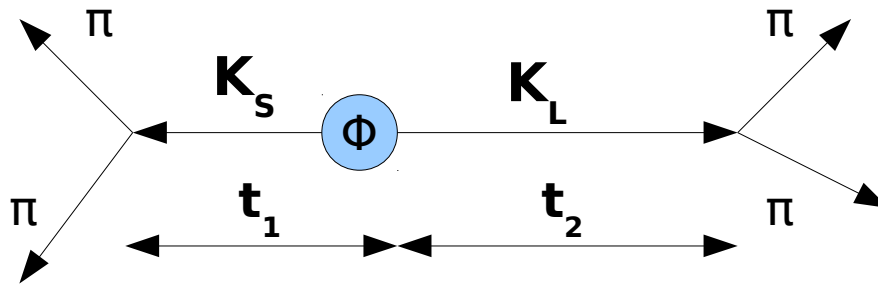
$e^+ e^- \rightarrow \Phi$

$\Phi \rightarrow K_S K_L$

Antysymetryczny stan kwantowy

$J^{PC} = 1^{--}$

Splątanie kwantowe (EPR)



interferencja destruktywna

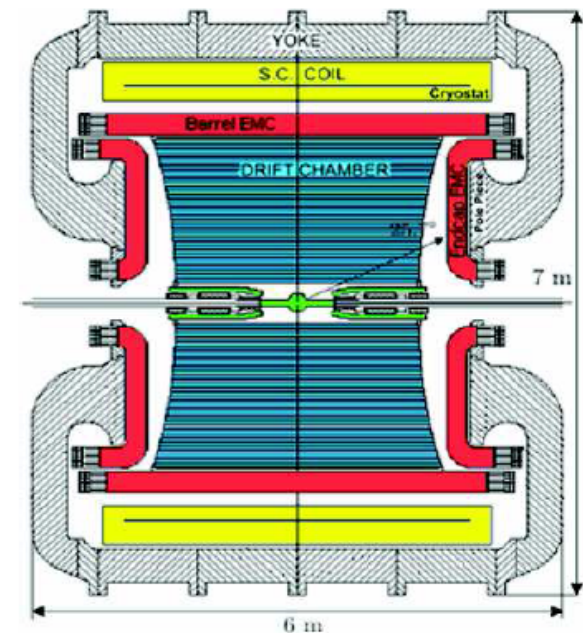
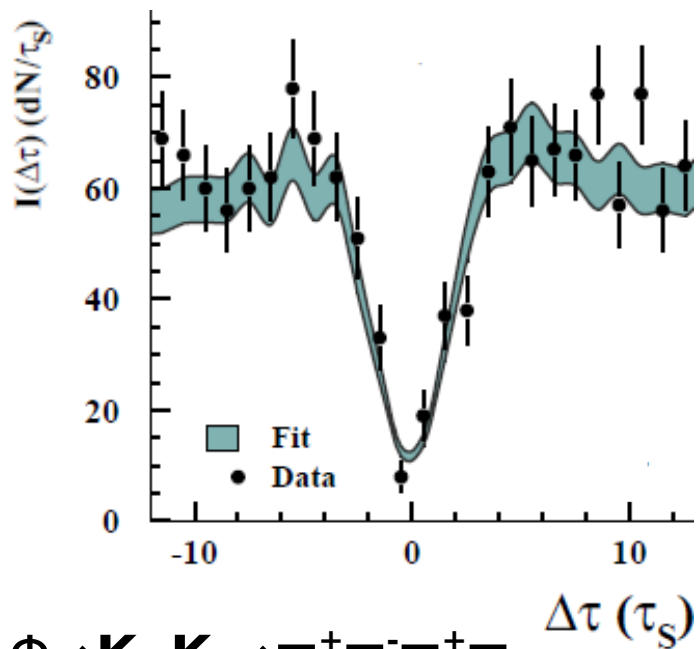
Dekoherencja ↔ Efekty grawitacyjne:

S. Hawking, Comm.Math.Phys.87 (1982) 395

Badanie łamania symetrii CPT w układach kaonów neutralnych

$$I_{f_1 f_2}(\Delta\tau) = C_{12} e^{-\Gamma|\Delta\tau|} \left[|\eta_1|^2 e^{\frac{\Delta\Gamma}{2}\Delta\tau} + |\eta_2|^2 e^{-\frac{\Delta\Gamma}{2}\Delta\tau} - 2\Re\left(\eta_1\eta_2^* e^{-i\Delta m\Delta\tau}\right) \right]$$

$$\eta_1 \eta_2 \leftrightarrow \delta_{\text{CPT}} \epsilon_{\text{CP}}$$



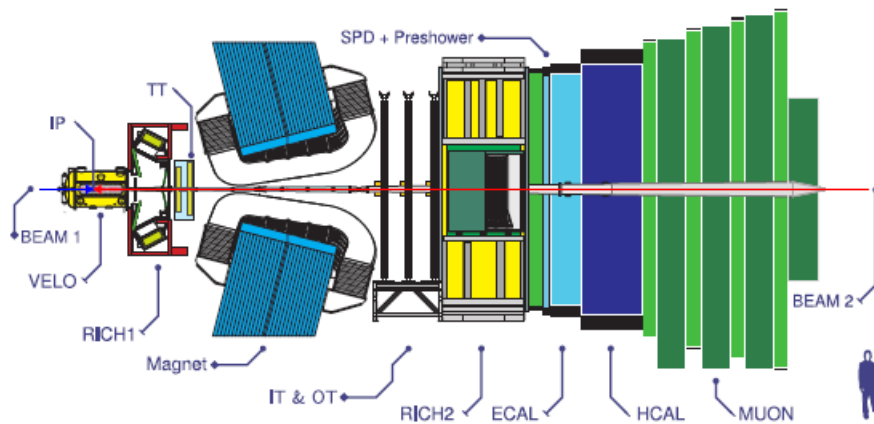
Rozdzielczość czasowa:
KLOE ~ 100 ps
KLOE-2 ~ 25 ps

D. Babusci et al. Phys. Lett. B 730C (2014), pp. 89-94

Najdokładniejsze światowe wyniki dotyczące testowania CPT w układach neutralnych kaonów

Badania na LHCb

Tematyka dotychczas nie eksplorowana na detektorze LHCb



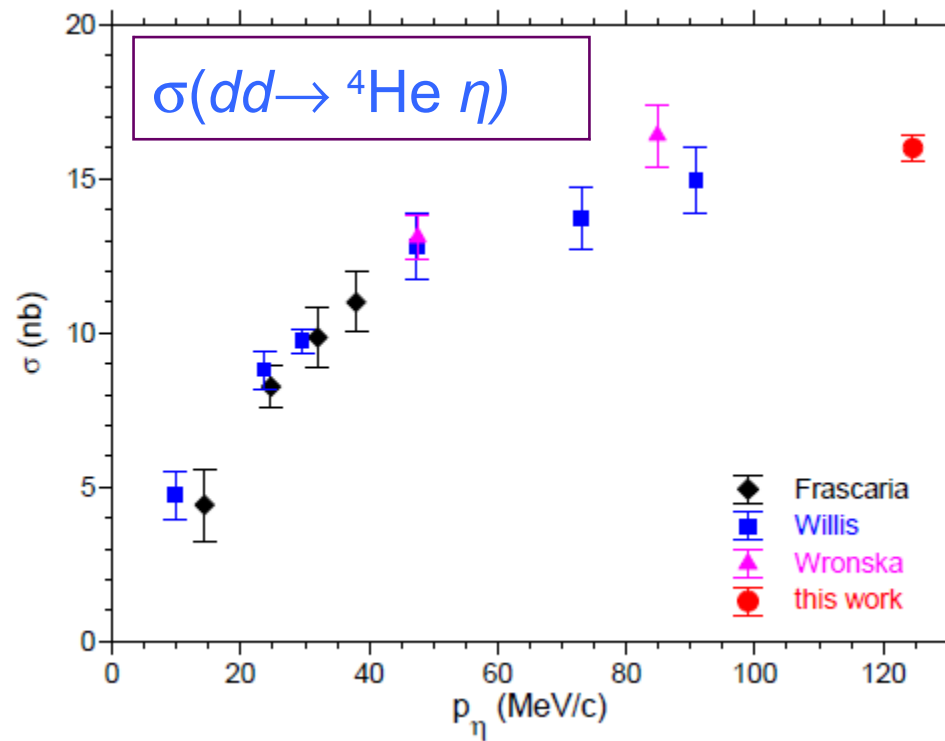
Perspektywy:

- $K^0 \bar{K}^0$
- $B^0 \bar{B}^0$
- $D^0 \bar{D}^0$

1. Rozdzielczość czasowa **trzy rzędy wielkości** lepsza od KLOE-2 w obszarze $\Delta t \approx 0 \rightarrow \sim \text{fs}!!!$
2. Przekroje czynne: $\sigma(pp \rightarrow \Phi X) \sim 1800 \mu\text{b}$ vs $\sigma(e^+ e^- \rightarrow \Phi) \sim 3 \mu\text{b}$
3. Statystyka: **wielokrotnie** wyższa niż na KLOE-2



Experimental indications of existence of a ${}^4\text{He}-\eta$ bound system



R. Frascaria et al., Phys. Rev. C 50 (1994) 573.

N. Willis et al., Phys. Lett. B 406 (1997) 14.

A. Wrońska et al., Eur.Phys.J. A26 (2005) 421-428.

Machner et al. Acta Phys. Pol. B (2014)

Układy detekcyjne

Detektor **KLOE-2**:

Zderzacz $e^+ e^-$ DAΦNE we Frascati.

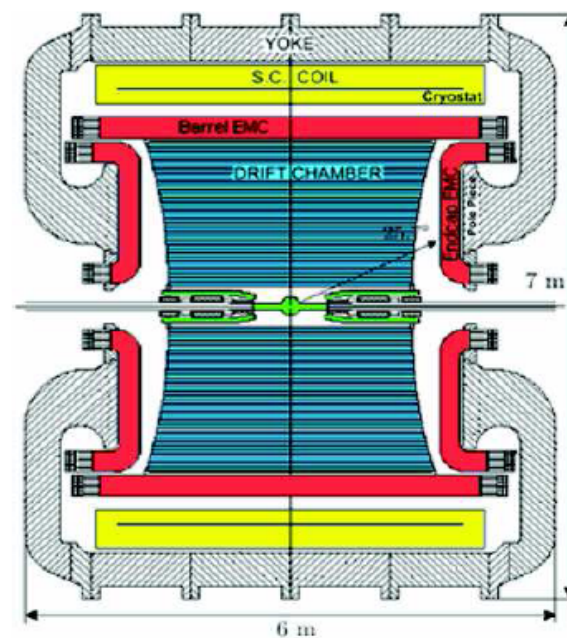
Energia: około 1020 MeV (fabryka Φ : $\sigma = 3 \mu\text{b}$)

Detektor o akceptancji 4π :

- Komora dryfowa: $\frac{\sigma(p_{\perp})}{p_{\perp}} 0.4\%$
- Kalorymetr elektromagnetyczny:

$$\frac{\sigma_E}{E_{clu}} = \frac{5.7\%}{\sqrt{E_{clu}(\text{GeV})}}$$

$$\sigma_{T_{clu}} = \frac{57\text{ps}}{\sqrt{(E_{clu}(\text{GeV}))}} \oplus 100\text{ps}$$



$$B = 0.52 \text{ T}$$

Badania na KLOE-2

Układ detekcyjny projektowany pod kątem fizyki kaonów:

$$\sigma(e^+ e^- \rightarrow \Phi) \sim 3 \mu\text{b}$$

$$\Phi \rightarrow \text{kaony neutralne} \quad \sim 33\%$$

$$\Phi \rightarrow \text{kaony naładowane} \quad \sim 40\%$$

Znakomita rozdzielczość czasowa $\sim 100\text{ps}$

Najdokładniejsze światowe wyniki dotyczące testowania CPT w układach neutralnych kaonów:

D. Babusci et al. Phys. Lett. B 730C (2014), pp. 89-94

Perspektywy:

Nowy detektor wierzchołka (Inner Tracker): **$100\text{ps} \rightarrow 25 \text{ps}$**

Nowa kampania pomiarowa: **statystyka $\times 2 \sim 4 \text{fb}^{-1}$**

Układy detekcyjne

Detektor **KLOE-2:**

Zderzacz $e^+ e^-$ DAΦNE we Frascati.

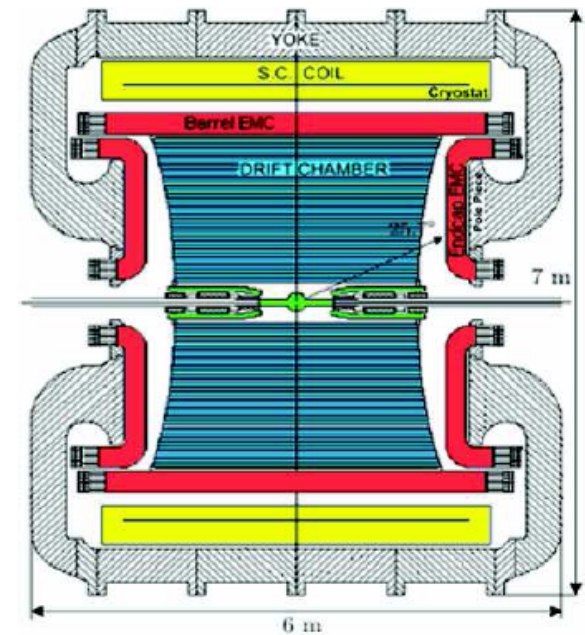
Energia: około 1020 MeV (fabryka Φ : $\sigma = 3 \mu\text{b}$)

Detektor o akceptancji 4π :

- Komora dryfowa: $\frac{\sigma(p_{\perp})}{p_{\perp}} 0.4\%$
- Kalorymetr elektromagnetyczny:

$$\frac{\sigma_E}{E_{clu}} = \frac{5.7\%}{\sqrt{E_{clu}(\text{GeV})}}$$

$$\sigma_{T_{clu}} = \frac{57\text{ps}}{\sqrt{E_{clu}(\text{GeV})}} \oplus 100\text{ps}$$



$B = 0.52 \text{ T}$

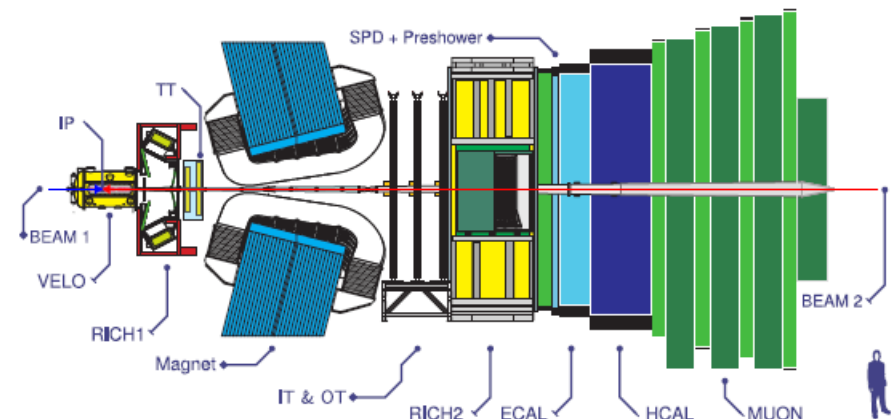
Detektor **LHCb:**

Zderzacz pp LHC w CERN.

Energia: około 14 GeV (przed zmianą)

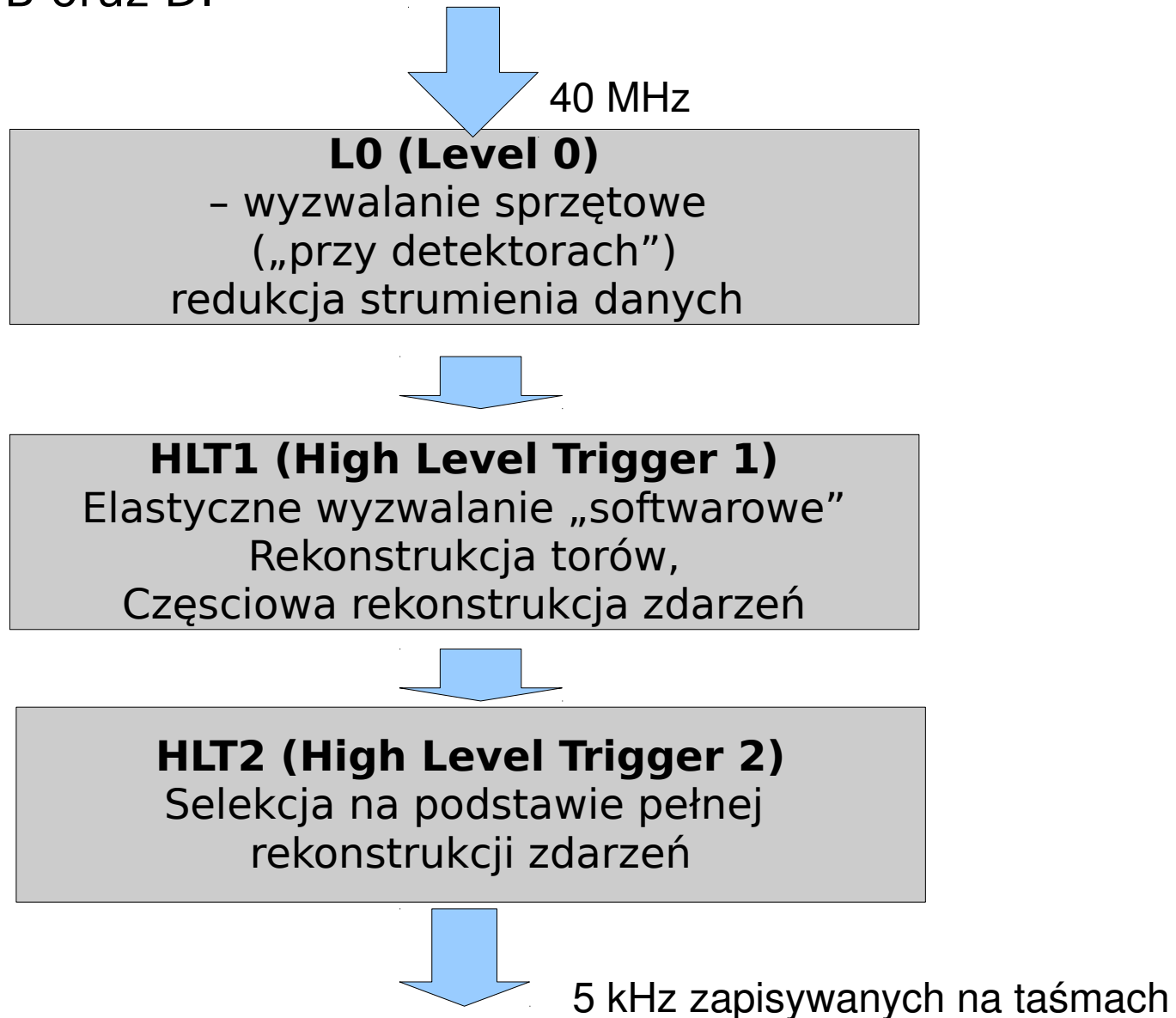
Jednoramienny spektrometr:

- Detektory RICH
- Kalorymetry elektromagnetyczny i hadronowy
- Detektory mionów
- Grupa detektorów śladowych



Trigger LHCb

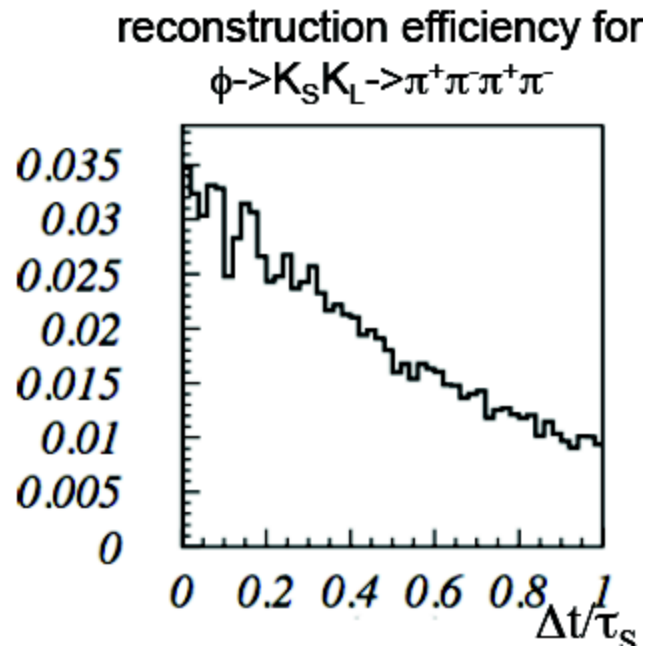
Trzystopniowy układ wyzwalania ustawiony pod kątem rejestracji mezonów B oraz D.



Trigger LHCb w kontekście rejestracji kaonów

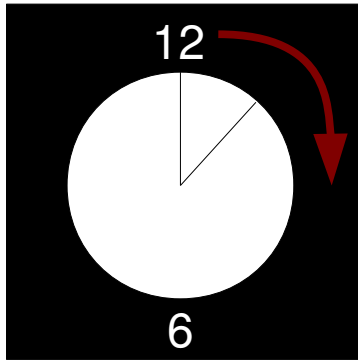
Możliwe zmiany na poziomie HLT1 oraz HLT2:

- Ustawienie warunków selekcji na pęd poprzeczny
- Szybka rekonstrukcja torów oraz rekonstrukcja mas niezmienniczych kaonów
- Szybka rekonstrukcja masy niezmienniczej mezonu Φ

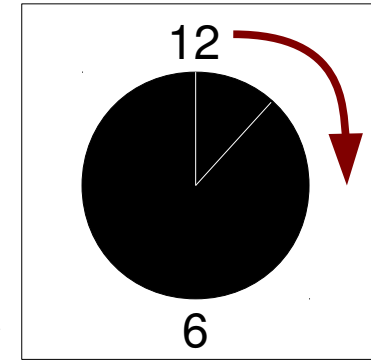


Prezentacja A. DiDomenico na spotkaniu LHCb

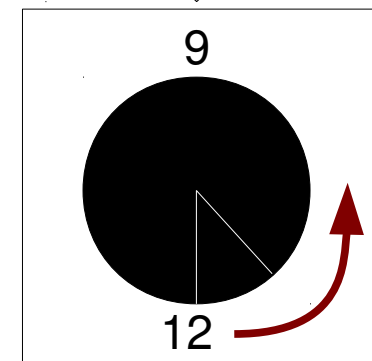
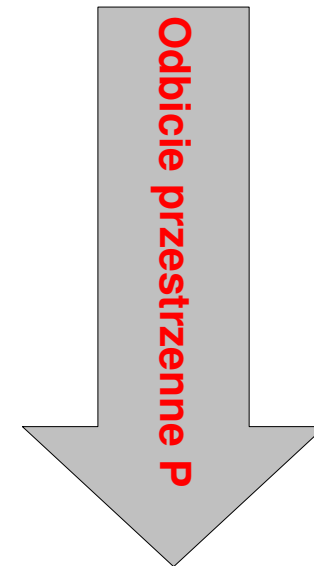
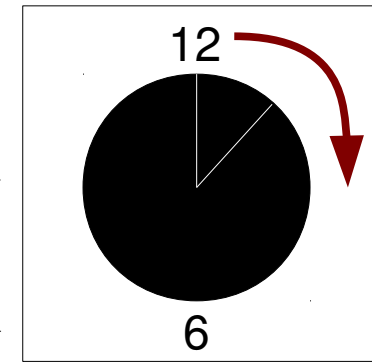
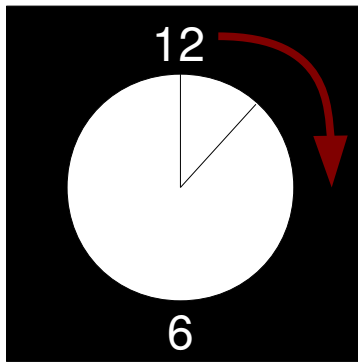
Symetrie C,P, T



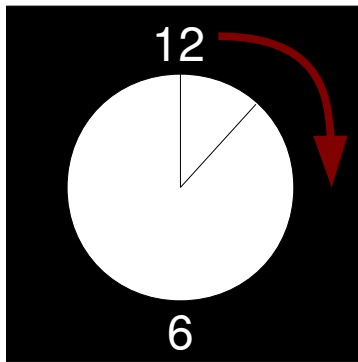
Sprężenie ładunkowe C
cząstka \leftrightarrow antycząstka



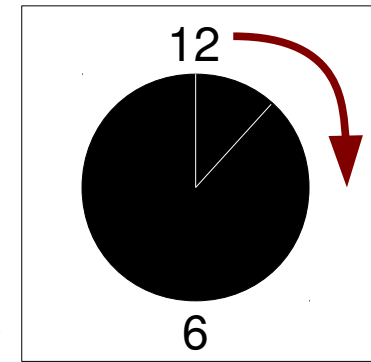
Symetrie C,P, T



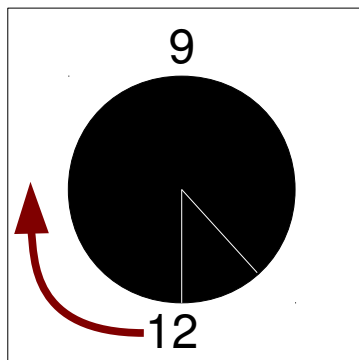
Symetrie C,P, T



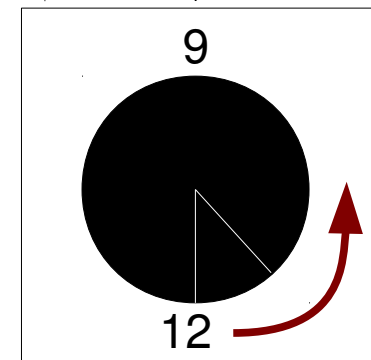
Sprzężenie ładunkowe C
cząstka \leftrightarrow antycząstka



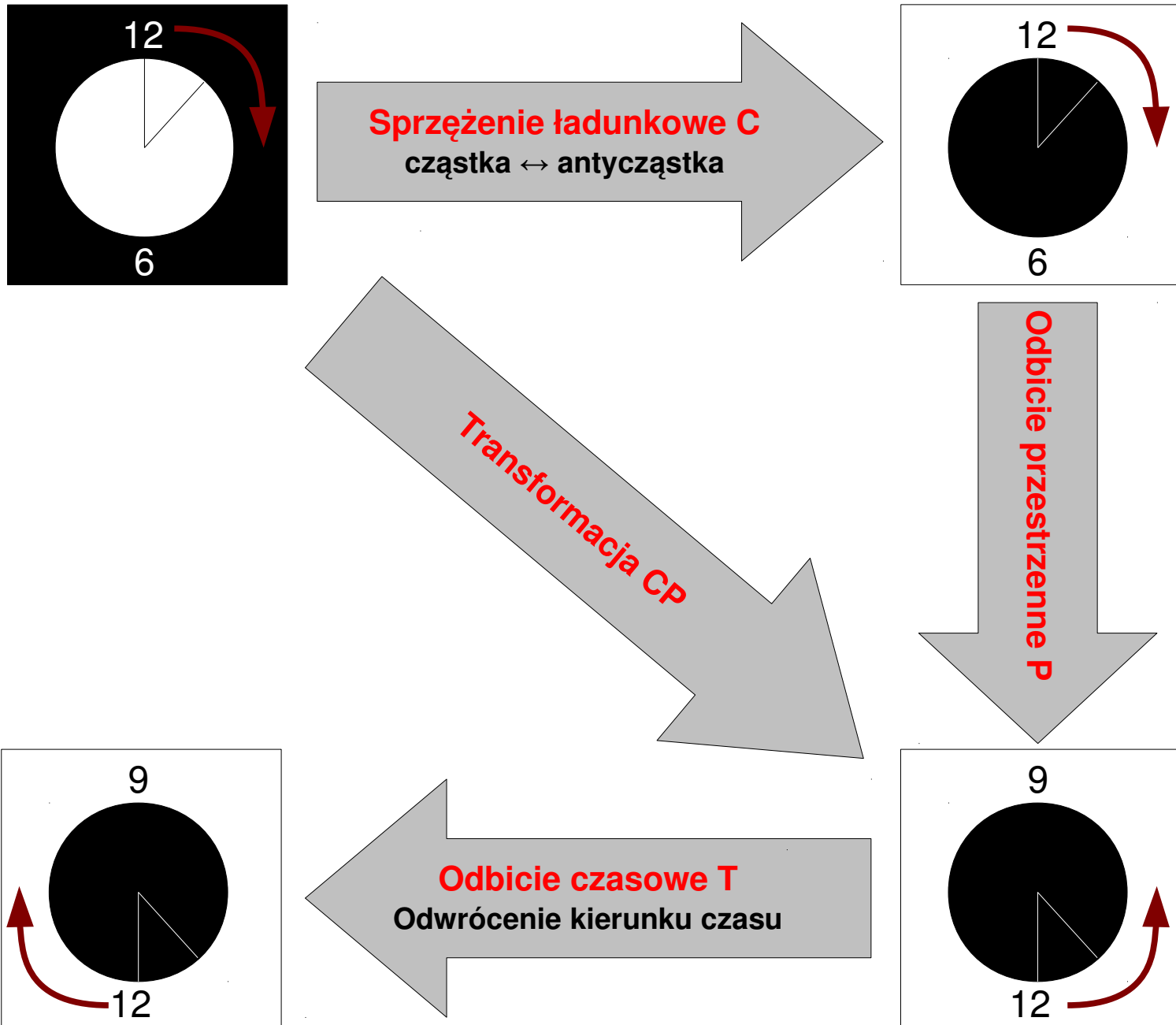
Odbicie przestrzenne P



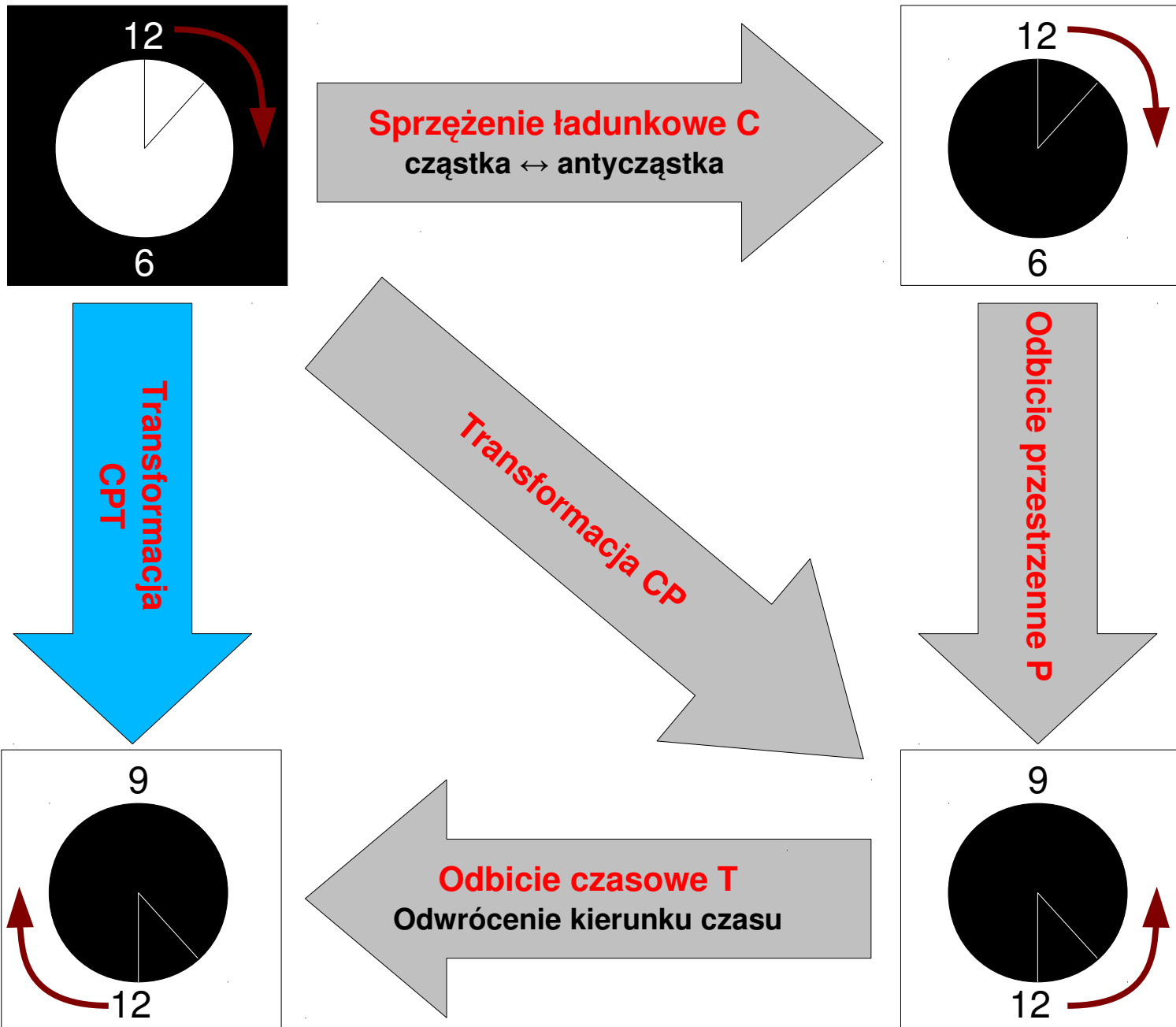
Odbicie czasowe T
Odwrócenie kierunku czasu



Symetrie C,P, T



Symetrie C,P, T



Ewolucja czasowa neutralnych mezonów zapachowych


Podejście Weisskopfa-Wignera:

$$\frac{\partial}{\partial t} \Phi(t) = H \Phi(t)$$

hamiltonian efektywny

$$H = M - \frac{i}{2} \Gamma$$

macierze hermitowskie

Z CPT wynika: $H_{11} = H_{22}$ 

$$M_{11} = M_{22}$$

$$\Gamma_{11} = \Gamma_{22}$$

Dodatkowo z CP: $|H_{21}| = |H_{12}|$

Ewolucja czasowa neutralnych mezonów zapachowych


Podejście Weisskopfa-Wignera:

$$\frac{\partial}{\partial t} \Phi(t) = H \Phi(t)$$

hamiltonian efektywny

$$H = M - \frac{i}{2} \Gamma$$

macierze hermitowskie

Z CPT wynika: $H_{11} = H_{22}$ 

$$M_{11} = M_{22}$$

$$\Gamma_{11} = \Gamma_{22}$$

Dodatkowo z CP: $|H_{21}| = |H_{12}|$

Parametryzacja fenomenologiczna:

Łamanie CPT:

$$\delta_{CPT} = \frac{H_{11} - H_{22}}{\sqrt{H_{12}H_{21}}}$$

Łamanie CP:

$$\epsilon_{CP} = \frac{H_{21} - H_{12}}{\sqrt{H_{12}H_{21}}}$$

Ewolucja czasowa neutralnych mezonów zapachowych

$$\Phi(t) = \begin{bmatrix} P^0 \\ \bar{P}^0 \end{bmatrix}$$

zapachowe stany własne (np. K^0 , \bar{K}^0)

Obserwowalne mezony (np. K_L , K_S)

$$\begin{aligned} |P_a\rangle &= \alpha_1 |P^0\rangle + \alpha_2 |\bar{P}^0\rangle \\ |P_b\rangle &= \alpha_3 |P^0\rangle - \alpha_4 |\bar{P}^0\rangle \end{aligned}$$

Normalizacja:

$$|\alpha_1|^2 + |\alpha_2|^2 = |\alpha_3|^2 + |\alpha_4|^2 = 1$$

Relacje Bella-Steinbergera

Dodatkowe założenie: zachowana **unitarność**

$$\left[\frac{\Gamma_1 + \Gamma_2}{\Gamma_1 - \Gamma_2} + i \tan \Phi_{SW} \right] \times \left[\frac{\Re(\epsilon)}{1 + |\epsilon|^2} - i \Im(\delta) \right] = \frac{1}{\Gamma_1 - \Gamma_2} \sum_f A_i(f) A_j^*(f),$$

Wartości z eksperymentu
(m i Γ)

Suma po wszystkich możliwych
kanałach rozpadów

$$\Phi_{SW} = \arctan\left(2 \frac{m_2 - m_1}{\Gamma_1 - \Gamma_2}\right)$$

Wartości z eksperymentu

$\text{Im}(\delta) \neq 0$ oznacza: 1. złamanie **CPT** lub
2. ewolucja **nieunitarna** lub
3. nowy, „niewidzialny” kanał

Relacje Bella-Steinbergera

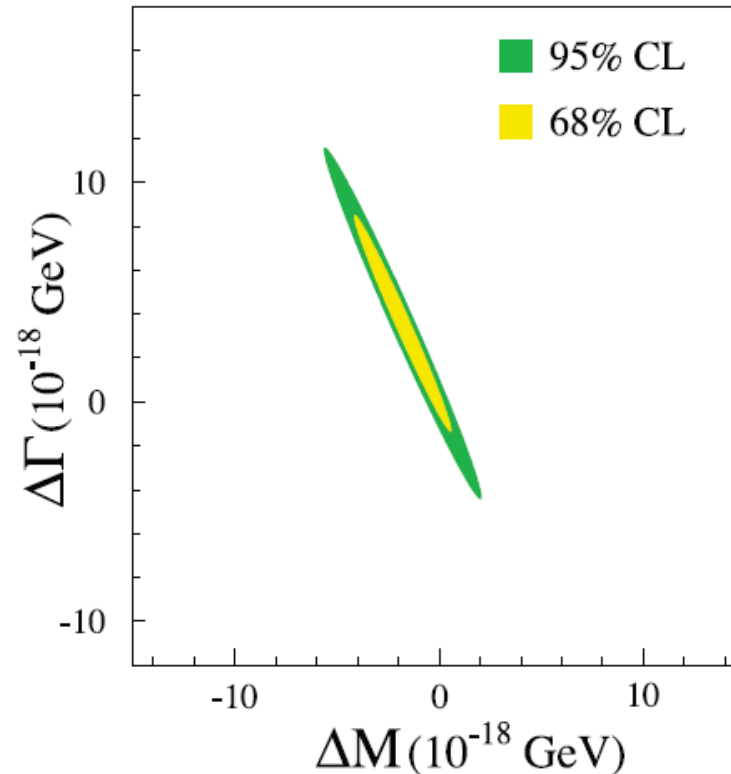
W układzie kaonów jedynie kilka istotnych kanałów rozpadu:

- $\pi\pi$ (główny wkład)
- $\pi\pi\pi$, $\pi e(\mu)\nu$, $\pi\pi\gamma$
- reszta pomijalna

Równość mas i czasów życia:
(cząstka \leftrightarrow antycząstka)

$$\Delta M = 0$$

$$\Delta \Gamma = 0$$



J. Beringer et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D86, 010001 (2012)

Dokładność:


$$-4.0 \times 10^{-19} \text{ GeV} < m_{K^0} - m_{\bar{K}^0} < 4.0 \times 10^{-19} \text{ GeV} \quad \text{at } 95 \% \text{ C.L.}$$

KLOE:

D. Babusci et al. Phys. Lett. B 730C (2014)

Implikacje twierdzenie CPT

- Identyczne masy cząstek oraz antycząstek
- Identyczne czasy życia cząstek oraz antycząstek
- Jednakowe stosunki rozgałęzień dla odpowiednich rozpadów cząstek i antycząstek

QFT + Lokalność oddziaływania + Niezmiennność Lorentzowska  CPT

Odwrotne twierdzenie CPT (Greenberg 2002):

(teoria z unitarną ewolucji i hermitowskim Lagranżianem):

Łamanie CPT implikuje łamanie symetrii Lorentza

Standard-Model Extension

Fenomenologiczne opis łamania CPT (np. parametr ad-hoc δ):

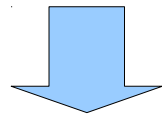
- Nie mówi nic o mechanizmie łamania
- Jak porównać wyniki eksperymentów?

Standard-Model Extension

Fenomenologiczne opis łamania CPT (np. parametr ad-hoc δ):

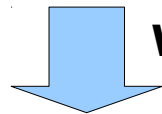
- Nie mówi nic o mechanizmie łamania
- Jak porównać wyniki eksperymentów?

**Teoria fundamentalna np. jedna z teorii strun
(może zachowywać CPT i symetrię Lorentza)**



Spontaniczne złamanie symetrii Lorentza

Standard-Model Extension (Kostelecky od 1989)
efektywna teoria pola
założenia jak w MS + człony łamiące s. Lorentza



W granicy zachowania s. Lorentza

Model Standardowy

Ogólna Teoria Względności

SME dostarcza konsyistentnych ram teoretycznych do badania łamania CPT oraz symetrii Lorentza

Standard-Model Extension

Standard-Model Extension:

- SU(3) x SU(2) x U(1)
- Renormalizacja
- Zachowanie energii-pędu
- Łamanie SU(2) x U(1)
- Reguły kwantyzacji
- Mikroprzyczynowość
- Związek spinu ze statystyką
- Zachowanie symetrii Lorentza obserwatorów
- **Złamanie symetrii Lorentza dla cząstek**
- **Złamanie symetrii CPT**

$$\beta^\mu = \gamma(1, \vec{\beta})$$

$$\Delta\Lambda \approx \beta^\mu \Delta a_\mu$$

Eksperymentalne metody testowania symetrii CPT

Precyzyjne testy własności cząstek i antycząstek (m , τ , q , g):

- Spektroskopia pozytonium
- Testowanie założeń QED w pułapkach Penninga
- Spektroskopia \bar{p} - ^4He
- Wiązki μ^+ , μ^- , π^+ , π^- , κ^+ , κ^- w próżni
- spektroskopia wodoru i antywodoru (przyszłość)

Eksperymentalne metody testowania symetrii CPT

Precyzyjne testy własności cząstek i antycząstek (m, τ , q, g):

- Spektroskopia pozytonium
- Testowanie założeń QED w pułapkach Penninga
- Spektroskopia \bar{p} - ^4He
- Wiązki μ^+ , μ^- , π^+ , π^- , κ^+ , κ^- w próżni
- spektroskopia wodoru i antywodoru (przyszłość)

Analiza układów neutralnych mezonów zapachowych:

$>10^{-18}$ GeV precyzja umożliwiająca zejście do poziomu Plancka

Podjęcia komplementarne

Eksperymentalne metody testowania symetrii CPT

General principles of relativistic field theory require invariance under the combined transformation CPT . The simplest tests of CPT invariance are the equality of the masses and lifetimes of a particle and its antiparticle. The best test comes from the limit on the mass difference between K^0 and \bar{K}^0 . Any

J. Beringer et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D86, 010001 (2012)

Inne metody badania CPT:

- Spektroskopia pozytonium
- Testowanie założeń QED w pułapkach Penninga
- Spektroskopia \bar{p} - ^4He
- Wiązki μ^+ , μ^- , π^+ , π^- , κ^+ , κ^- w próżni

Eksperymentalne metody testowania symetrii CPT

| | |
|--|---|
| Spektroskopia pozytonium | $(m_{e^+} - m_{e^-}) / m_{\text{average}} < 8 \times 10^{-9}, \text{ CL} = 90\%$ $ q_{e^+} + q_{e^-} /e < 4 \times 10^{-8}$ |
| Testowanie założeń QED w pułapkach Penninga | $(g_{e^+} - g_{e^-}) / g_{\text{average}} (-0.5 \pm 2.1) \times 10^{-12}$ |
| Spektroskopia \bar{p}-^4He | $ m_p - m_{\bar{p}} /m_p < 2 \times 10^{-9}, \text{ CL} = 90\%$ |
| Wiązki w próżni | $(\tau_{\mu^+} - \tau_{\mu^-}) / \tau_{\text{average}} (2 \pm 8) \times 10^{-5}$ $(\tau_{\pi^+} - \tau_{\pi^-}) / \tau_{\text{average}} (6 \pm 7) \times 10^{-4}$ $(\tau_{K^+} - \tau_{K^-}) / \tau_{\text{average}} (0.10 \pm 0.09)\% (S = 1.2)$ |
| Układy kaonów neutralnych | $ m_{K^0} - m_{\bar{K}^0} / m_{\text{average}} < 6 \times 10^{-19}, \text{ CL} = 90\%$ $(\Gamma_{K^0} - \Gamma_{\bar{K}^0})/m_{\text{average}} (8 \pm 8) \times 10^{-18}$ |

Eksperymentalne metody testowania symetrii CPT

Spektroskopia pozytonium

$$(m_{e^+} - m_{e^-}) / m_{\text{average}} < 8 \times 10^{-9}, \text{ CL} = 90\%$$

$$|q_{e^+} + q_{e^-}| / e < 4 \times 10^{-8}$$

Testowanie założeń QED w pułapkach

$$(m_{\mu^+} - m_{\mu^-}) / m_{\text{average}} < 1) \times 10^{-12}$$

Spektroskopia

Trudności z porównaniem poszczególnych wyników:

1. brak metody porównawczej
2. różne mechanizmy łamania CPT

%

Wiązki w próżni

$$(\tau_{\mu^+} - \tau_{\mu^-}) / \tau_{\text{average}} (2 \pm 8) \times 10^{-5}$$

$$(\tau_{\pi^+} - \tau_{\pi^-}) / \tau_{\text{average}} (6 \pm 7) \times 10^{-4}$$

$$(\tau_{K^+} - \tau_{K^-}) / \tau_{\text{average}} (0.10 \pm 0.09)\% (S = 1.2)$$

Układy kaonów neutralnych

$$|m_{K^0} - m_{\bar{K}^0}| / m_{\text{average}} < 6 \times 10^{-19}, \text{ CL} = 90\%$$

$$(\Gamma_{K^0} - \Gamma_{\bar{K}^0}) / m_{\text{average}} (8 \pm 8) \times 10^{-18}$$

Skład kwarkowy mezonów neutralnych

Kaony neutralne:

$$K^0 = d \bar{s}$$

$$\bar{K}^0 = \bar{d} s$$

Mezony D neutralne:

$$D^0 = c \bar{u}$$

$$\bar{D}^0 = \bar{c} u$$

Mezony B neutralne:

$$B^0 = d \bar{b}$$

$$\bar{B}^0 = \bar{d} b$$

Mezony Bs neutralne:

$$B_s^0 = s \bar{b}$$

$$\bar{B}_s^0 = \bar{s} b$$

Tomografia TOF-PET

- Szereg aplikacji „wyświetlacz zdarzeń” do wizualizacji danych eksperymentalnych oraz symulacji.
- Opracowanie i wdrożenie algorytmu do „szybkich” rekonstrukcji obrazów.
- Prowadzenie grupy zajmujących się rozwojem pakietu do analizy danych **JPet Framework**
- Koordynacja współpracy z firmą SilverMedia – rozwój oprogramowania **JPET-Controller** oraz **JPET-Viewer**.