

Akseleratory przyszłości dla Fabryki Neutrin i fizyki mionów

J. Pasternak, Imperial College, London / RAL STFC

Plan:

- Wprowadzenie.
- Fabryka Neutrino – instrument precyzyjnej fizyki neutrino.
- Poszukiwanie łamania liczby leptonowej w sektorze naładowanych leptonów (COMET/PRIME).
- Perspektywy dla zderzacza mionów.
- Podsumowanie.

Standardowy Model Neutrin

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Dane eksperymentalne:

$$\theta_{12} \subset \{32.3^\circ \rightarrow 37.8^\circ\}$$

$$\theta_{31} \subset \{36.9^\circ \rightarrow 51.3^\circ\}$$

$$\theta_{13} < 10.3^\circ$$

$$\Delta m_{21}^2 = (7.66 \pm 0.35) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

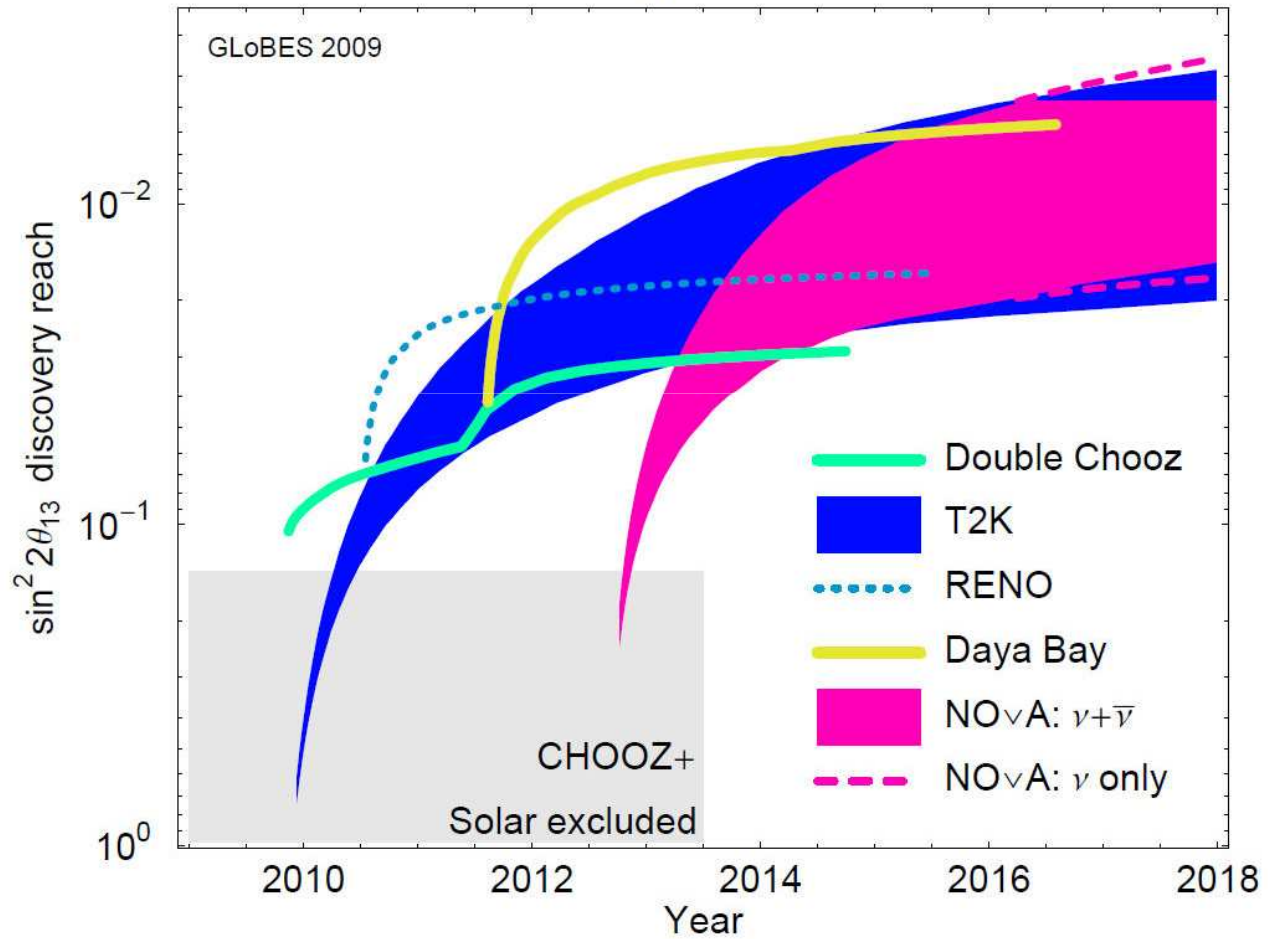
$$|\Delta m_{31}^2| = (2.38 \pm 0.27) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

Nic nie wiadomo o fazie łamania symetrii CP!

J. Pasternak

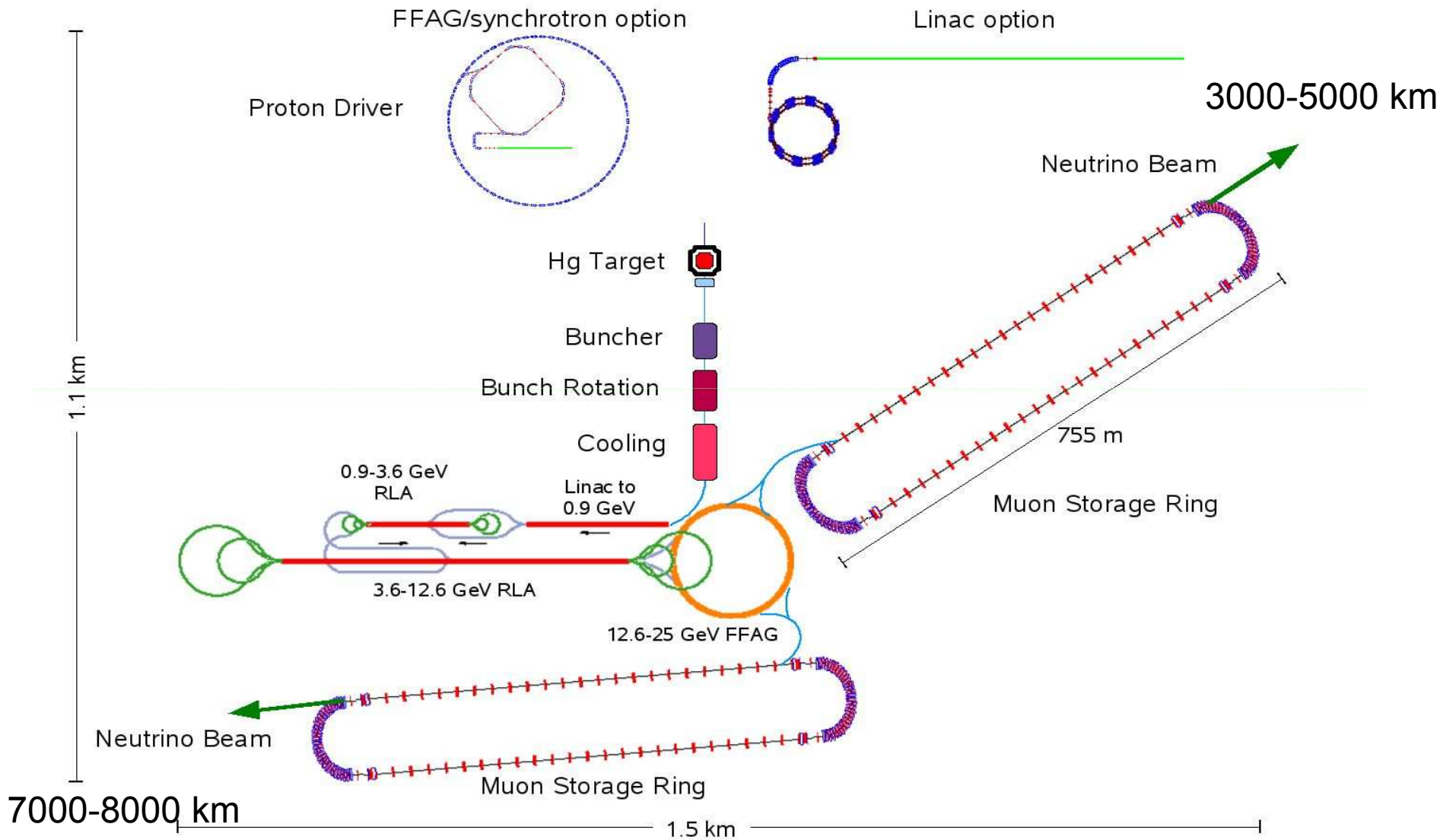
Perspektywy poszukiwania θ_{13}

$\sin^2 2\theta_{13}$ discovery potential (NH, 90% CL)



J. Pasternak

Projekt Fabryka Neutrin



J. Pasternak

08.10.10, UW

Międzynarodowe Studium Projektowe Fabryki Neutrin – International Design Study (IDS-NF)

IDS-NF Steering Group	
Committee	
A Blondel	Geneva
M Zisman	LBLN
Y Kuno	Osaka
K Long	Imperial (Chair)
Accelerator Conveners	
S Berg	BNL
Y. Mori	Kyoto
C. Prior	STFC
J. Pozimski	Imperial
Detector Conveners	
A Bross	FNAL
P Soler	Glasgow
N. Mondal	Mumbai
A. Cervera	Valencia
Physics and Performance Evaluation Group Conveners	
A Donini	Madrid
P. Huber	CERN
S. Pascoli	Durham University
W. Winter	Universität Würzburg
O. Yasuda	Tokyo Metropolitan University

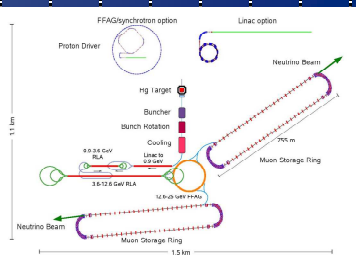
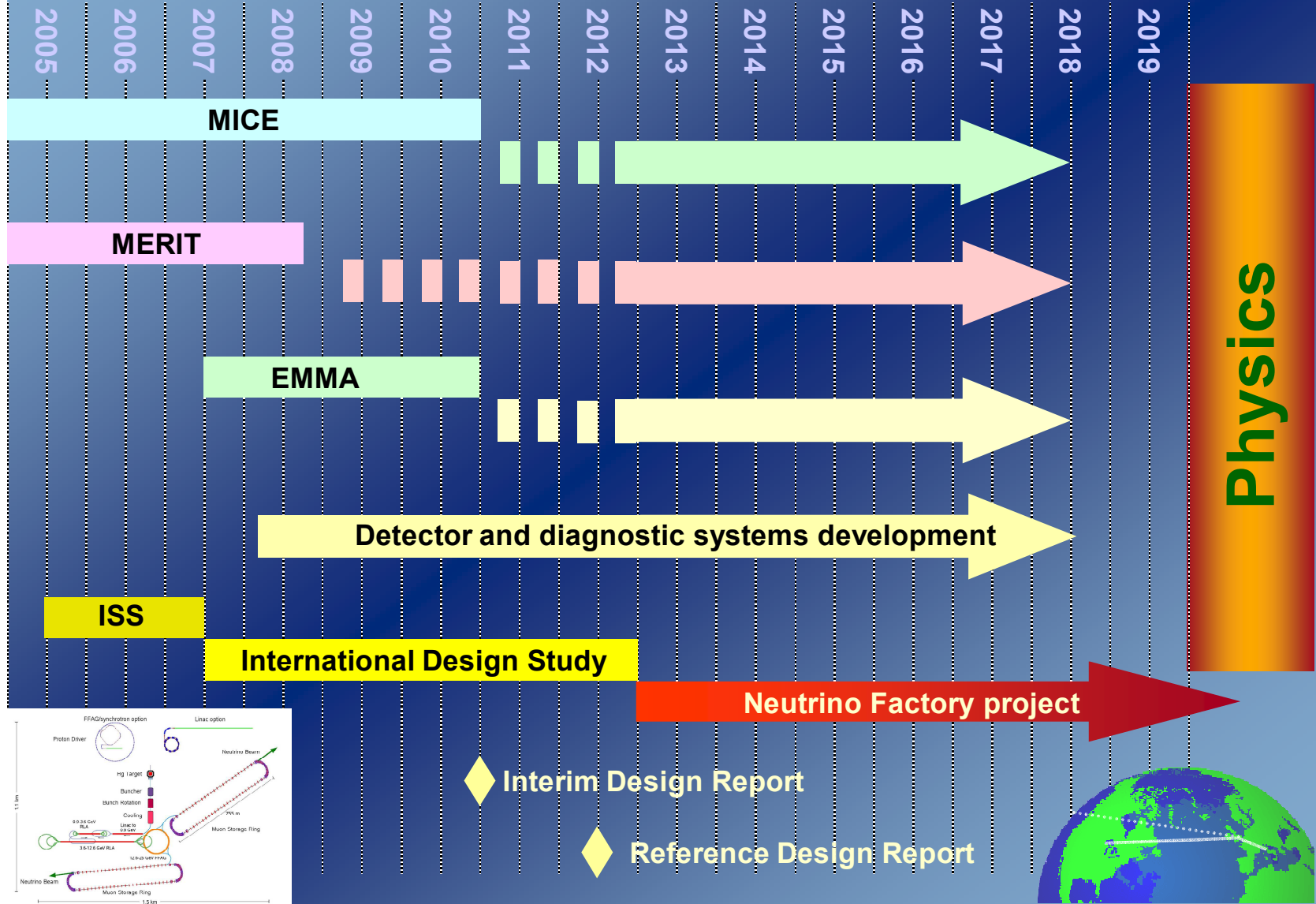
www.ids-nf.org/



J. Pasternak

08.10.10, UW

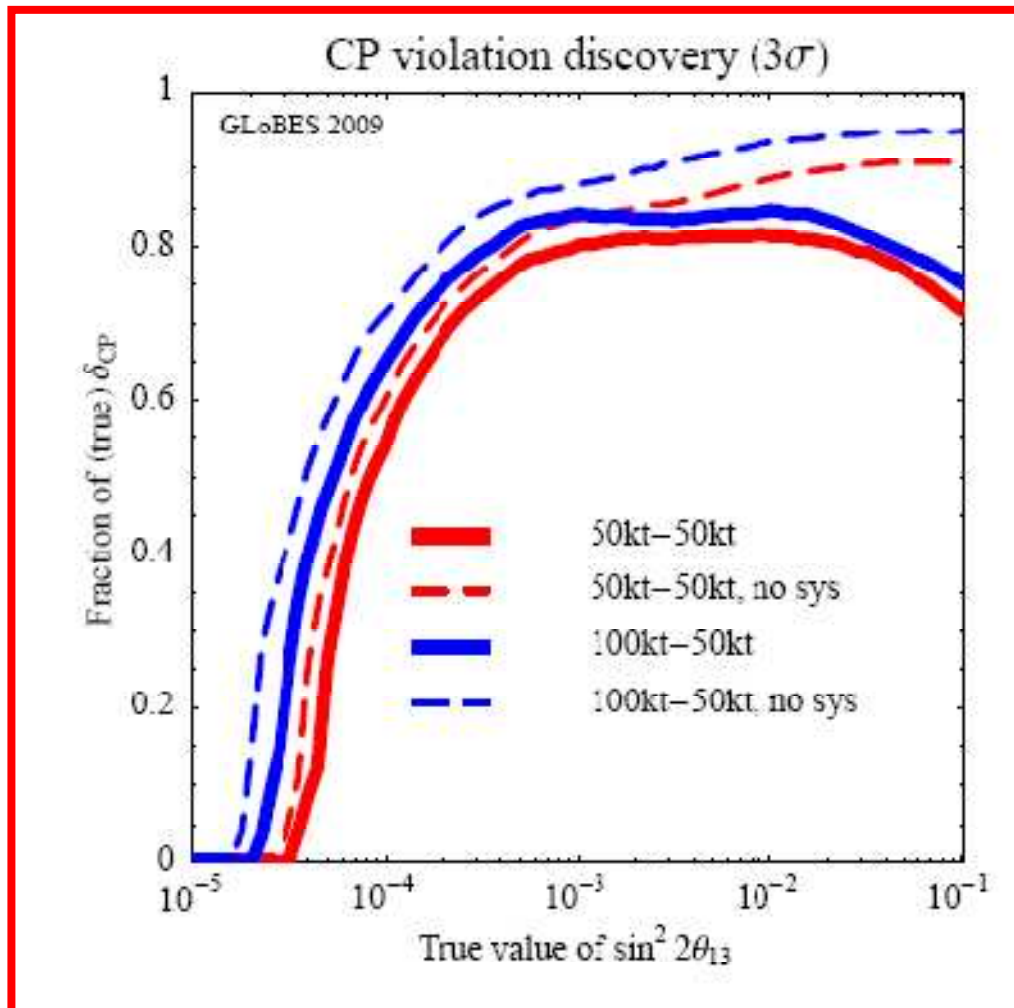
Neutrino Factory roadmap



J. Pasternak

08.10.10, UW

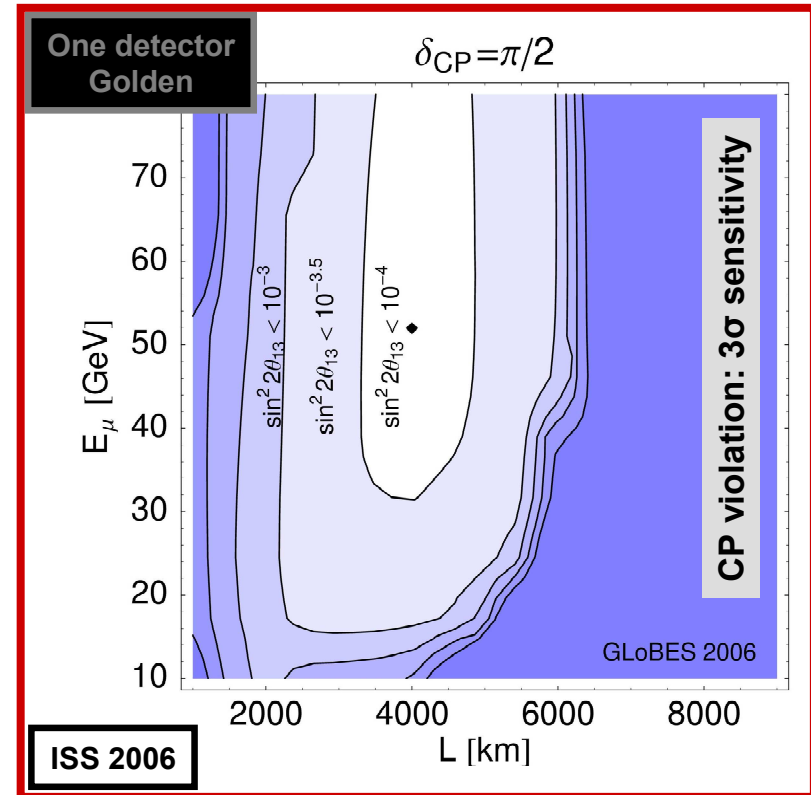
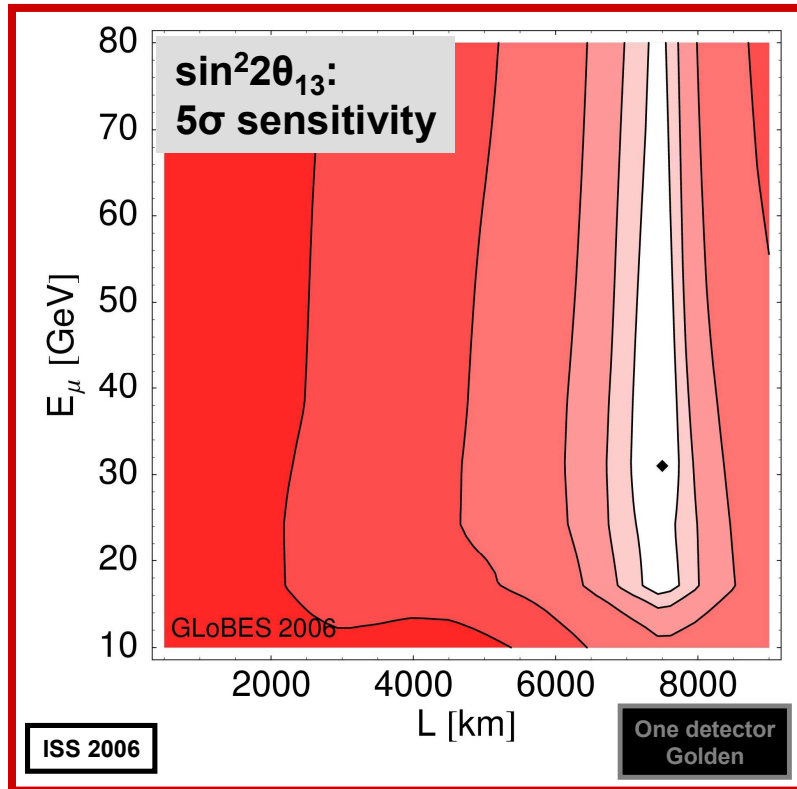
Perspektywy poszukiwania łamania symetrii CP w Fabryce Neutrin



J. Pasternak

08.10.10, UW

Optymalizacja parametrów FN



- Potrzebne są dwa detektory o długości baz ~ 7500 km i 4000 km.
- Wymagana energia ok. 25 GeV.

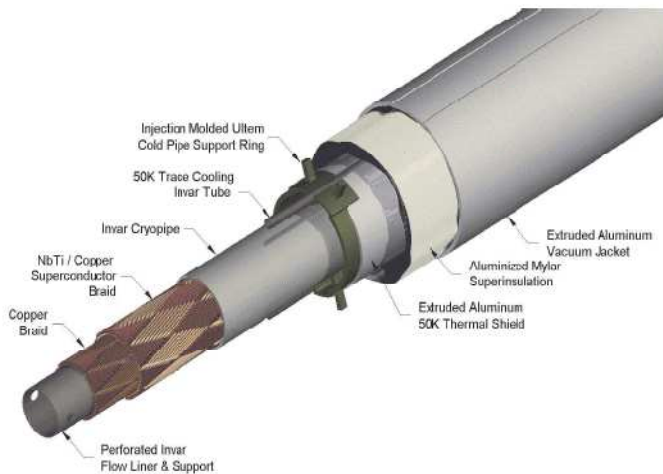
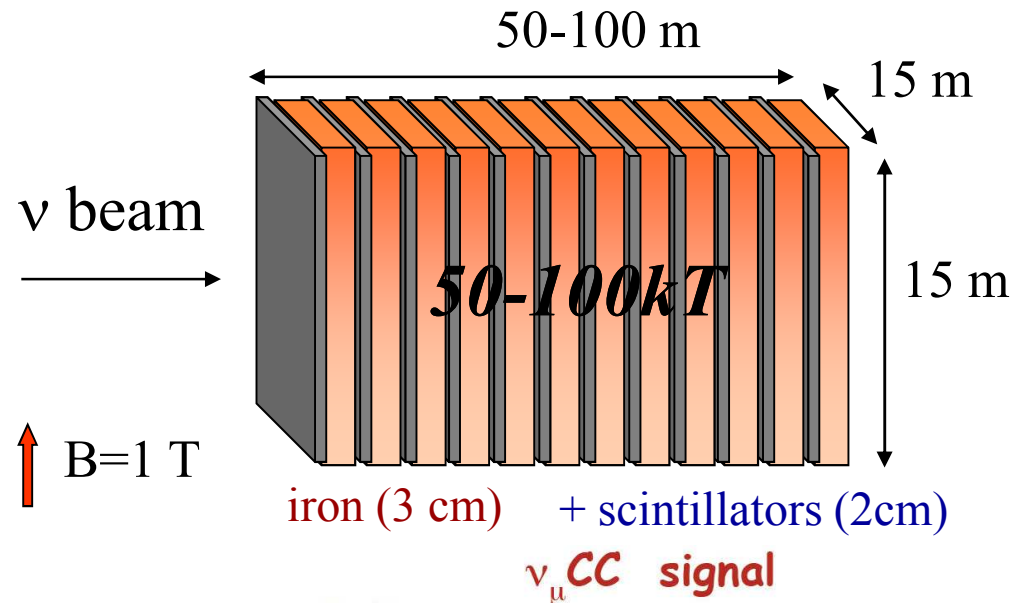
Huber, Lindner, Rolinec,
Winter,
Phys.Rev.D74:073003,2006

J. Pasternak

08.10.10, UW

Daleki Detektor dla Fabryki Neutrin

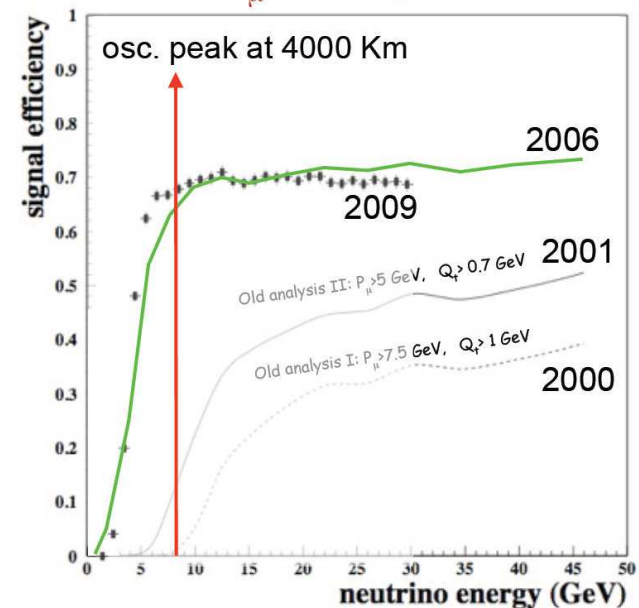
- MIND – Magnetised Iron Neutrino Detector dla obydwu wiązek wysyłanych na 3000-5000 i 7000-8000 km.
- Alternatywa – T ASD (Totally Active Scintillating Detectors).



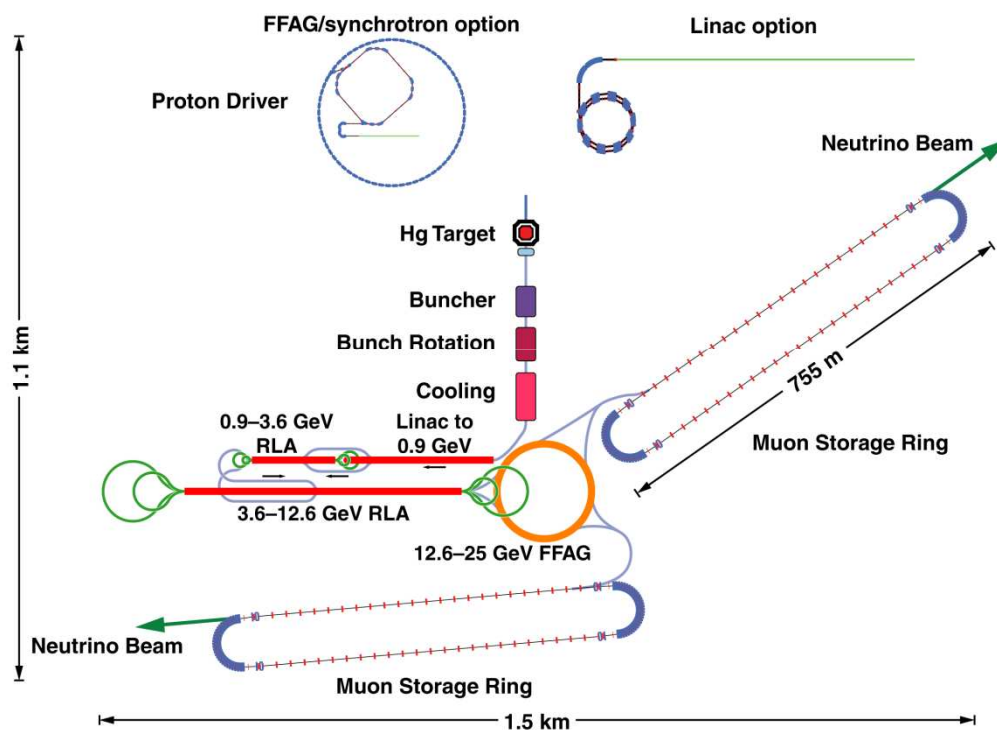
Magnetyzacja za pomocą nadprzewodzącej linii transmisyjnej

J. Pasternak

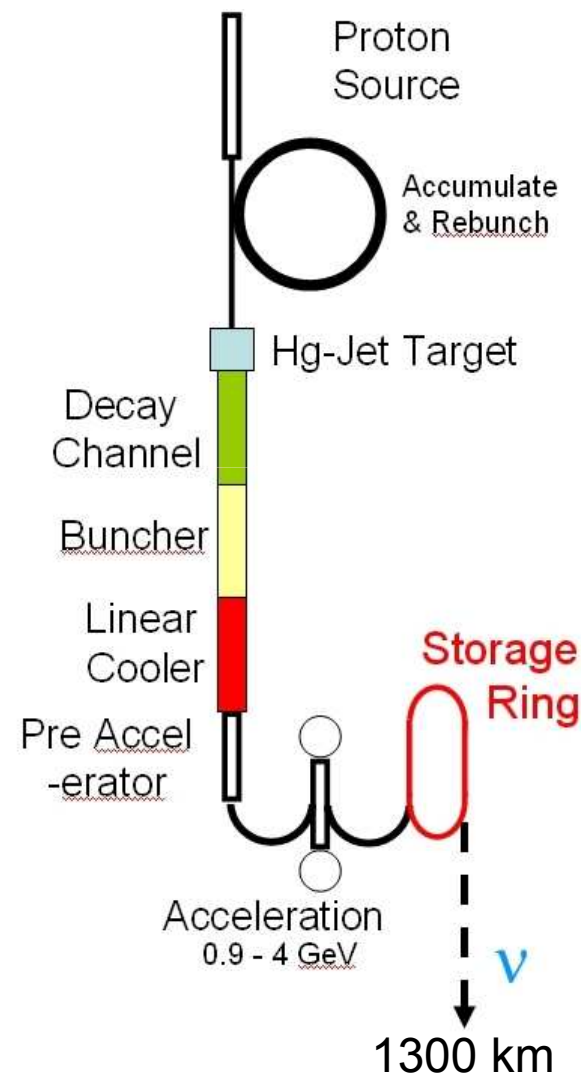
08.10.10, UW



Niskoenergetyczna Fabryka Neutrin

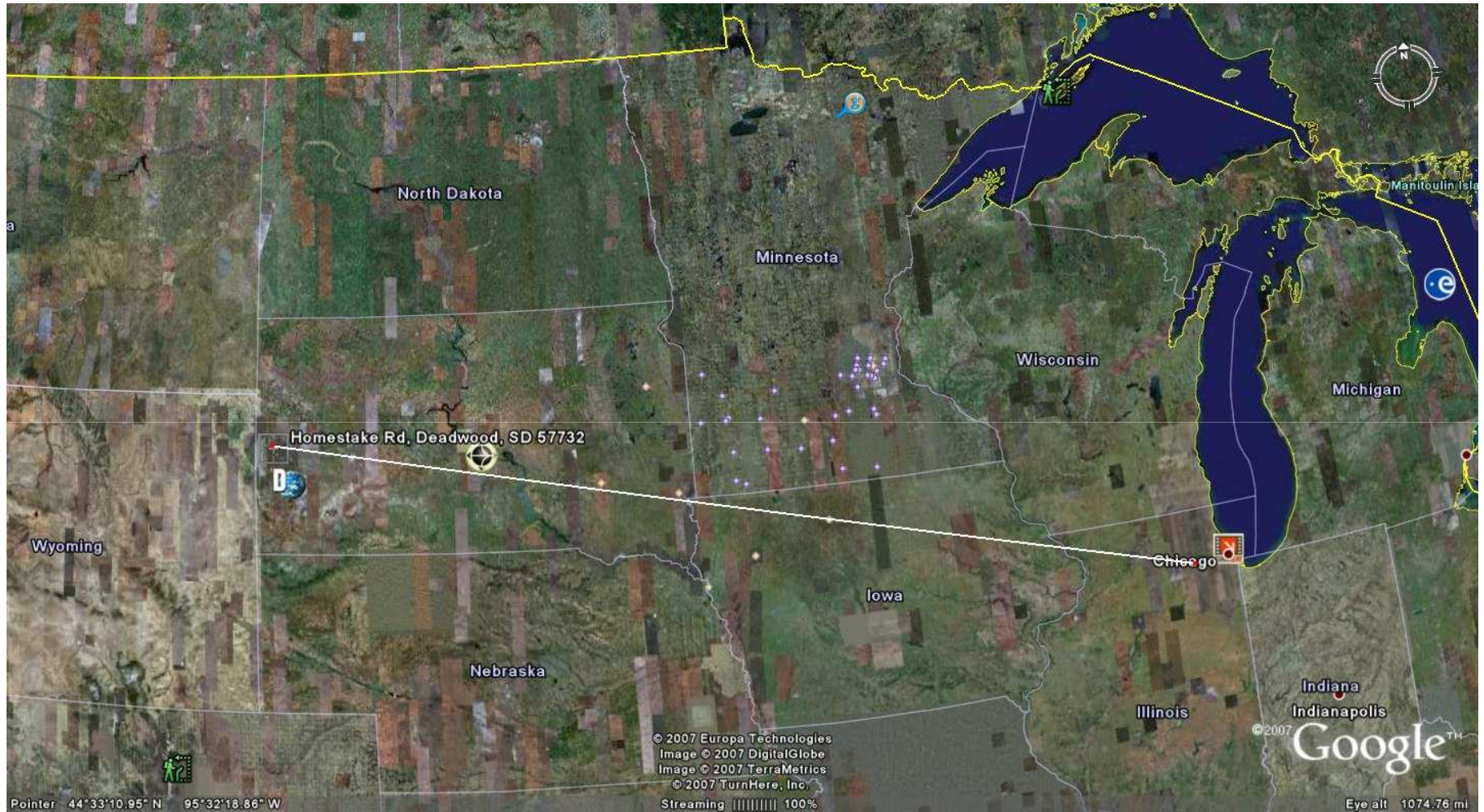


A. Bross, Fermilab



J. Pasternak

Możliwa lokalizacja w USA

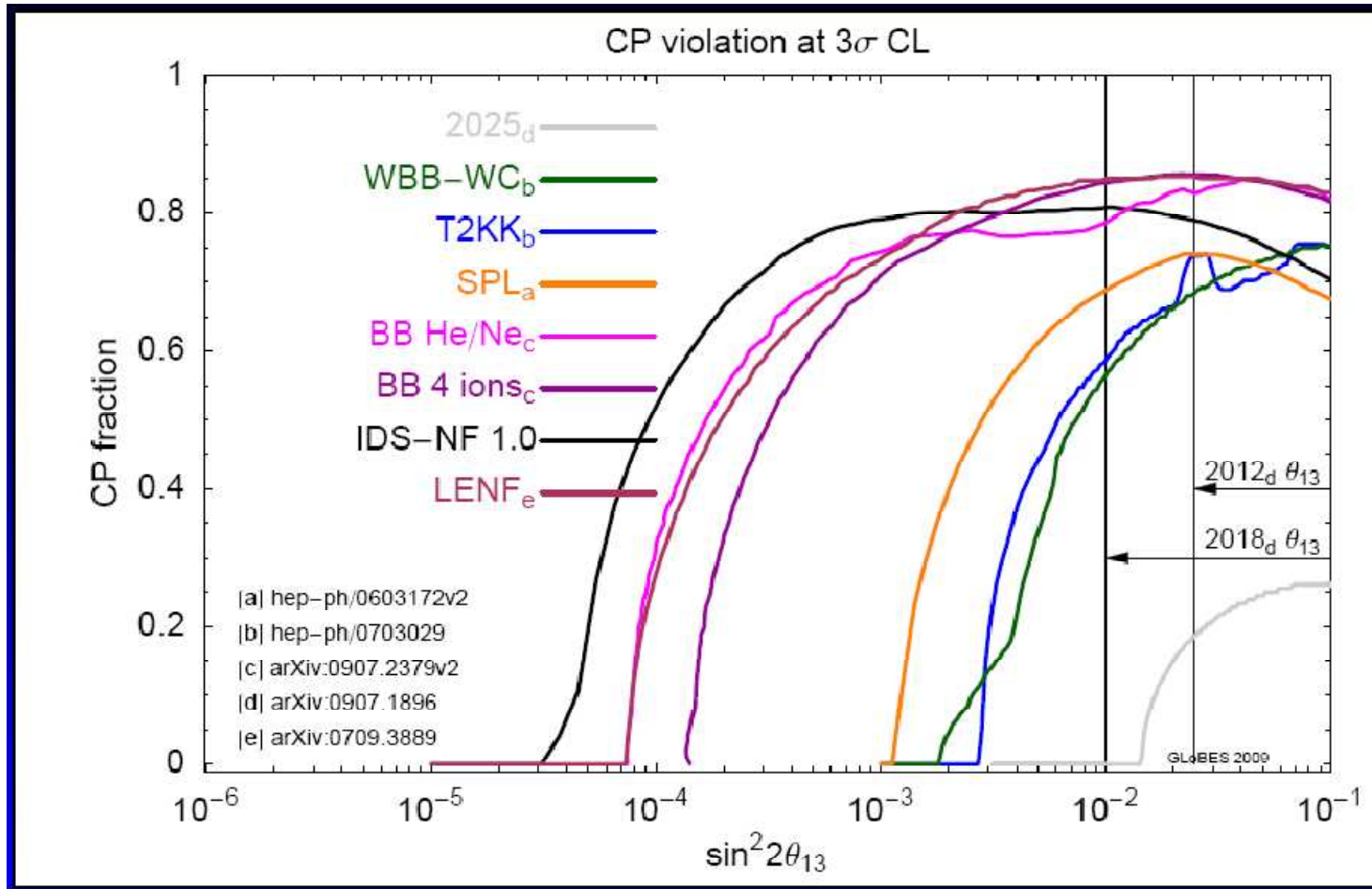


A. Bross, Fermilab

J. Pasternak

08.10.10, UW

Porównanie czułości z innymi projektami, P. Huber

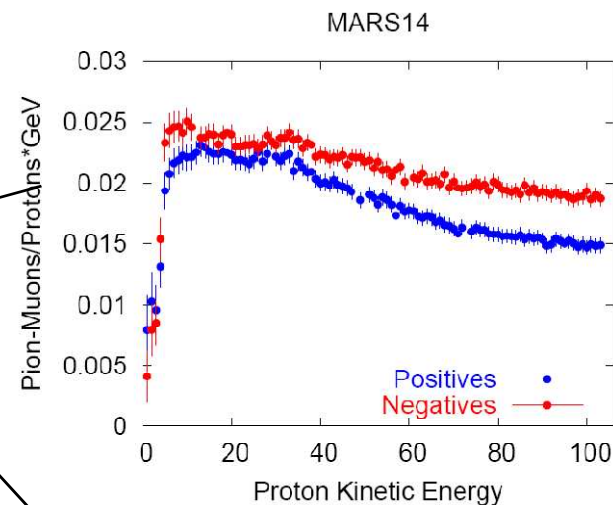


J. Pasternak

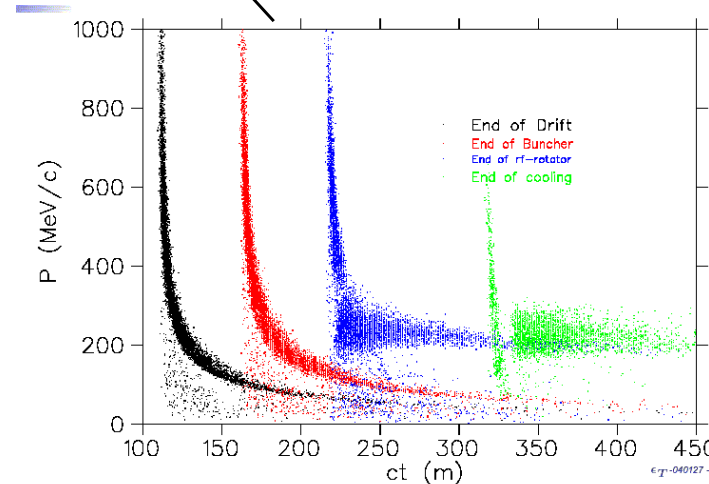
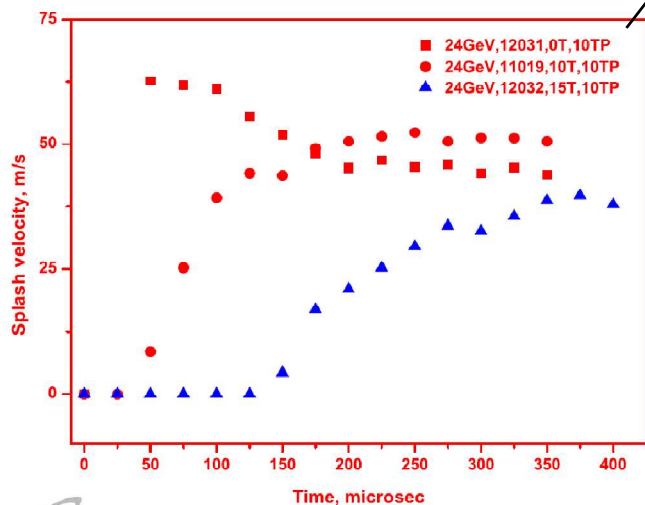
Akcelerator protonowy

Parameter	Value
Average beam power (MW)	1
Pulse repetition frequency (Hz)	50
Proton energy (GeV)	10 ± 5
Proton rms bunch length (ns)	2 ± 1
No. of proton bunches	3 or 5
Sequential extraction delay (μ s)	≥ 17
Pulse duration, liquid-Hg target (μ s)	≤ 40
Pulse duration, solid target (ms)	≥ 20

?



Mesons/Proton normalized to beam power

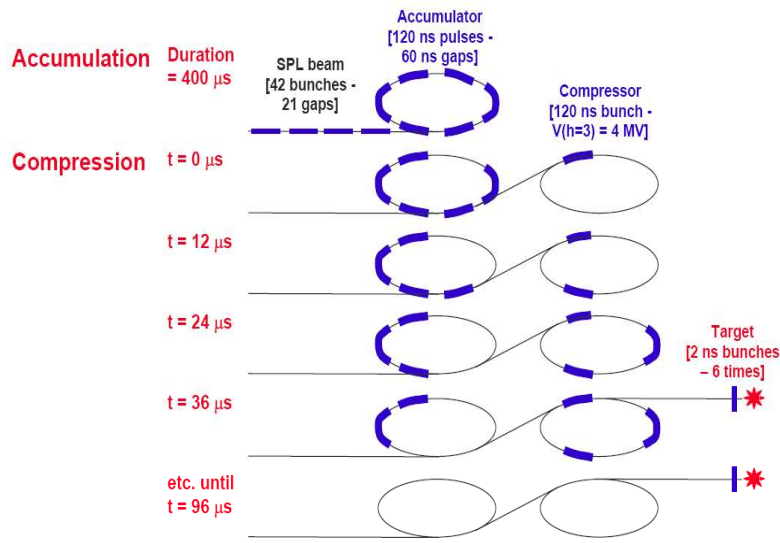


Przykład, akcelerator protonowy dla CERN-u (M. Aiba)



Scenario for accumulation and compression (2/13)

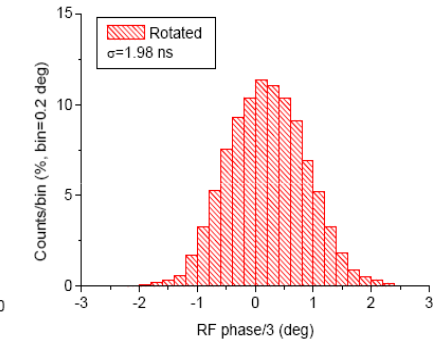
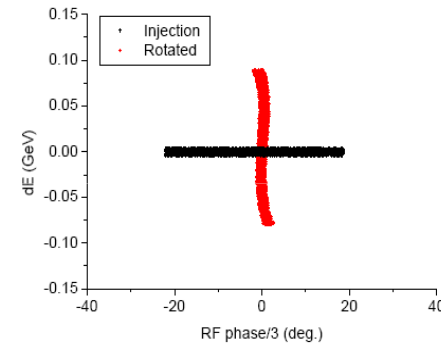
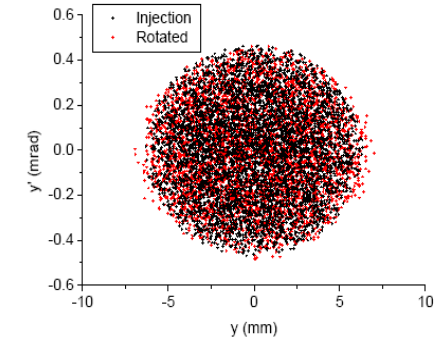
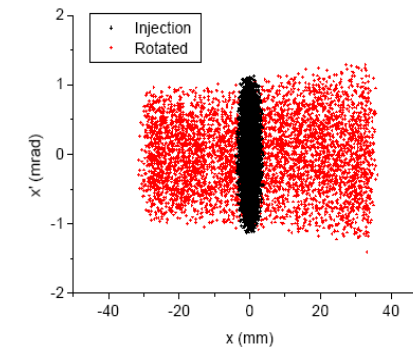
NuFact 06
August 24-30, 2006



R.G.

9

27/08/2006



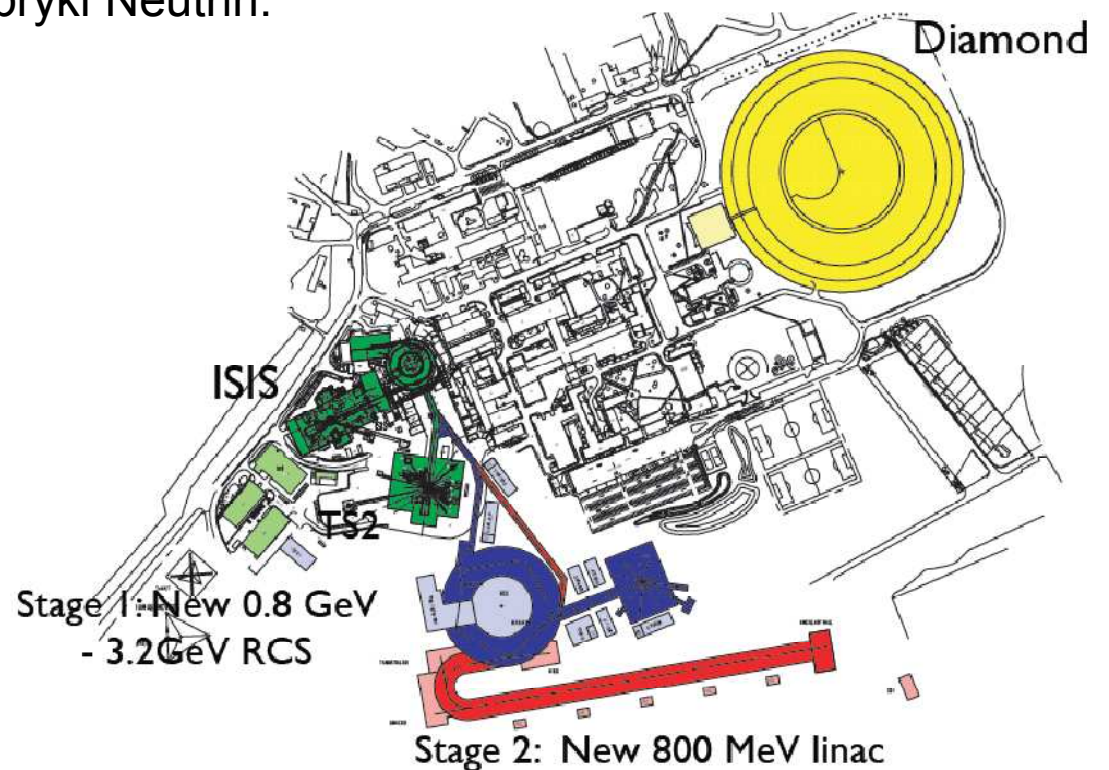
- Liniowy akcelerator jonów H⁻.
- Pierścień akumulacji protonów.
- Pierścień kompresji paczek.

J. Pasternak

08.10.10, UW

Akcelerator protonowy w RAL, UK

- W RAL pod Oxfordem istnieje akceleratorowe źródło neutronów przy synchrotronie ISIS (800 MeV, 50 Hz).
- Aktualna moc ~250 kW ale istnieje program zwiększenia mocy do 5 MW.
- Przy takiej mocy można pomyśleć o konstrukcji wspólnego akceleratora do produkcji neutronów i dla Fabryki Neutrin.

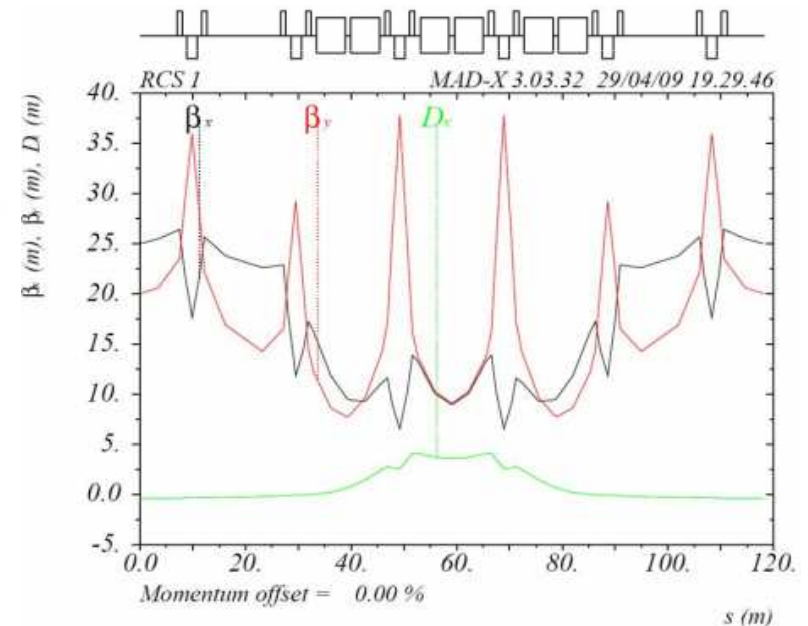
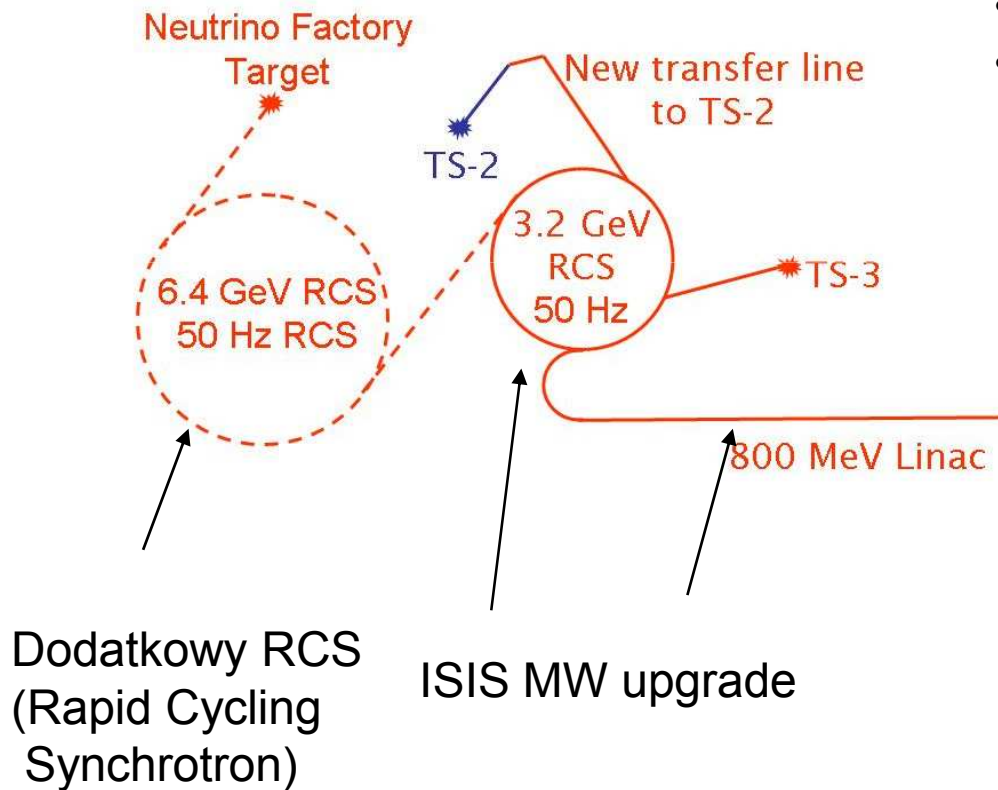


J. Pasternak

08.10.10, UW

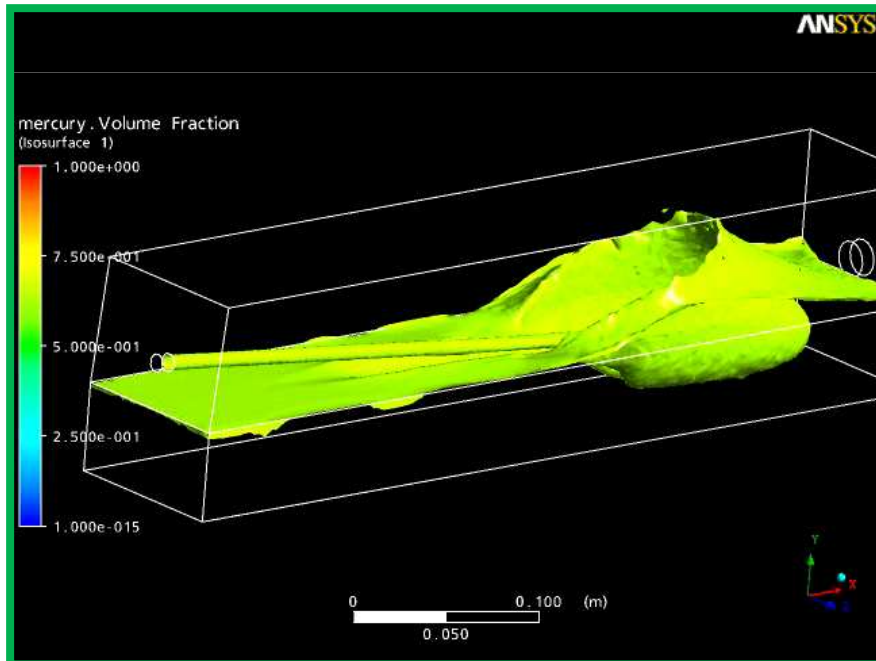
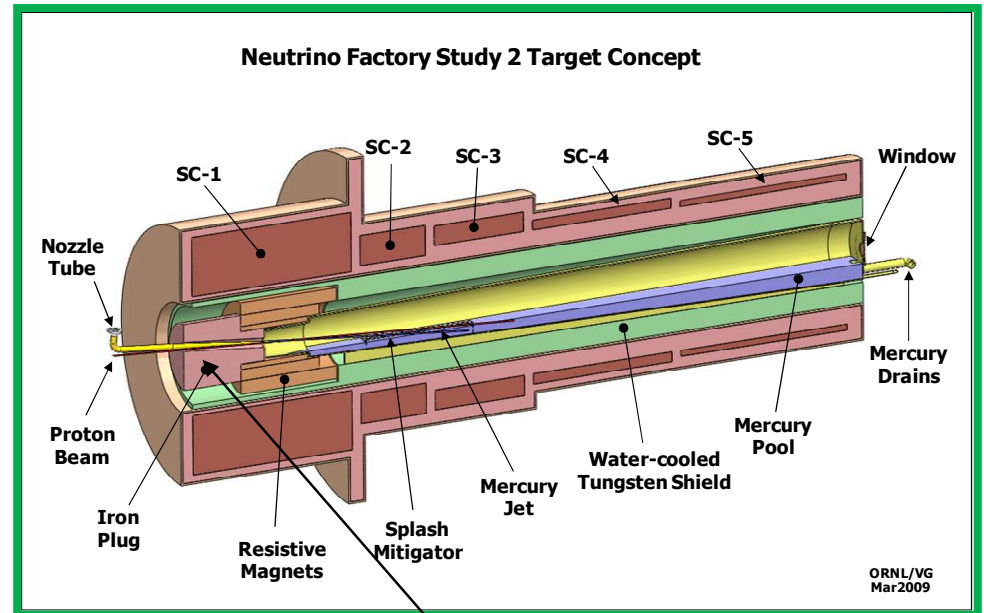
Wspólny Akcelerator Protonowy do produkcji neutronów i dla Fabryki Neutrin

- Bazuje na „nowej” ISIS z linakiem o energii 0.8 GeV i szybko cyklującym synchrotronie (RCS)- 3.2 GeV.
- Wymagany jest dodatkowy RCS.
- **Motywacja: źródło jonów, RFQ, chopper, linak, akumulacja protonów i przyspieszanie do 3.2 GeV są wspólne!**



Funkcje betatronowe dla projektowanego dodatkowego RCS

Tarcza Rtęciowa

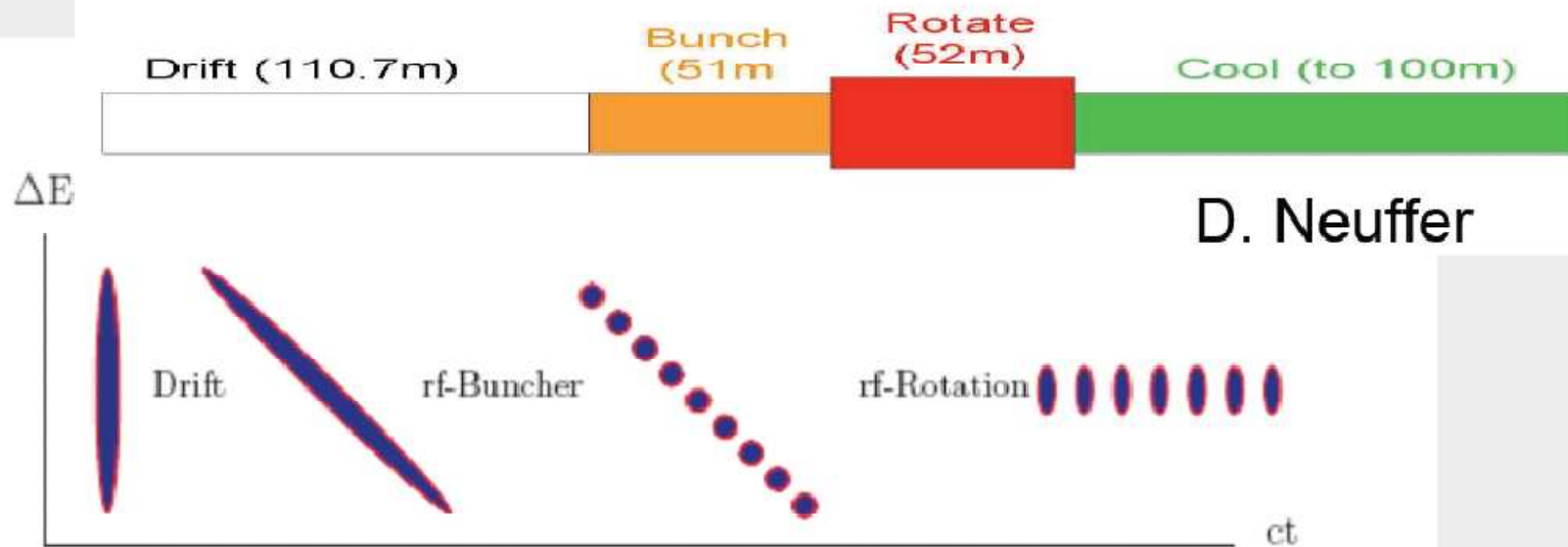


- Tarcza w postaci strumienia rtęci ze względu na olbrzymią moc wiązki (4 MW).
- Wysokie pole magnetyczne dla optymalizacji przechwytywania pionów.
- Basen rtęciowy jako hamulec wiązki i strumienia rtęci.

J. Pasternak

08.10.10, UW

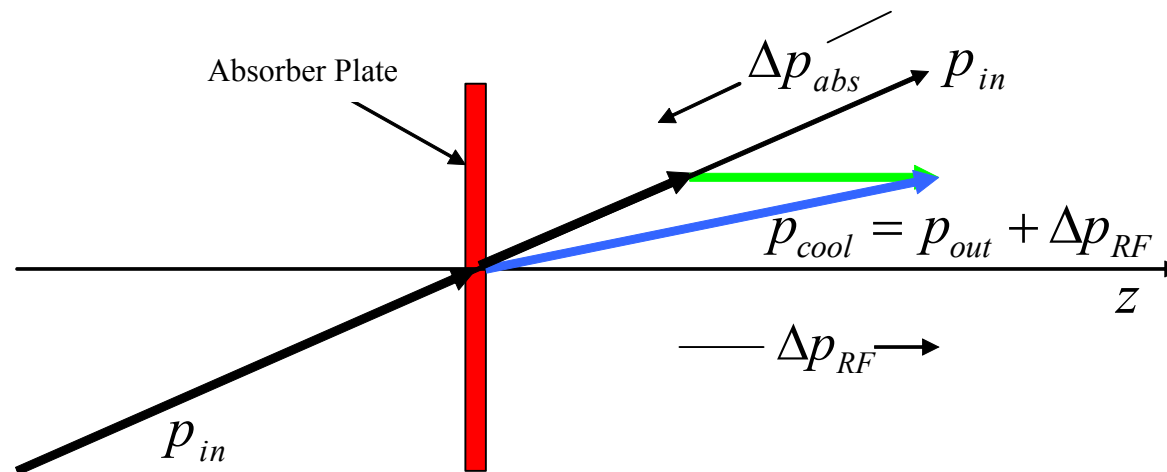
Front-End Mionowy



- Front end służy przygotowaniu wiązki do przyspieszania.
- Wiązka mionów jest podzielona na mniejsze paczki.
- Jej rozmycie energetyczne ulega zmniejszeniu.
- Emitancja wiązki (objętość w przestrzeni fazowej) ulega zmniejszeniu w chłodzeniu jonizacyjnym.

J. Pasternak

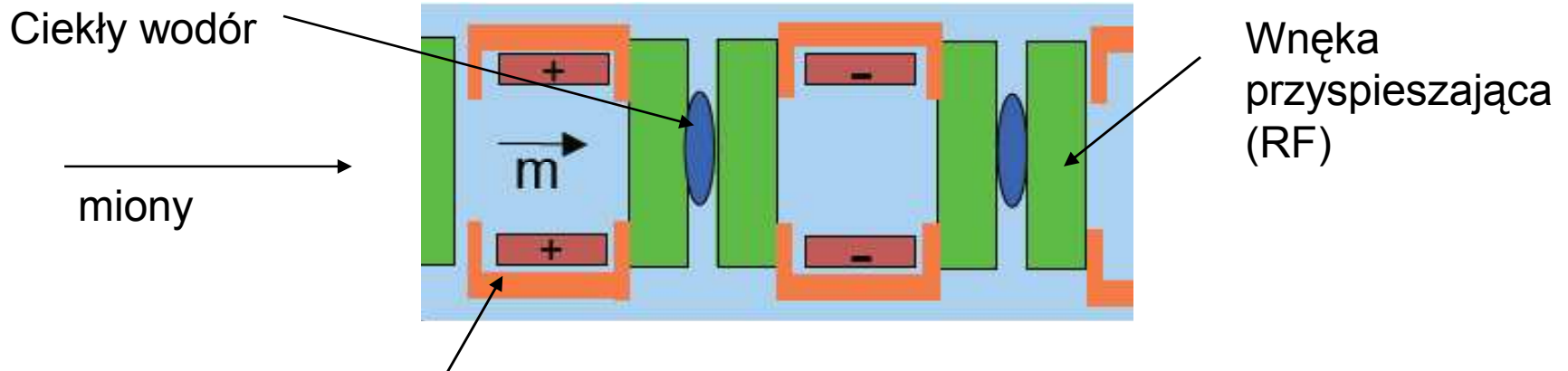
Podstawy chłodzenia jonizacyjnego



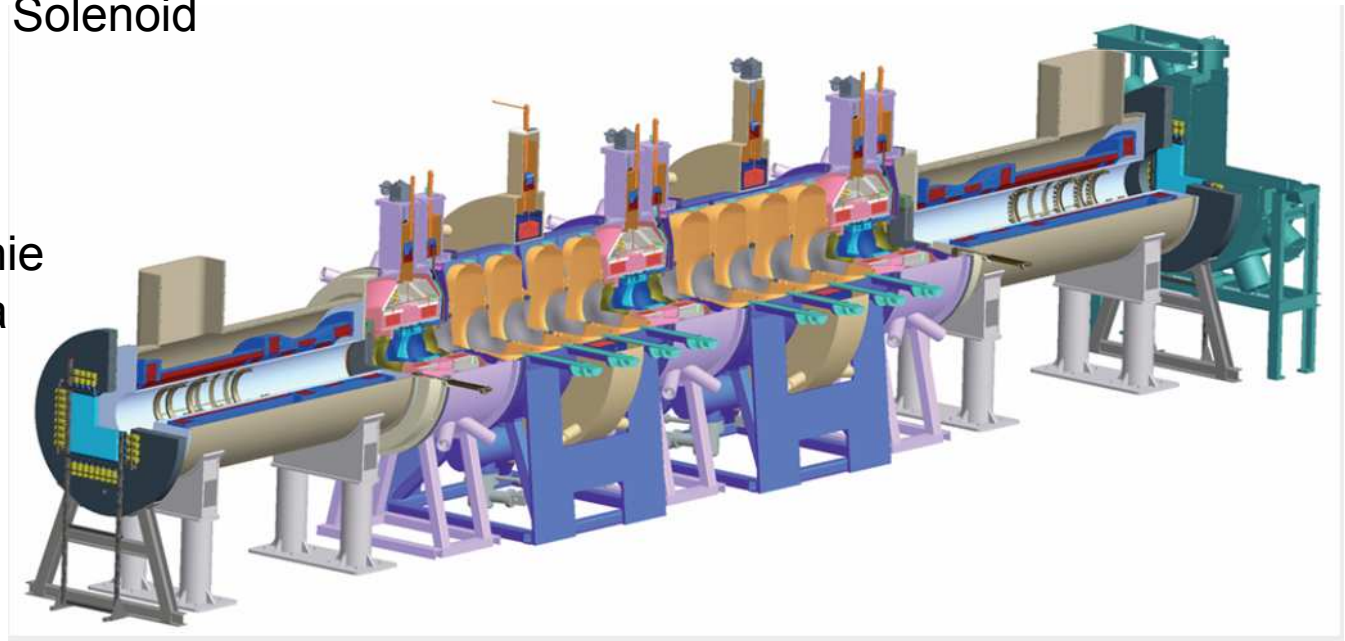
- Cząstka przechodzi kolejno przez absorber (ciekły wodór) i wnękę przyspieszającą (RF).
- Uzyskuje się efekt redukcji pędu poprzecznego.
- Ważne jest mocne skupianie (w polu magnetycznym solenoidów) oraz niskie Z absorberów.

J. Pasternak

Chłodzenia jonizacyjne mionów

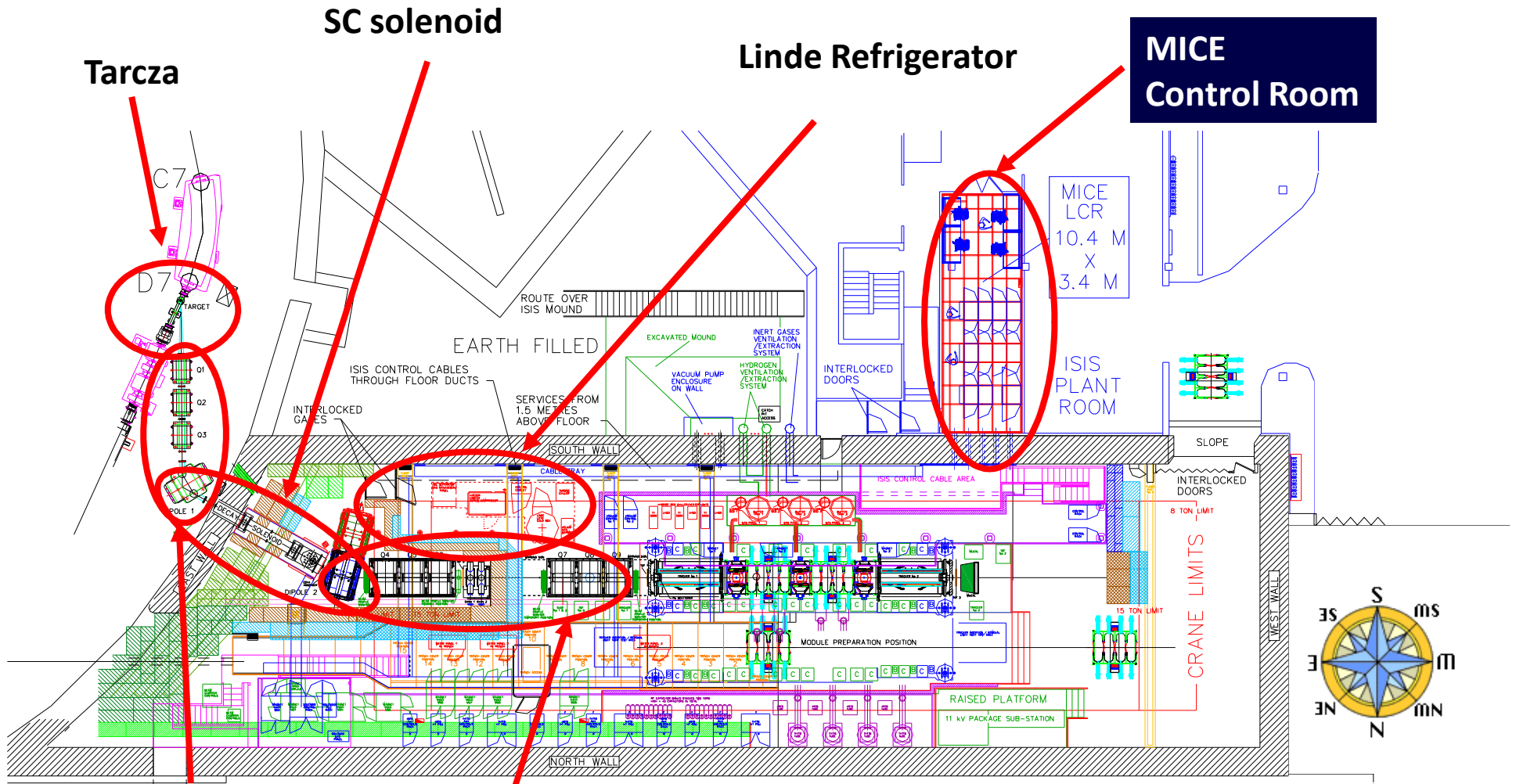


Eksperyment MICE ma na celu przetestowanie jonizacyjnego chłodzenia Mionów (RAL).



J. Pasternak

MICE



Tarcza

SC solenoid

Linde Refrigerator

MICE Control Room

Linia pionowa

Linia mionowa

J. Pasternak

Zainstalowane detektory:
Monitory profilu wiązki,
Trigger/rate scintillators
CKovA&B, TOF0,1&2, KL

08.10.10, UW

MICE – hala eksperymentalna

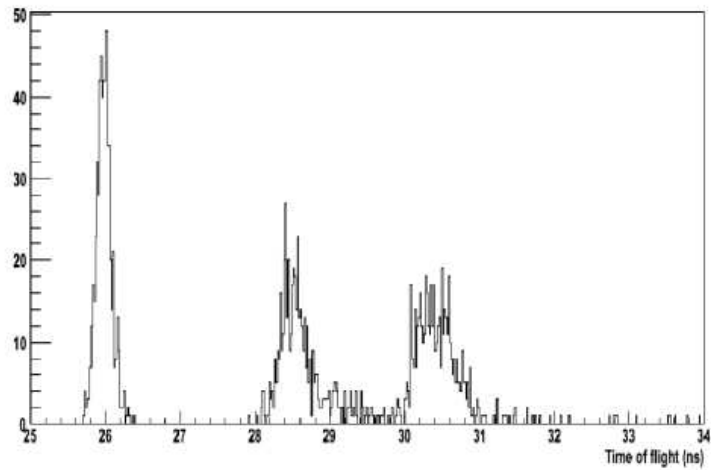
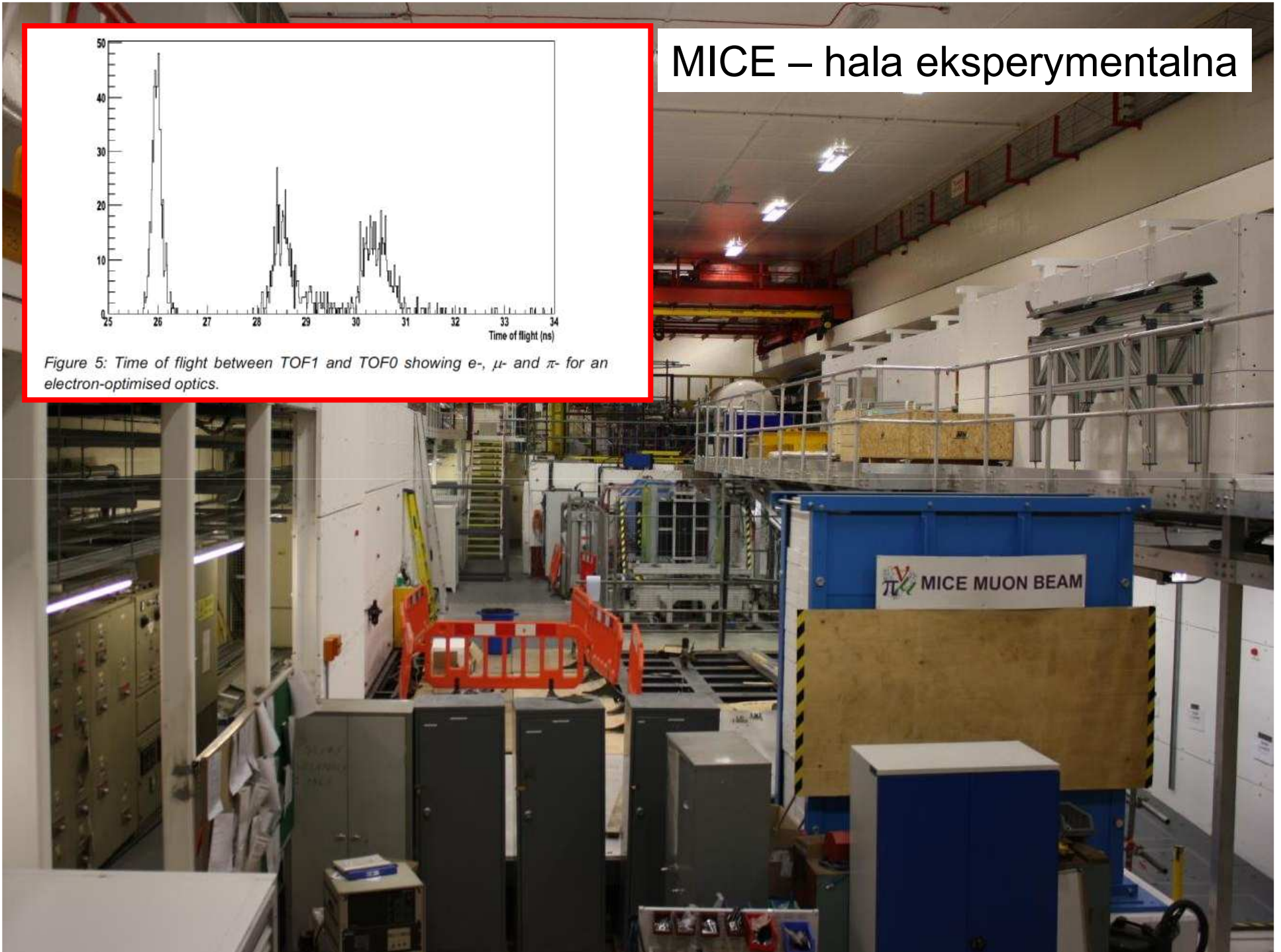
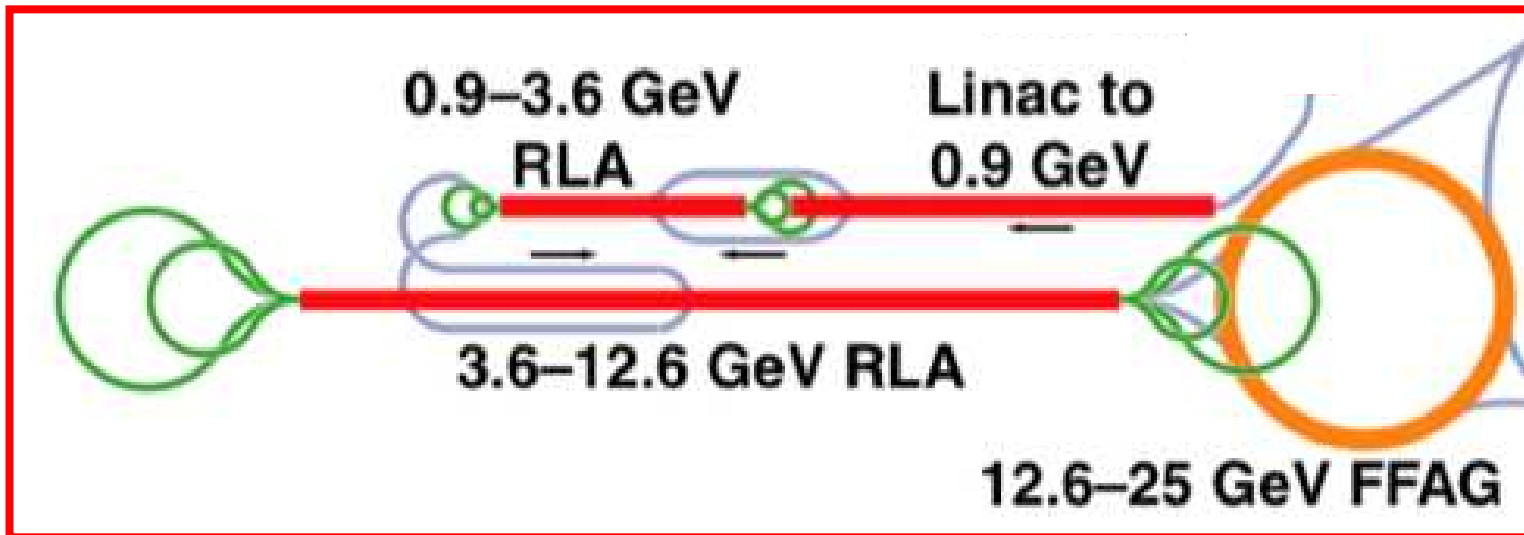


Figure 5: Time of flight between TOF1 and TOF0 showing e^- , μ^- and π^- for an electron-optimised optics.



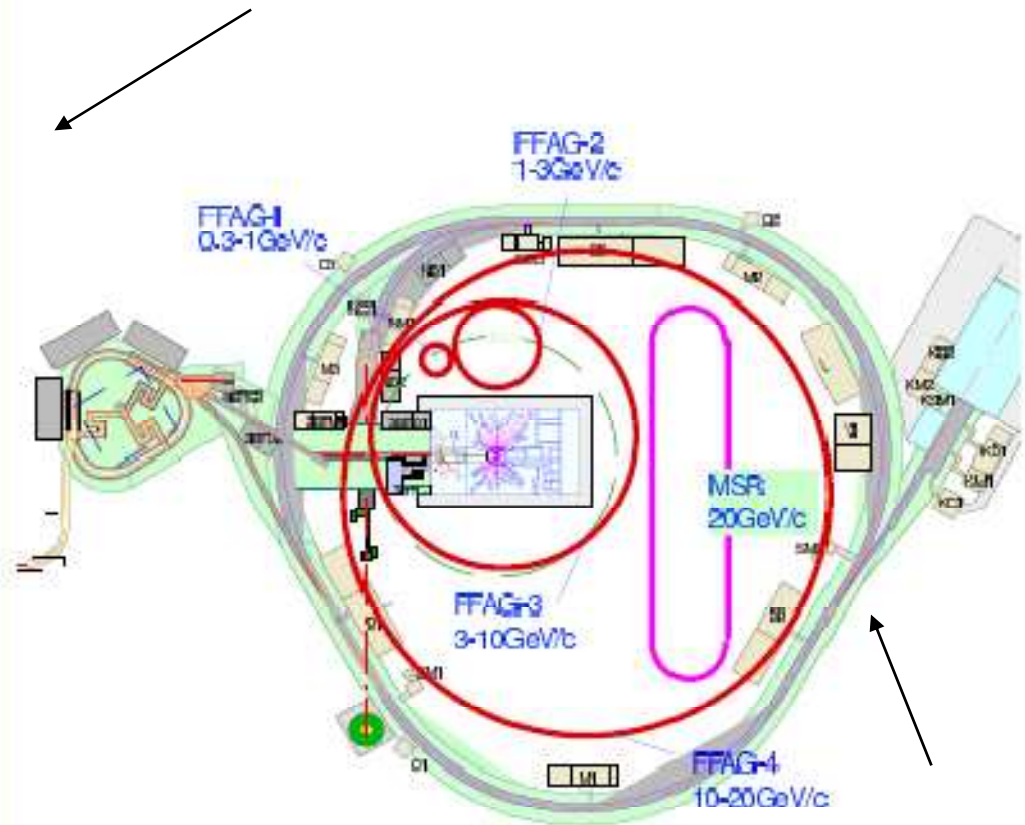
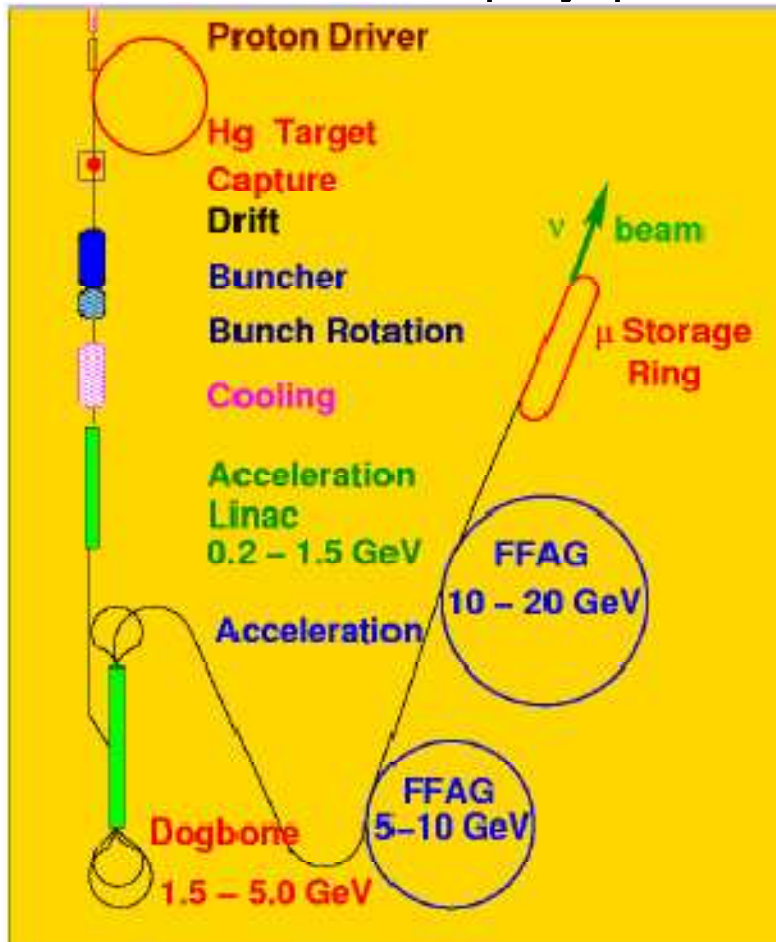
Przyspieszanie mionów

- Wymagana jest duża akceptancja i duży gradient przyspieszający ze względu na krótki czas życia mionów (2.2 us w spoczynku).
- Zaproponowany jest kompleks akceleratorów: linak, dwa RLA (Recirculating Linear Accelerator) oraz FFAG.



J. Pasternak

Akceleratory typu FFAG zaproponowano do przyspieszania mionów w Fabryce Neutrino
Amerykański projekt FN



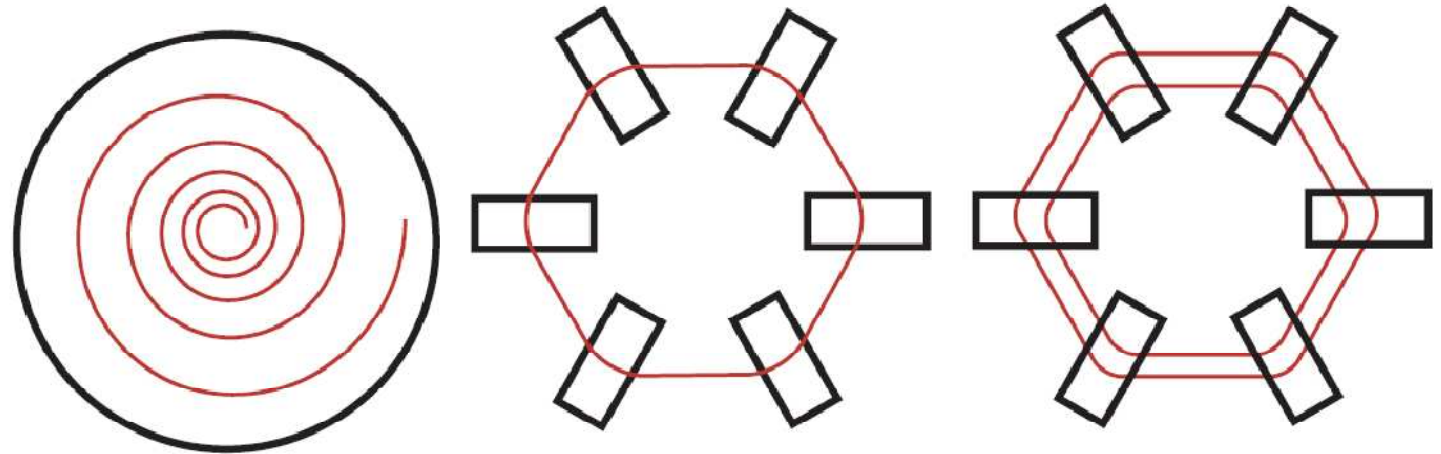
Japoński projekt FN

Przyspieszanie mionów dla Fabryki Neutrino (FN) w obecnych projektach zawiera akceleratory typu FFAG pracujące przy stałej częstotliwości RF.

J. Pasternak

08.10.10, UW

Definicja akceleratora typu FFAG – Fixed Field Alternating Gradient



Typ Akcelerator	Cyclotron	Synchrotron	FFAG
Pole magnetyczne	stałe	zmienne	stałe
Częstotliwość RF-u	stała	zmienna	zmienna (nie zawsze)
Orbita	zmienna	stała	zmienna

J. Pasternak

Definicja i klasyfikacja FFAG

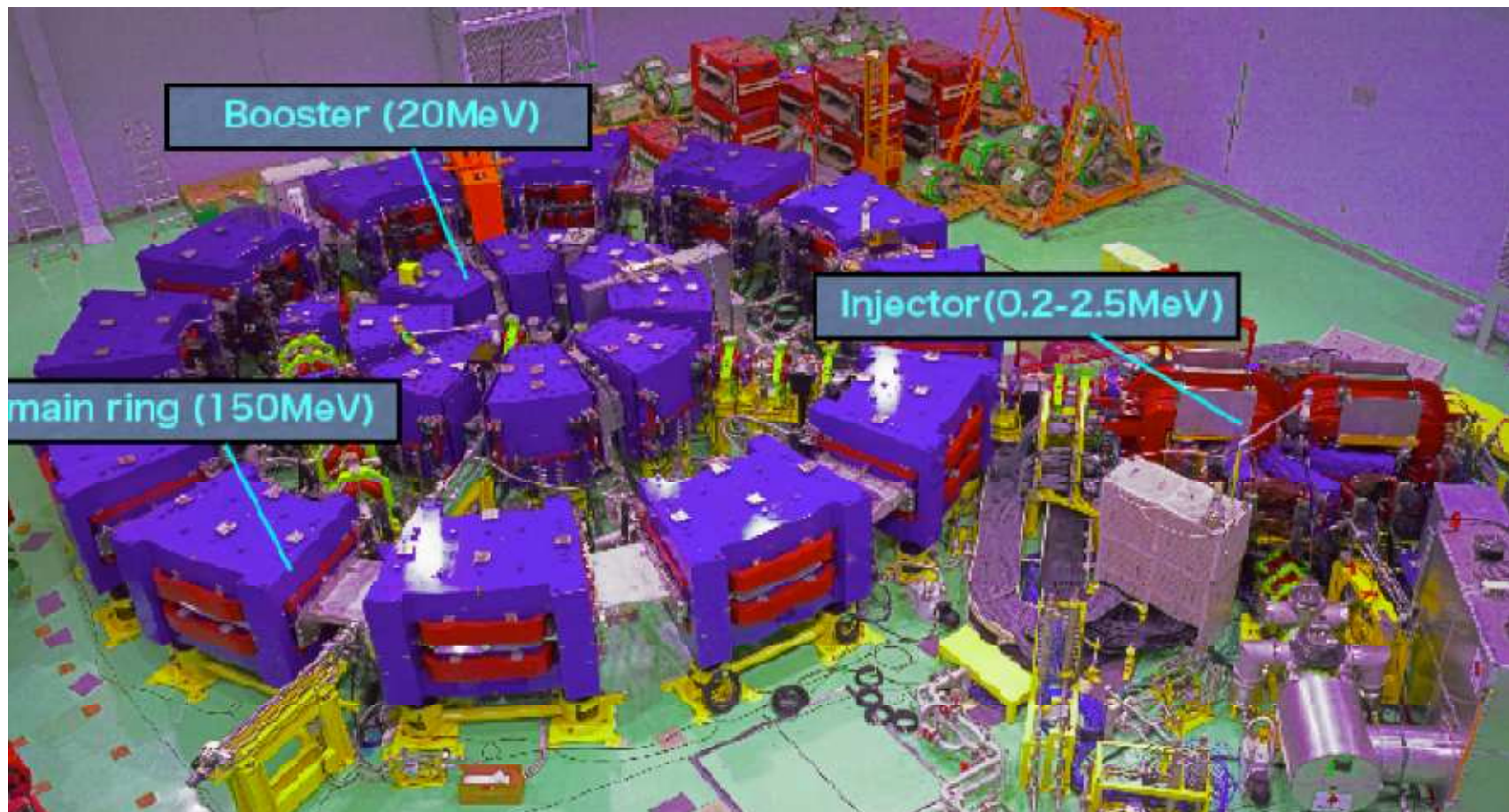
FFAG:

- Pierścień z siecią magnetyczną charakteryzującą się bardzo dużą akceptancją energetyczną, silnym skupianiem i małą dyspersją.
- Wygląda jak synchrotron (mała różnica między orbitą początkową i końcową).
- Częstość powtarzania bardzo duża (100 Hz – 1kHz) lub praca ciągła (jak cyklotron).
- Łatwy w obsłudze.
- Bardzo szybkie przyspieszanie.

Rodzaj FFAG	Skalujący (scaling)	Nieskalujący (nonscaling)
Pole magnetyczne	$B = B_0 \left(\frac{R}{R_0} \right)^k$	liniowe (nie zawsze)
Orbity	skalują się	nie skalują się
Dyspersja	mała	bardzo mała
Tune	stały (w praktyce prawie stały)	zmienia się z energią (nie zawsze)

J. Pasternak

Przykład akceleratorów FFAG, pierścienie w KURRI, Japonia

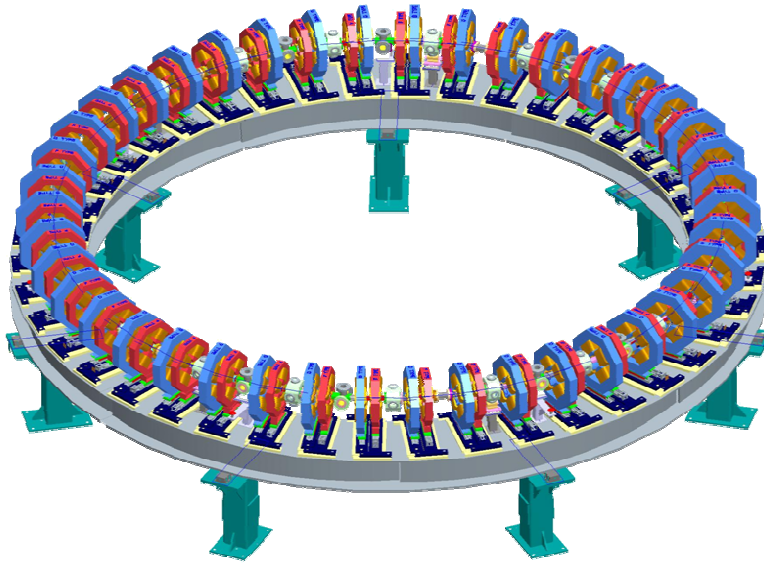


System 3 skalujących pierścieni FFAG zbudowanych w KURRI w celu badań nad systemami ADS. Obecnie w trakcie testów z wiązką.

J. Pasternak

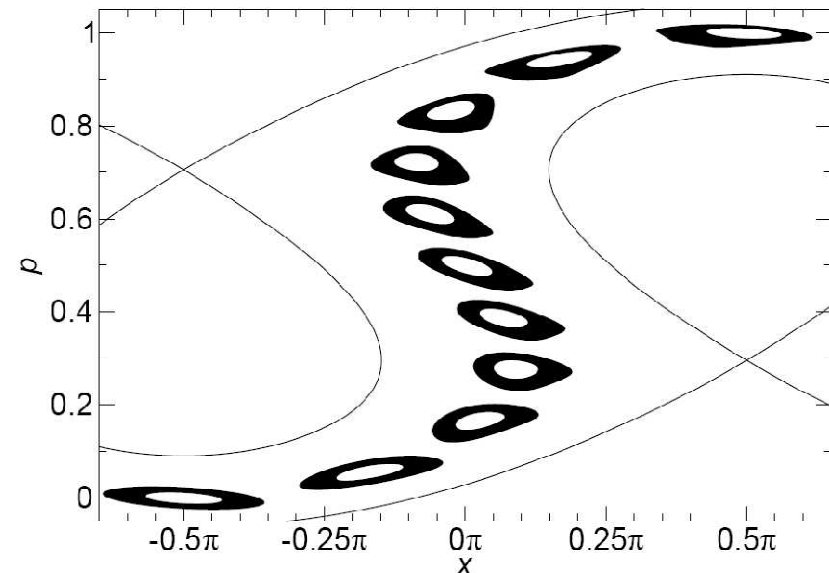
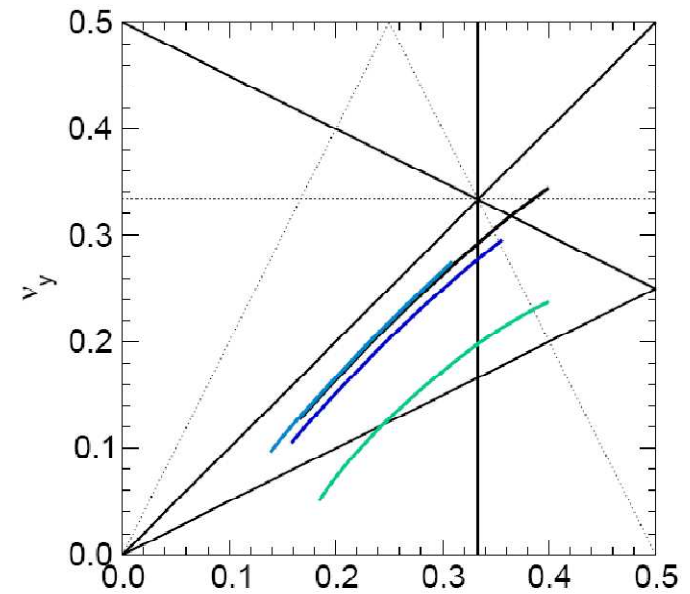
08.10.10, UW

EMMA (Electron Model for Many Applications)



EMMA – pierwszy pierścień nieskalujący:

- Model akceleratora mionów dla Fabryki Neutrin.
- Doświadczalna demonstracja nowego rodzaju przyspieszania (10 –20 MeV).
- Doświadczenia nad szybkim przekraczaniem rezonansów.
- Realizowany w Daresbury przy ALICE.



J. Pasternak

Motywacja dla nieskalującego FFAG jako akceleratora mionów

- Quasi-isochronous – czas przelotu cząstki prawie nie zależy od energii.
- Liniowe pola magnetyczne – duża akceptancja dynamiczna i proste magnesy.
- Mała dyspersja – niski koszt.

Główny problem:

- Wprowadzanie/wyprowadzanie wiązki.

Aktualne parametry FFAG

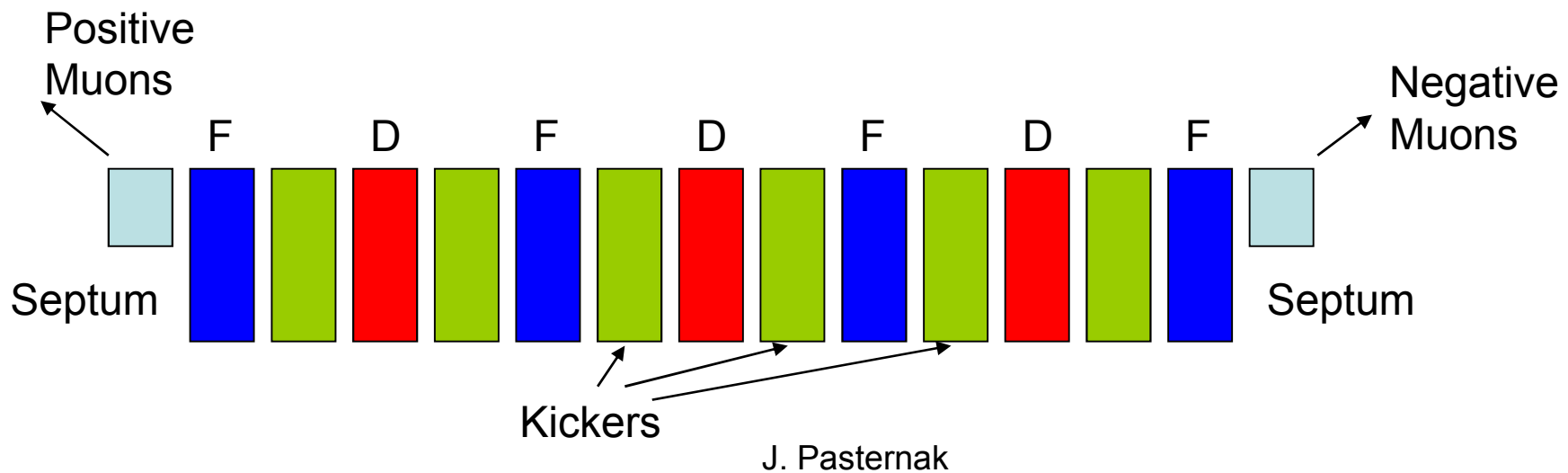
TABLE III. Lattices with cell periods of a half integer number of RF periods.

	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
Long Drift (m)	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
Cells	60	60	64	64	64
D length (m)	1.903800	1.803061	2.214080	2.095687	2.251117
D angle (mrad)	158.881	161.152	152.826	155.343	156.837
D shift (mm)	36.435	35.699	39.256	38.593	41.003
D field (T)	5.02885	5.37290	4.17163	4.46908	4.20784
D gradient (T/m)	-17.75656	-19.69323	-13.83029	-15.25379	-13.55592
F length (m)	1.143172	0.943586	1.232769	1.042002	1.086572
F angle (mrad)	-27.081	-28.216	-27.326	-28.584	-29.331
F shift (mm)	9.700	10.676	11.848	12.773	13.907
F field (T)	-1.24996	-1.55950	-1.15531	-1.41881	-1.39381
F gradient (T/m)	19.22556	24.47768	16.01219	19.75387	18.04570
Cavity cells	88	88	96	96	96
RF voltage (MV)	1090.503	1050.061	1175.028	1144.173	1213.861
turns	12.9	13.4	12.0	12.3	11.6
D radius (mm)	115	117	127	129	137
D max field (T)	7.1	7.7	5.9	6.4	6.1
F radius (mm)	153	145	162	155	163
F max field (T)	4.2	5.1	3.7	4.5	4.3
Circumference (m)	492	492	620	620	667
Decay (%)	5.5	5.7	6.4	6.6	6.7
Cost (A.U.)	167	175	181	188	193

Wprowadzanie/wyprowadzanie wiązki

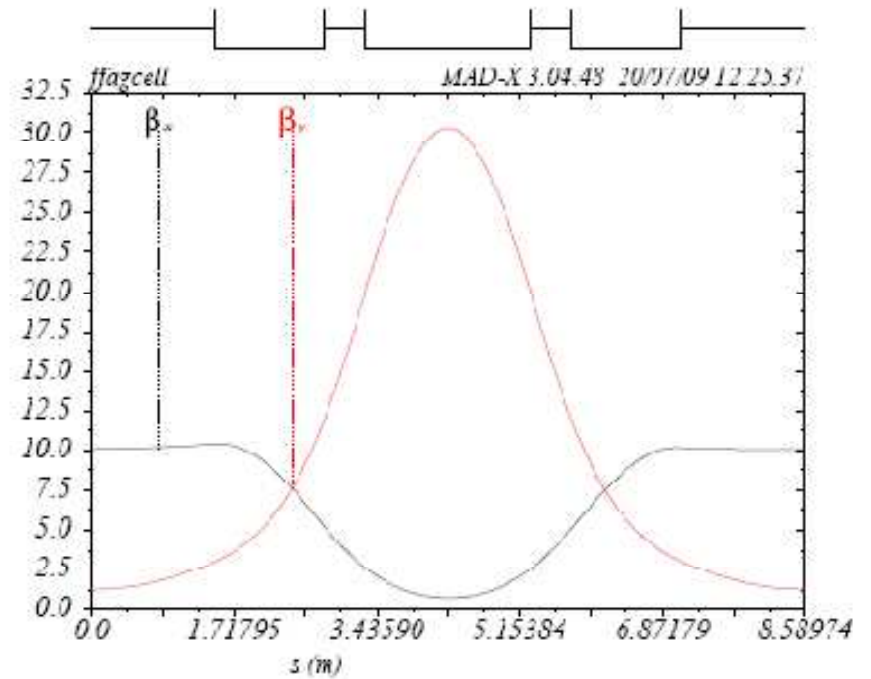
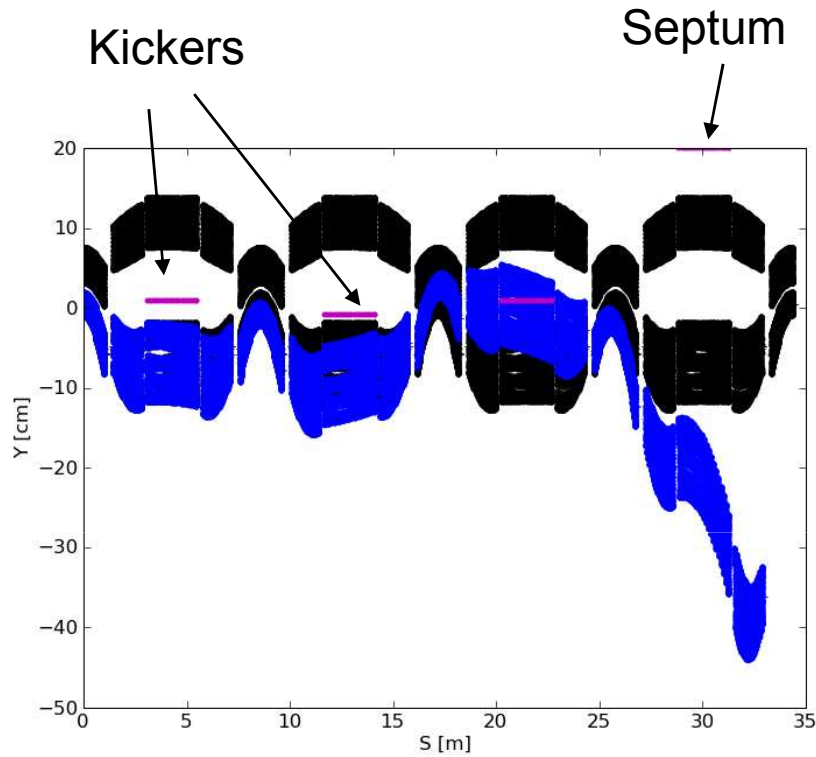
Założenia:

- Ponieważ wiązka jest duża i ma 12.6/ 25 GeV potrzebnych jest wiele kickerów.
- Stosując symetryczną geometrię można użyć tych samych kickerów dla obu znaków mionów .



08.10.10, UW

Wprowadzanie wiązki - Triplet



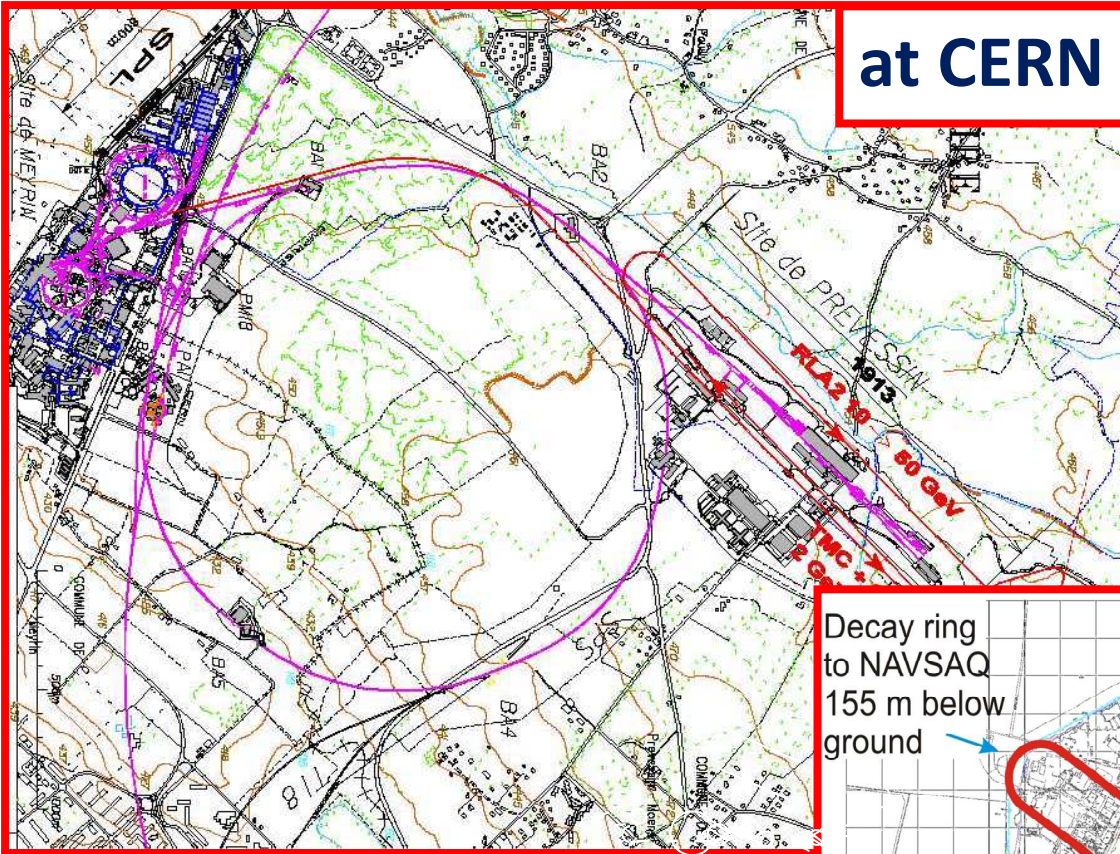
- Potrzebne są 3 kickery o długości 2.4 m i polu 0.0855 T oraz septum o długości 2.4 m i 2 T.

J. Pasternak

08.10.10, UW

Perspektywy na przyszłość

at CERN



Decay ring
to NAVSAQ
155 m below
ground

Decay ring
to INO
440 m below
ground

RLA1
muon linac
RLA2

Ts3

bunching
phase rotation
cooling

NF-TS

6-10 GeV
proton RCS

ISIS upgrade
Phase 1
Phase 2

at RAL

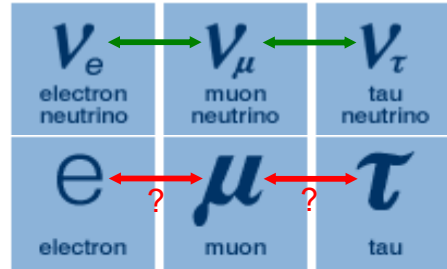
Fabryka Neutrin@ Fermilab, K. Gollwitzer



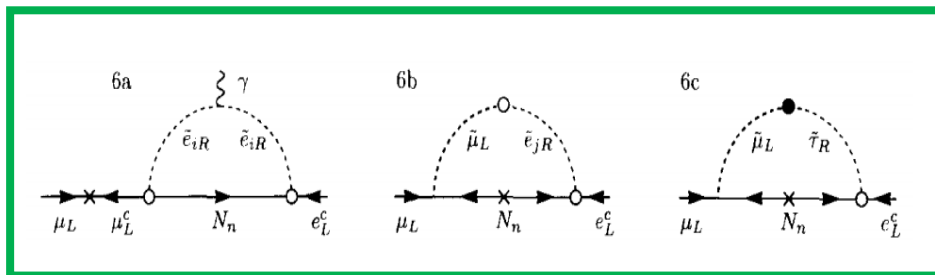
J. Pasternak

08.10.10, UW

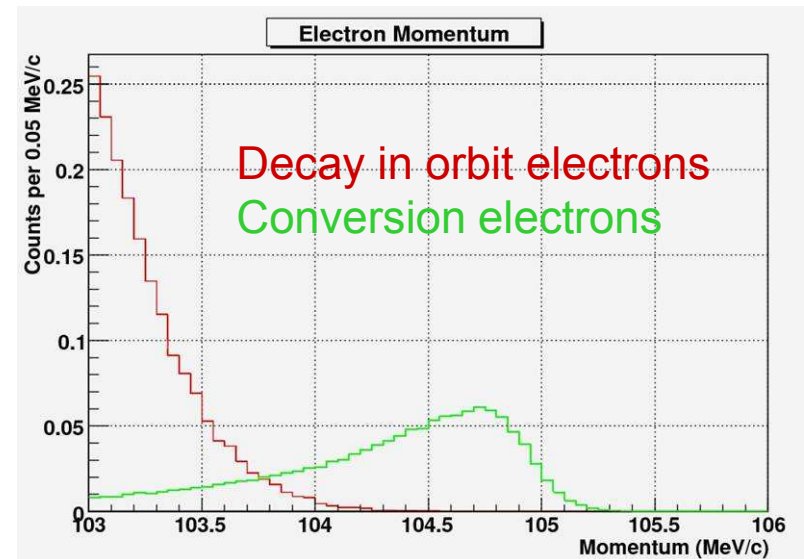
Poszukiwanie łamania liczby leptonowej w sektorze naładowanych leptonów:



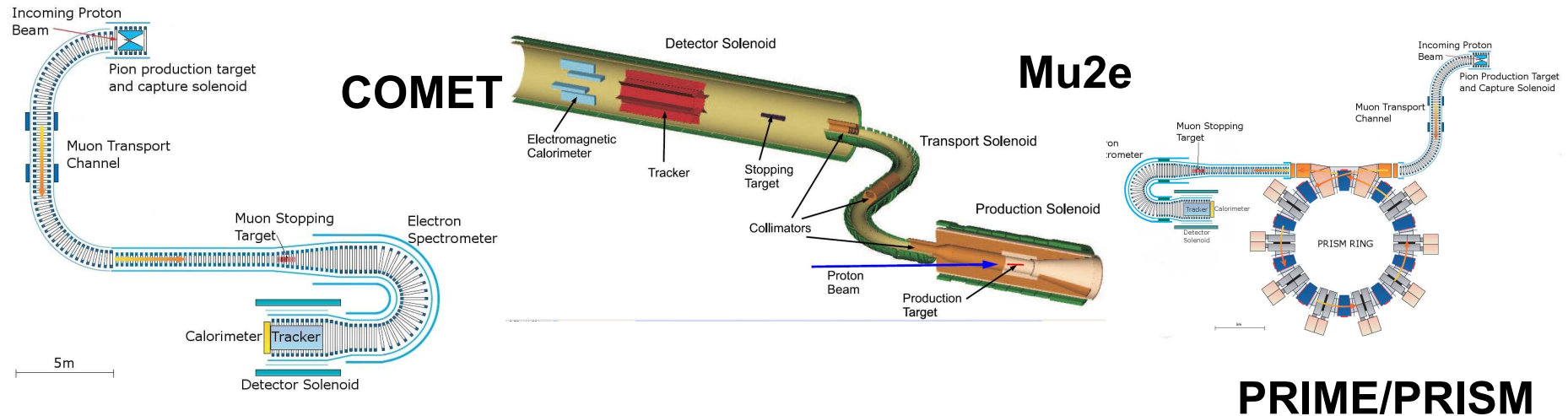
- Ponieważ łamanie liczby leptonowej dla naładowanych leptonów (cLFV) jest silnie tłumione w Modelu Standardowym, jego wykrycie byłoby sygnałem Nowej Fizyki!
- Poszukiwania te są komplementarne do LHC.
- Proces $\mu^- + N(A,Z) \rightarrow e^- + N(A,Z)$ wydaje się najlepszy dla poszukiwana cLFV.
- Tło jest zdominowane przez wiązkę, którą można udoskonalić.



To ważny test dla modeli supersymetrycznych!



Poszukiwanie konwersji mionu w elektron



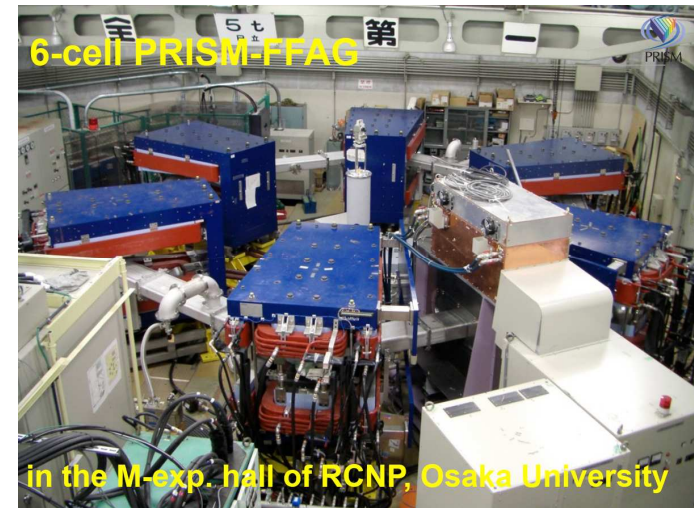
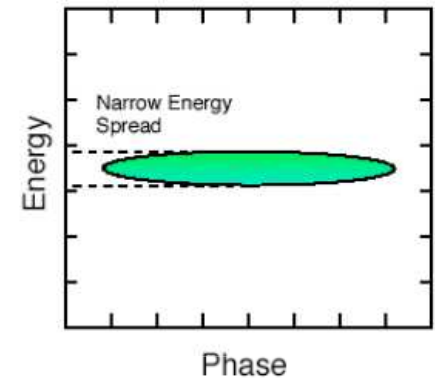
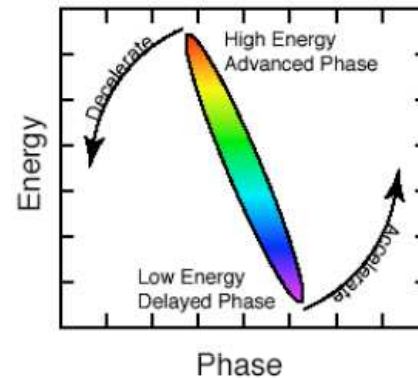
- The COherent Muon to Electron Transition (COMET) jest planowany w J-PARC, Japonia.
- Mu2e jest planowany w Fermilabie
- The Phase Rotated Intense Slow Muon (PRISM) osiągnie 100-u krotnie lepszą czułość i może być następną fazą eksperymentu COMET.

J. Pasternak

08.10.10, UW

PRISM- motywacja

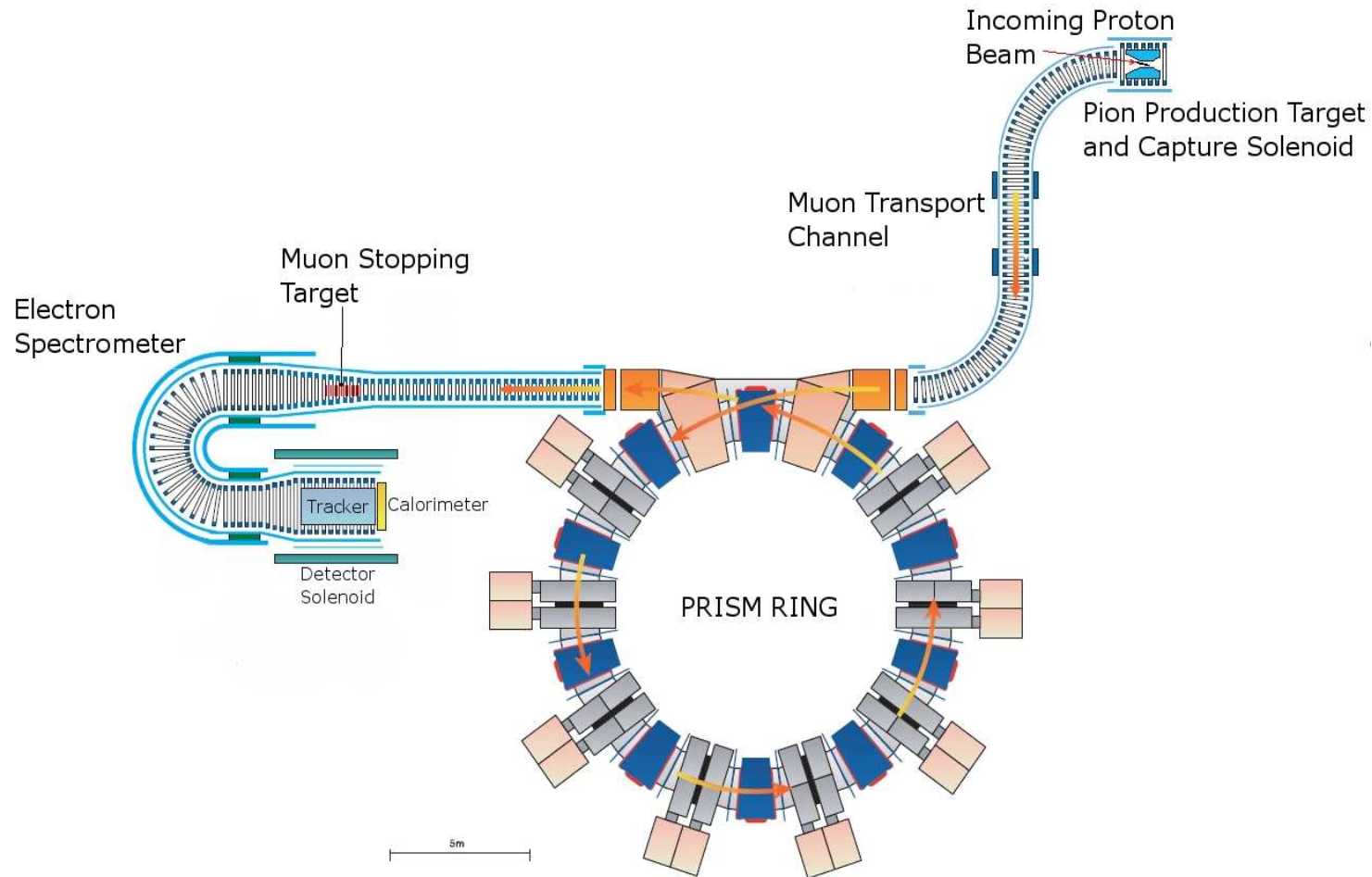
- Dzięki obrotowi fazy RF w pierścieniu PRISM uzyskuje się wiązkę mionową o małym rozmyciu pędowym.
- Ring działa również jako filtr i „czyści” wiązkę z zanieczyszczeń (pionów, antyprotonów etc).
- Istnieje projekt pierścienia PRISM i pierścień testowy został skonstruowany w Osace (Y. Kuno, A. Sato).
- Obrót fazy został przetestowany z użyciem cząstek alfa.



J. Pasternak

08.10.10, UW

PRISM-PRIME –geometria eksperymentu



J. Pasternak

08.10.10, UW

PRISM Task Force

Celem jest rozwiązanie problemów technologicznych na drodze do eksperymentu poszukiwanie konwersji mionu w elektron z użyciem pierścienia FFAG oraz R&D dla Fabryki Neutrin i fizyki mionów.

Badania obejmują:

- Fizykę mionów,
- Akceleratory protonowe,
- Linie transportu pionów/mionów,
- wprowadzanie/wyprowadzanie wiązki z pierścienia PRISM,
- alternatywny projekt pierścienia FFAG,
- Studia nad systemami FFAG (RF, kickery etc).

J. Pasternak

08.10.10, UW

PRISM Task Force

**J. Pasternak, Imperial College London, UK/RAL STFC, UK
(contact: j.pasternak@imperial.ac.uk)**

**L. J. Jenner, A. Kurup, Imperial College London, UK/Fermilab,
USA**

**M. Aslaninejad, Y. Uchida, Imperial College London, UK
B. Muratori, S. L. Smith, Cockcroft Institute, Warrington,
UK/STFC-DL-ASTeC, Warrington, UK**

**K. M. Hock, Cockcroft Institute, Warrington, UK/University of
Liverpool, UK**

**R. J. Barlow, Cockcroft Institute, Warrington, UK/University of
Manchester, UK**

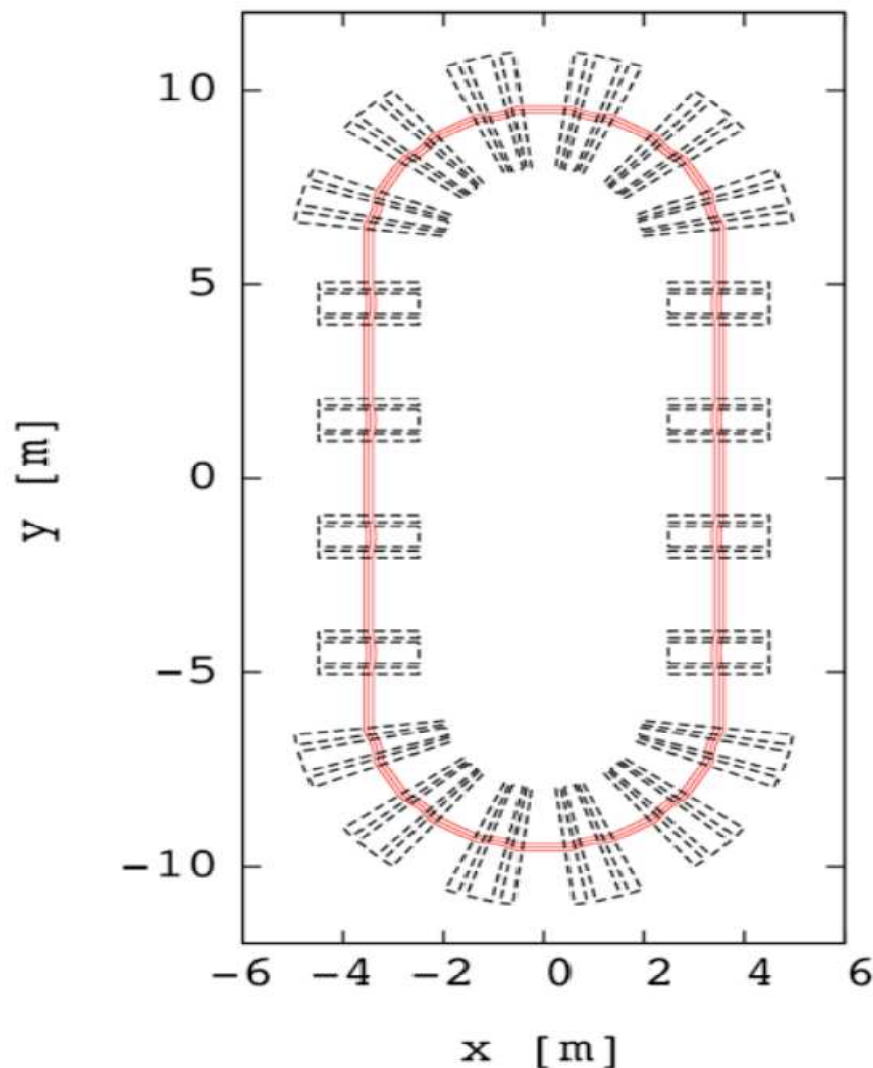
**C. Ohmori, KEK/JAEA, Ibaraki-ken, Japan
H. Witte, T. Yokoi, JAI, Oxford University, UK**

**J-B. Lagrange, Y. Mori, Kyoto University, KURRI, Osaka, Japan
Y. Kuno, A. Sato, Osaka University, Osaka, Japan**

**D. Kelliher, S. Machida, C. Prior, STFC-RAL-ASTeC, Harwell, UK
M. Lancaster, UCL, London, UK**

J. Pasternak

Nowy projekt pierścienia PRISM- zaawansowane FFAG (J-B. Lagrange et al.)



PRISM LATTICE

Bending cell

k 6.5

Average radius 3.5 m

Phase advances:

horizontal μ_x 90 deg.

vertical μ_z 90 deg.

Dispersion 0.47 m

Straight cell

n/ρ 2.14 m^{-1}

Length 3 m

Phase advances:

horizontal μ_x 24 deg.

vertical μ_z 87 deg.

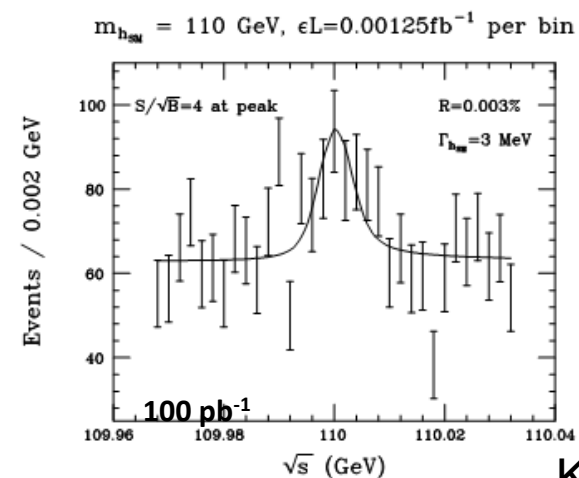
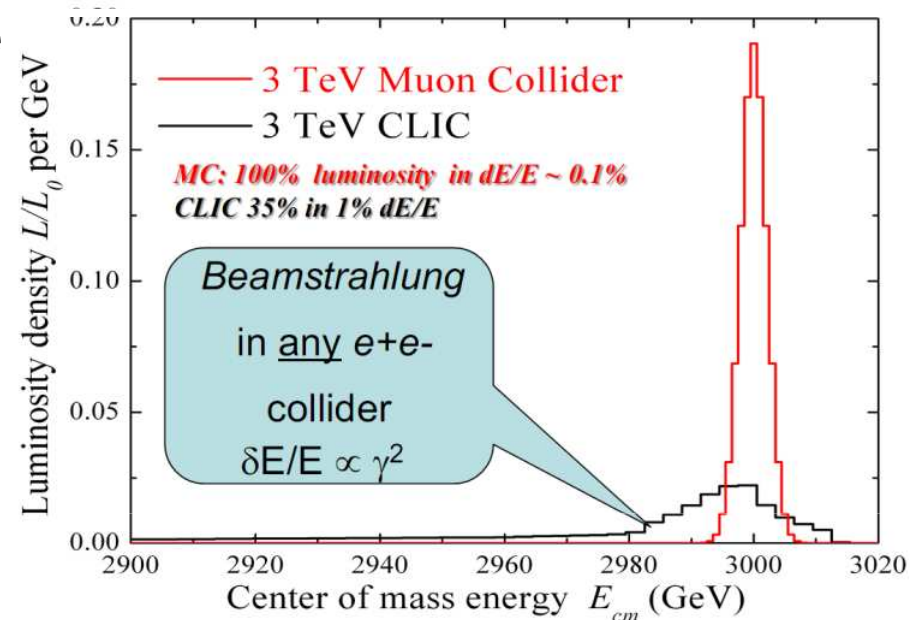
J. Pasternak

08.10.10, UW

Motywacja dla zderzacza mionów

- Masa mionu: $106 \text{ MeV}/c^2$
- Zanedbywalne promieniowanie synchrotronowe ($\propto m^4$).
- Umożliwia to skonstruowanie pierścieni mionowych do przyspieszania oraz jako zderzacza.
- Umożliwia uzyskanie wysokiej świetlności!
- Miony potencjalnie mają duże sprzężenie do Higgsa!
- Problem: chłodzenie mionów!

Masa elektronu: $0.511 \text{ MeV}/c^2$



J. Pasternak

K. Long

Badania nad chłodzeniem mionów dla zderzacza mionów

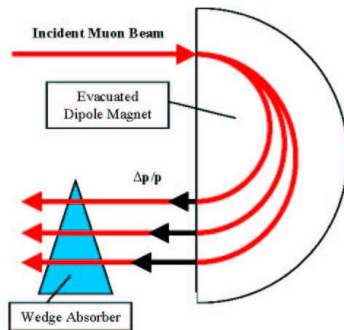


Figure 1. Use of a Wedge Absorber for Emittance Exchange

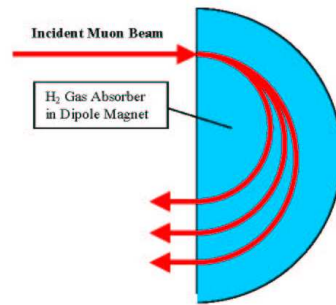
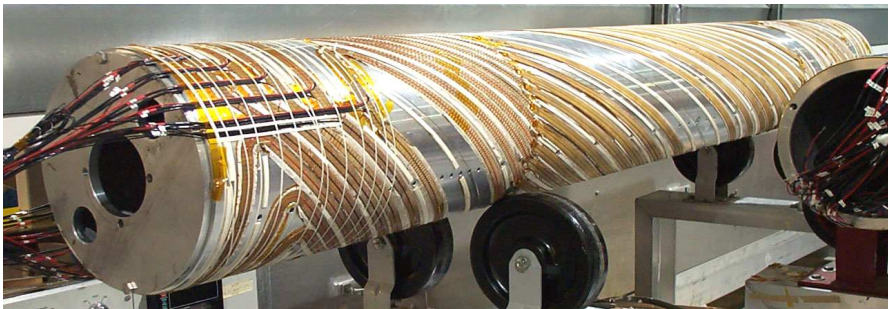
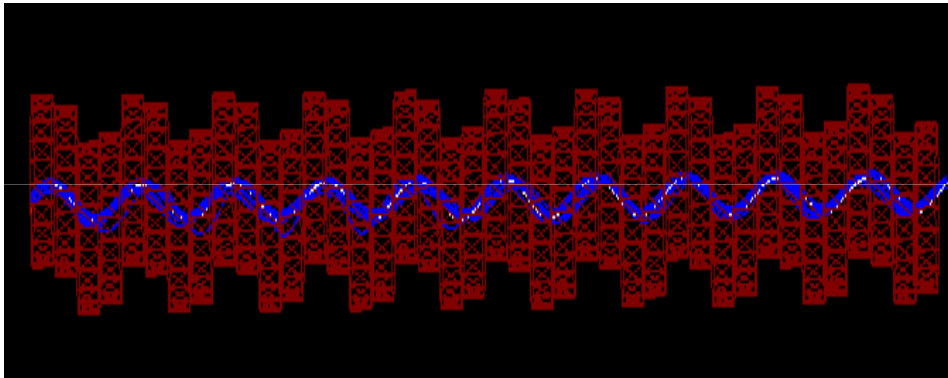


Figure 2. Use of Continuous Gaseous Absorber for Emittance Exchange

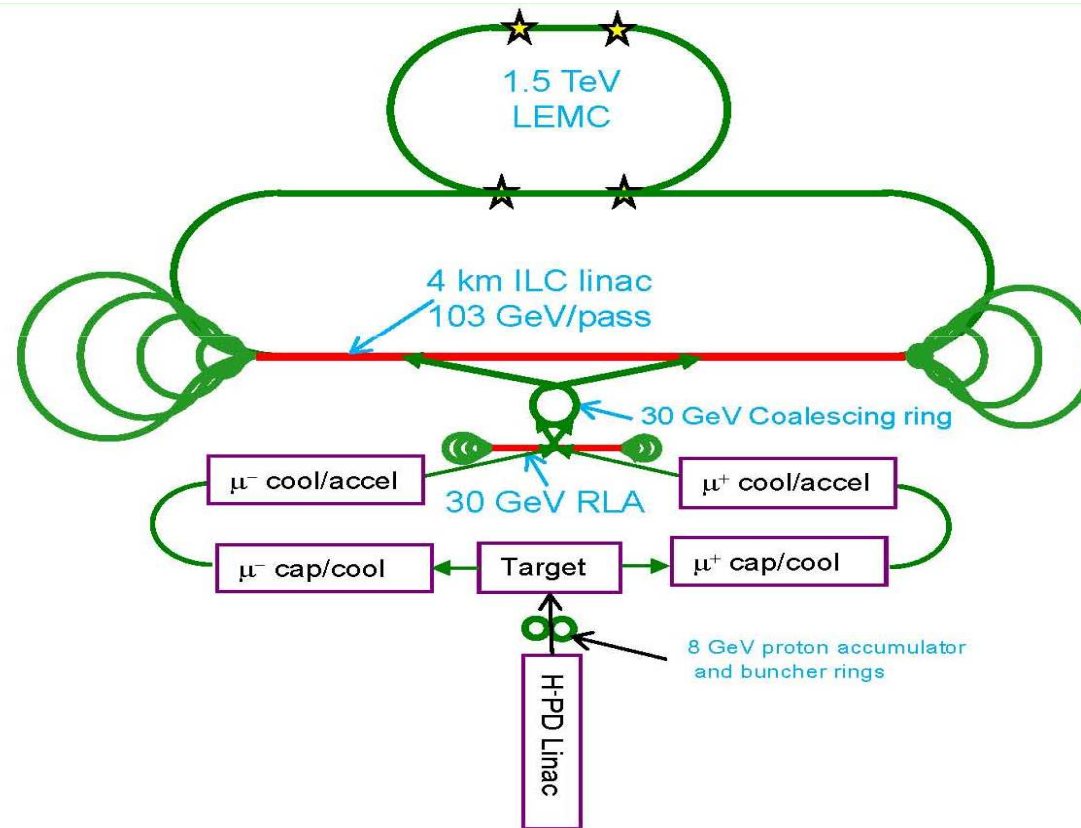


- Chłodzenie mionów w Fabryce Neutrino jest dalece niewystarczające dla Zderzacza Mionów.
- Potrzebne jest 6 wymiarowe chłodzenie!
- Potrzebny jest mechanizm wymiany emitancji między płaszczyzną poprzeczną i podłużną w przestrzeni fazowej.
- W tym celu wprowadza się dyspersję w kanałach chłodzenia i uzyskuje się efekt korelacji drogi poprzez absorber od energii mionu.
- W praktyce uzyskuje się to poprzez specjalną geometrię magnesu.

Symulacja dynamiki oraz prototyp magnesu dla HCC (Helical Cooling Channel), R. Johnson, Muons Inc.

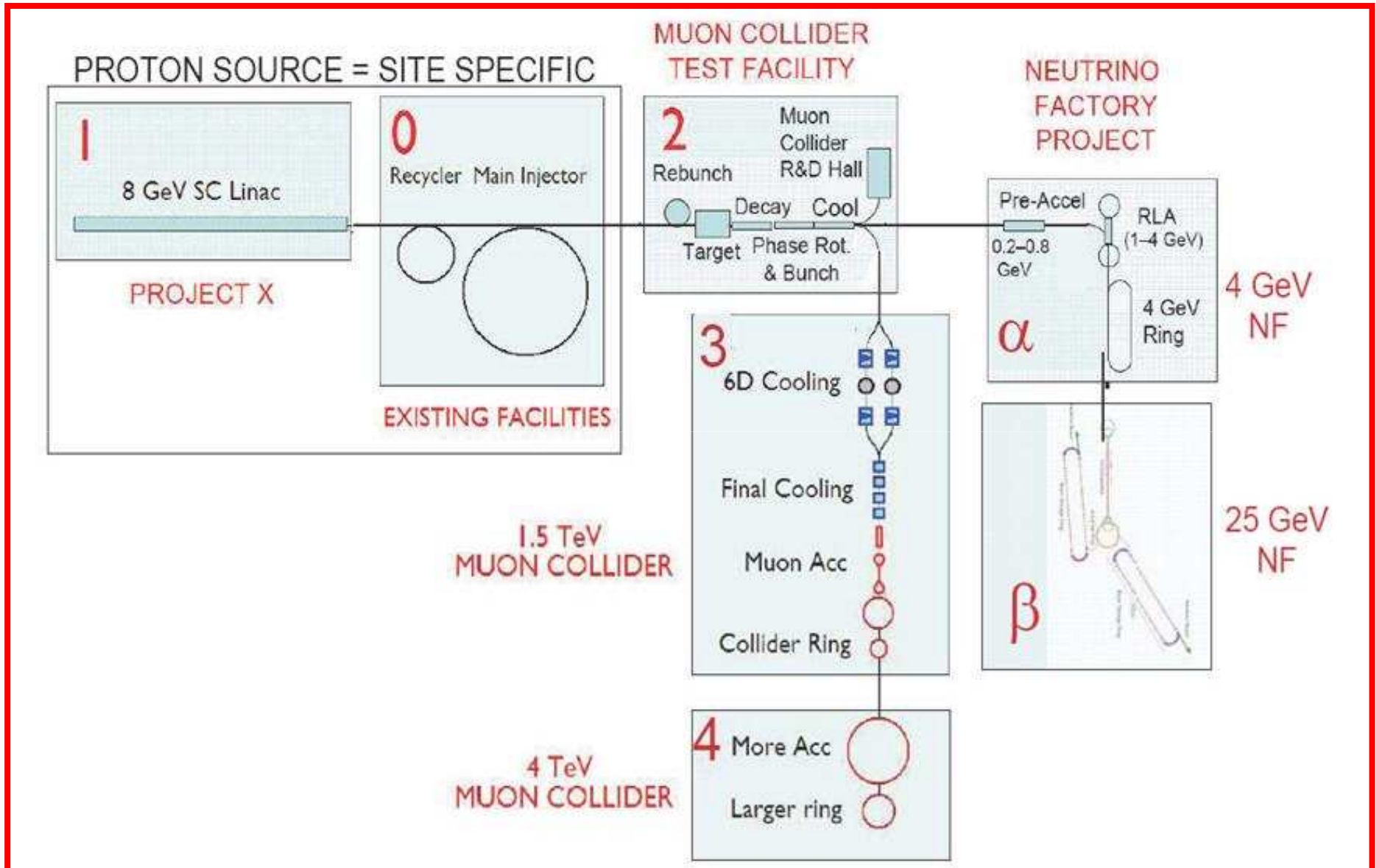
J. Pasternak

Możliwy schemat zderzacza mionów, (R. Johnson, Muons Inc.)



J. Pasternak

Scenariusze rozwoju akceleratorów mionowych w Fermilab-ie:



J. Pasternak

Podsumowanie

- Prace nad Fabryką Neutrin trwają.
- Czekamy na wyniki obecnych eksperymentów!
- Konceptyjny projekt FN będzie gotowy w 2012.
- Przyszłość akceleratorów mionowych zapowiada się interesująco!
- Eksperymenty poszukujące konwersji mionu w elektron mają interesujący potencjał fizyczny jak również dają szansę rozwijać piękną fizykę akceleratorów, która może okazać się kluczowa dla Fabryki Neutrin i Zderzacza Mionów.
- Zderzacz mionów to maszyna marzeń dla fizyków akceleratorów, prace nad nim trwają i uzyskano widoczny postęp.

J. Pasternak

08.10.10, UW

Dziękuję za uwagę!