

Perspektywy fizyki cząstek elementarnych

Elementy fizyki cząstek elementarnych

Wykład XII

- LHC
- ILC
- ⇒ Photon Collider, CLIC
- Neutrino
- ⇒ akceleratory μ^\pm i fabryki neutrin
- Astro-cząstki...

Cele eksperymentów w HEP

Poszukiwania "nowej fizyki"

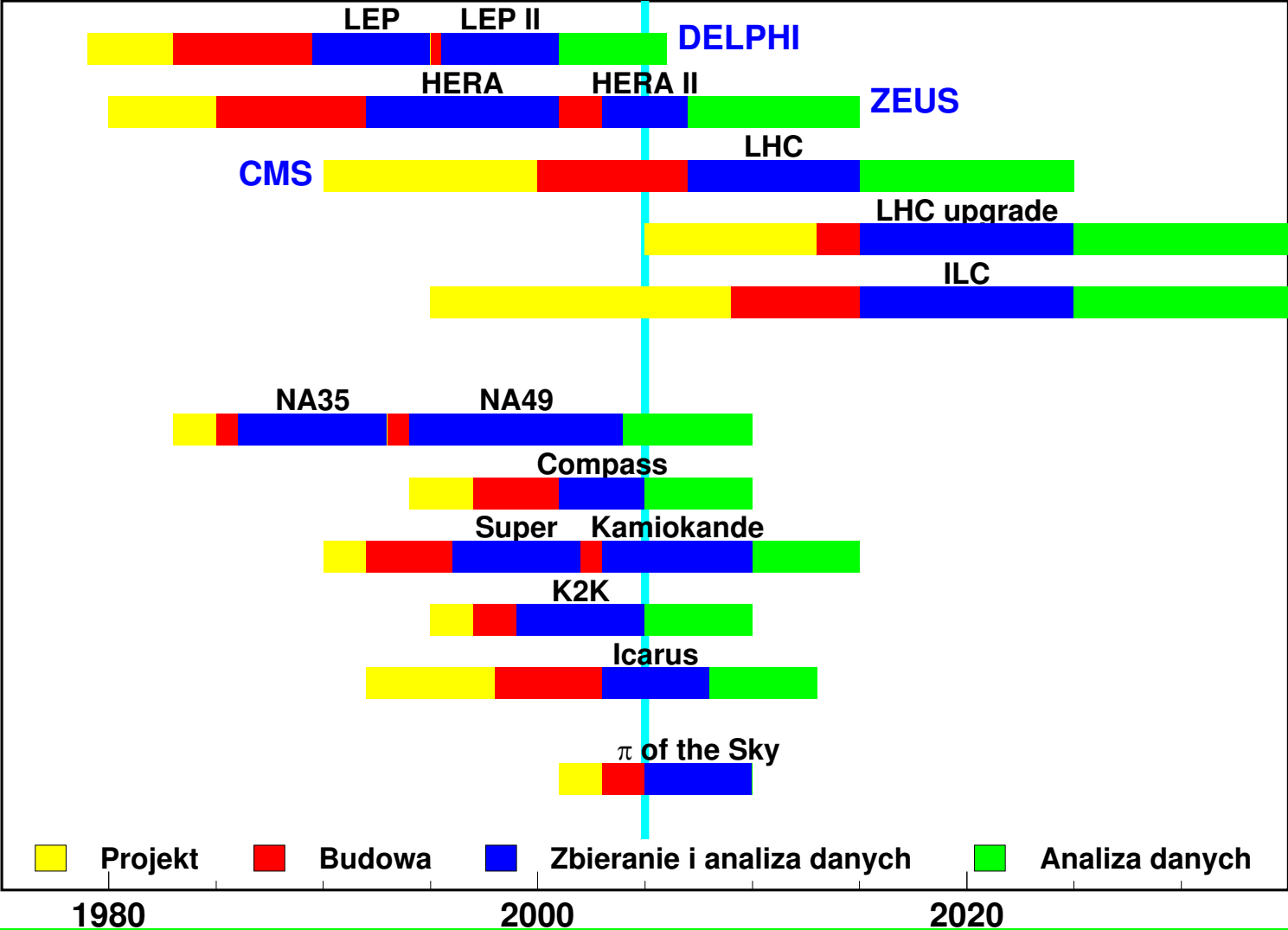
- poszukiwania bozonu Higgsa
- kolejnych generacji "standardowych" cząstek
- cząstek supersymetrycznych
- podstruktury kwarków i/lub leptonów
- ciemnej materii
- nowych oddziaływań
- naruszenia zasad zachowania

Pomiar parametrów i weryfikacja MS

- badanie własności cząstek
 - ⇒ mas np. $W^\pm, Z^0, t, \nu \dots$
 - ⇒ sprzężeń
 - ⇒ kanałów rozpadów
- pomiar mieszania kwarków i leptonów (neutrin)
- pomiar łamania symetrii CP
- pomiar partonowej (kwarkowo-gluonowej) i spinowej struktury cząstek protonu, neutronu, fotonu...

Warszawska grupa HEP

Główne eksperymenty z udziałem fizyków z Warszawy



LHC

99.9% CL

Przeciwiężne wiązki protonów,
 $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$.

Bardzo wysoka świetlność.

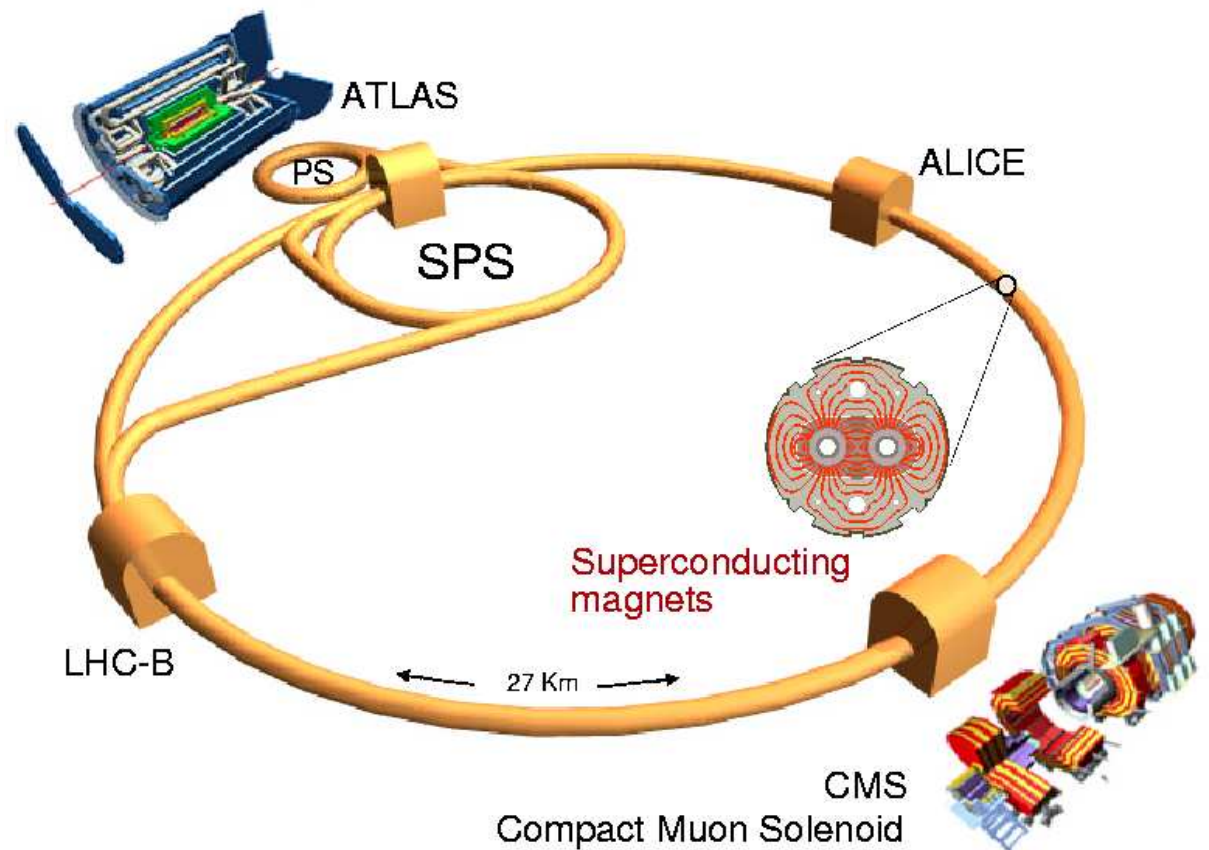
Akcelerator i eksperymenty:
w budowie.

Planowane uruchomienie: 2007.

Fizyka:

- Higgs
- supersymetria
- łamanie CP
- “polowanie” na wszystkie egzotyczne twory...

The Large Hadron Collider (LHC)

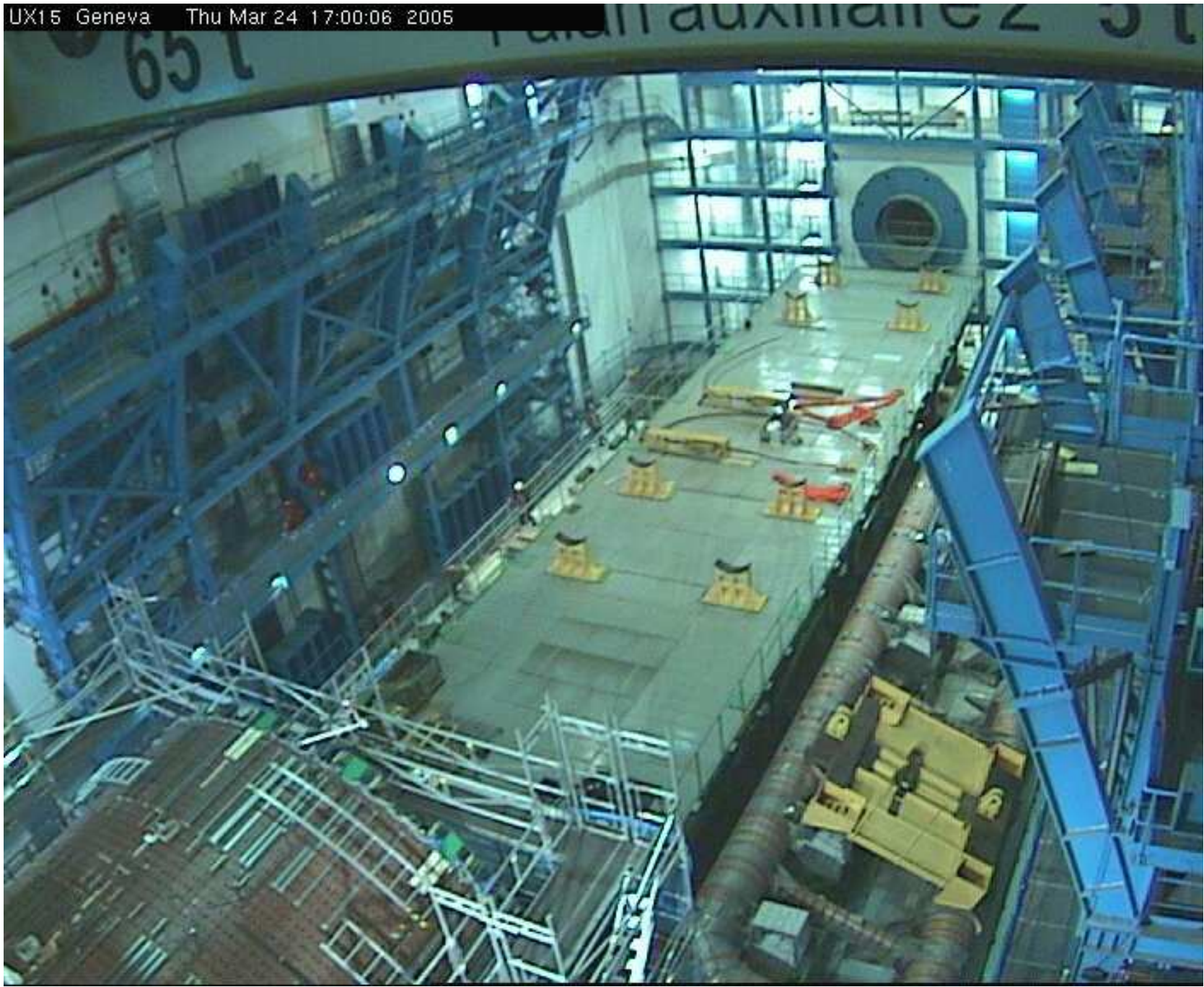


UX15 Geneva Tue Sep 21 14:30:02 2004



ATLAS
wrzesień 2004

ATLAS
marzec 2005



UX15 Geneva Wed Jun 1 18:30:02 2005

alan auxiliaire 2 5 t



ATLAS
czerwiec 2005

International Linear Collider (ILC)

95% CL

Planowana jest już budowa kolejnego akceleratora - akceleratora liniowego e^+e^- .

Program fizyczny:

Precyzyjne pomiary

- kwarku t
- bozonu Higgsa
- cząstek supersymetrycznych
- wszystkiego co odkryje LHC...

Wymagane parametry:

- dostępna energia $\sqrt{s} = 200 - 500$ GeV,
- bardzo wysoka świetlnosc: $500 \text{ fb}^{-1}/4$ lata,
- wysoka polaryzacja wiązek,
- możliwość rozbudowy
m.in. o opcję $\gamma\gamma$

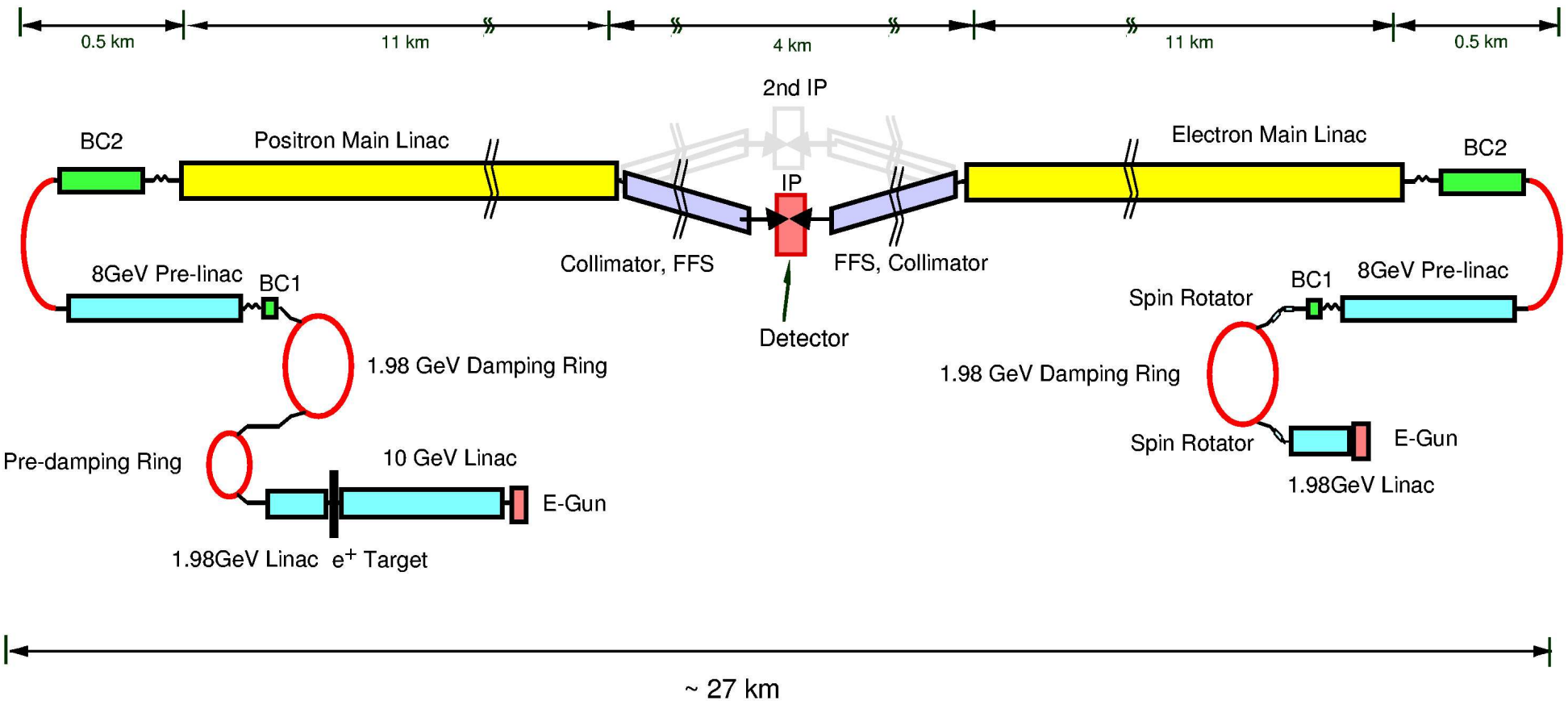
Projekt ogólnoswiatowy

Consensus środowiska jeśli chodzi o potrzebę budowy !

ILC

Do niedawna rozważanych było kilka koncepcji budowy akceleratora

Projekt JLC (Japonia):



ILC

Główna różnica między projektami - metoda przyspieszania wiązek:

- projekty JLC i NLC - “ciepłe” wnęki przyspieszające
- projekt TESLA - “zimne” (nadprzewodzące) wnęki przyspieszające
- projekt CLIC - jeszcze w fazie testów, nie był rozważany

W sierpniu 2004 międzynarodowa komisja zdecydowała, że ILC powinien być zbudowany w oparciu o technologię nadprzewodzących wnęk przyspieszających.

- mniejsze straty energii
- większa stabilność
- większa niezawodność

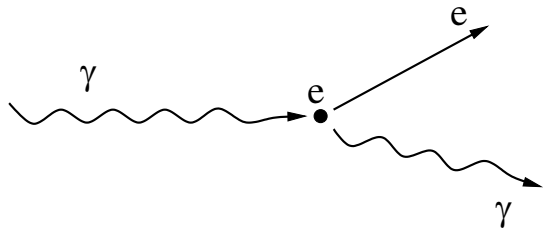
Ostateczny projekt ILC powinien powstać do roku 2008.

Uruchomienie: 2015 ?

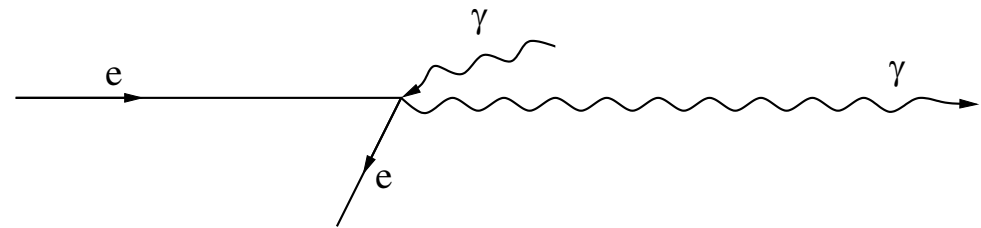
Zderzenia $\gamma\gamma$

Rozpraszanie Comptona

“Klasycznie”: foton rozpraszając się na elektronie **przekazuje** mu część swojej **energii**:



Możemy jednak przejść do układu odniesienia, w którym $E_e \gg E_\gamma$:



\Rightarrow elektron może przekazać fotonowi **większość swojej energii** !

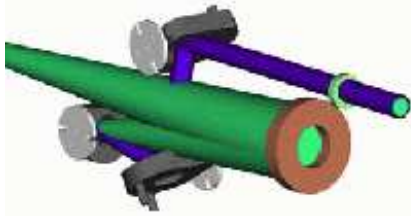
Photon Collider (opcja ILC)

Możliwość **zderzania fotonów** jest opcją we wszystkich projektach e^+e^- .

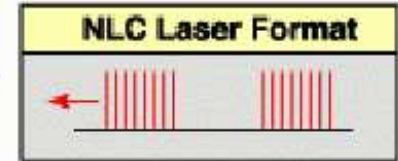
Wykorzystując **niezwykle silny laser** możemy uzyskać prawie pełną “zamianę” wiązki elektronowej w fotonową...

Fotony “przejmują” nie tylko **energię** (maksimum przy ok. 80% energii wiązki), ale i **kierunek** wiązki elektronów (**rozmycie kątowe** $\sim m_e/E_e$)

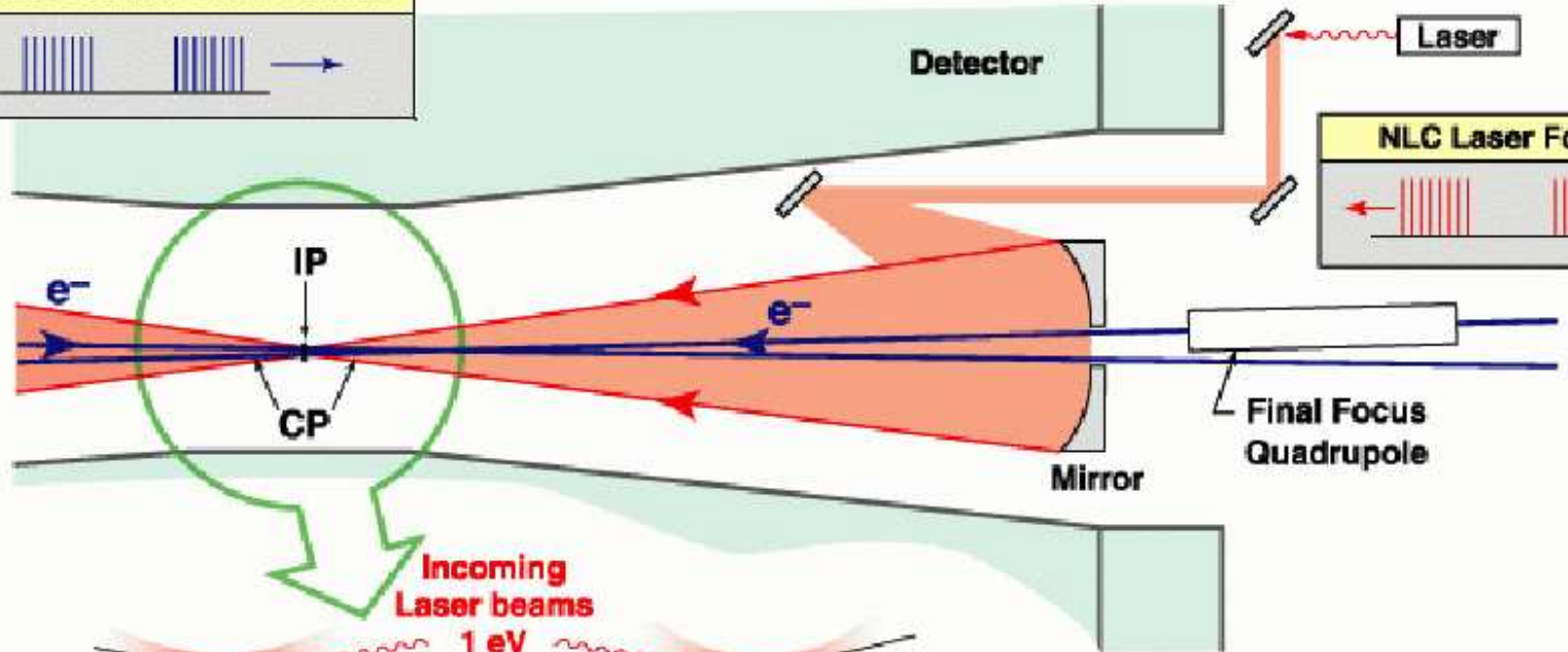
\Rightarrow możemy doprowadzić do zderzeń $\gamma\gamma$ ze świetnością $\mathcal{L}_{\gamma\gamma} \sim \mathcal{L}_{ee}$



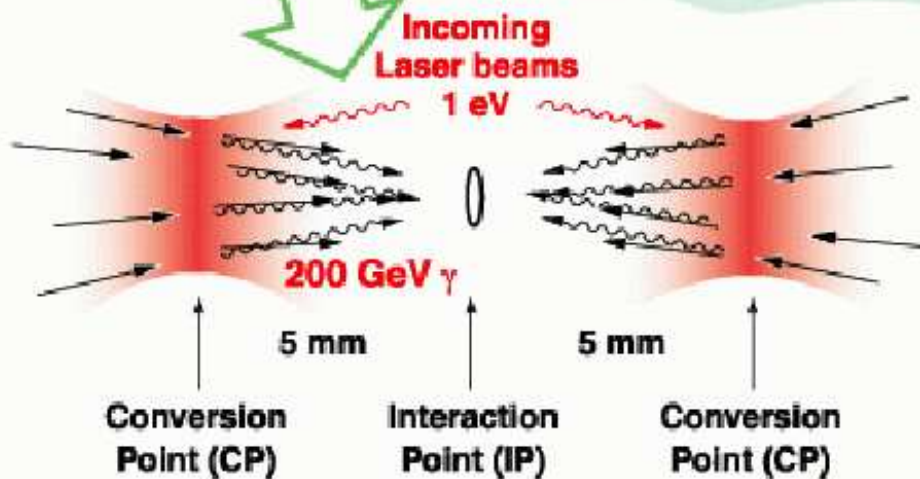
Photon Colliders – The marriage of lasers and electron linear colliders



Projekt NLC
 e^- : 250 GeV



$\gamma \sim 200$ GeV

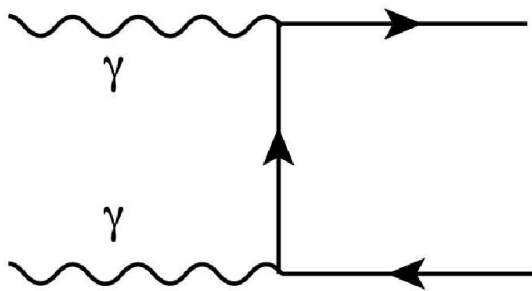


NLC Laser
~ 1 Joule/bunch
95 1-ps bunches/pulse
2.8 nsec spacing

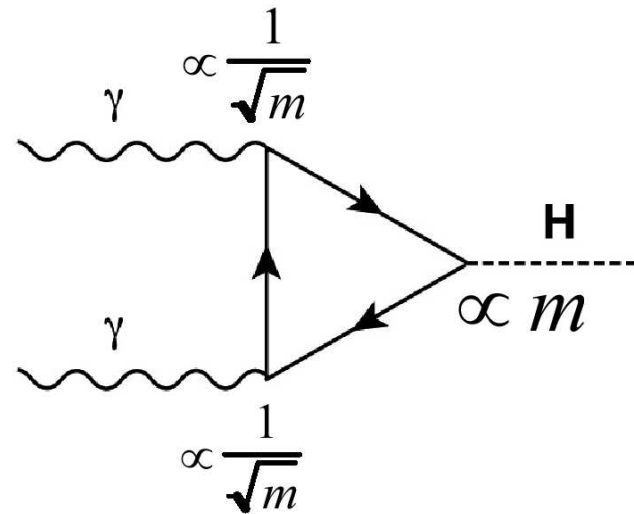
Photon Collider

Fizyka

W zderzeniach $\gamma\gamma$ możemy produkować **wszystkie** cząstki **naładowane** (“czyste” oddziaływanie elektromagnetyczne), ale nie tylko...



Wyjątkowa w zderzeniach $\gamma\gamma$ jest możliwość **rezonansowej** produkcji bozonu **Higgsa**:



Ponieważ foton nie sprzęga się bezpośrednio do Higgsa, tylko przez “pętle”, proces jest czuły na **WSZYSTKIE** cząstki naładowane \Rightarrow **niezwykle czuły** na “nową fizykę”

W innych procesach **wkłady pętlowe** szybko **maleją** ze wzrostem **masy** cząstek...

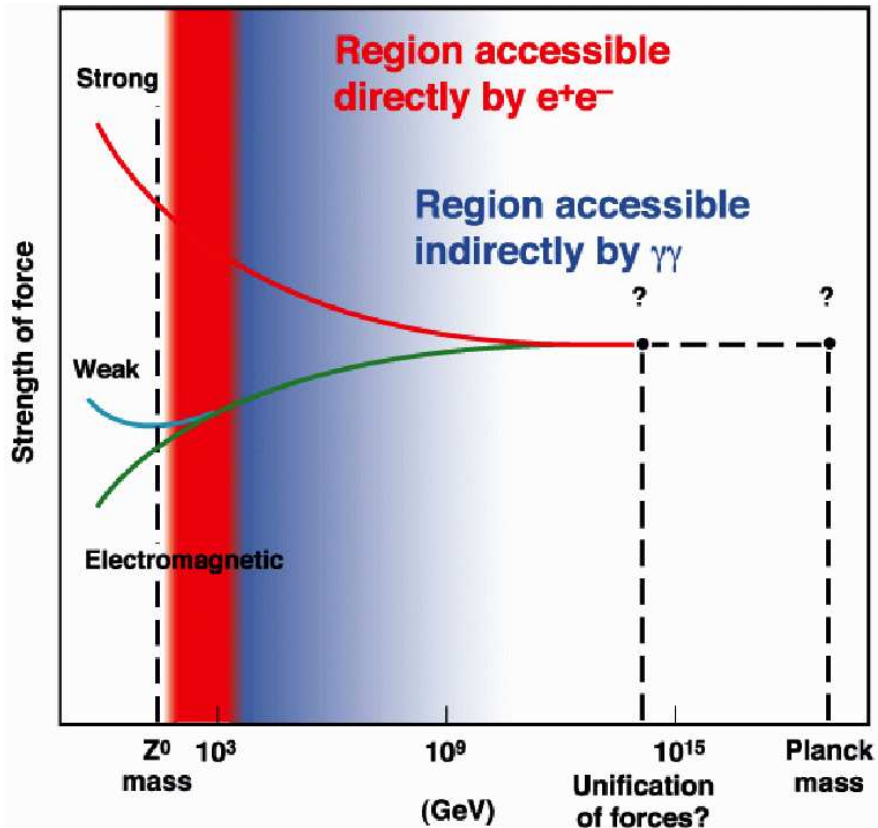
Ale **sprężenie Higgsa** jest proporcjonalne do **masy** !

\Rightarrow **wkłady skończone** nawet w granicy $M \rightarrow \infty$

Photon Collider

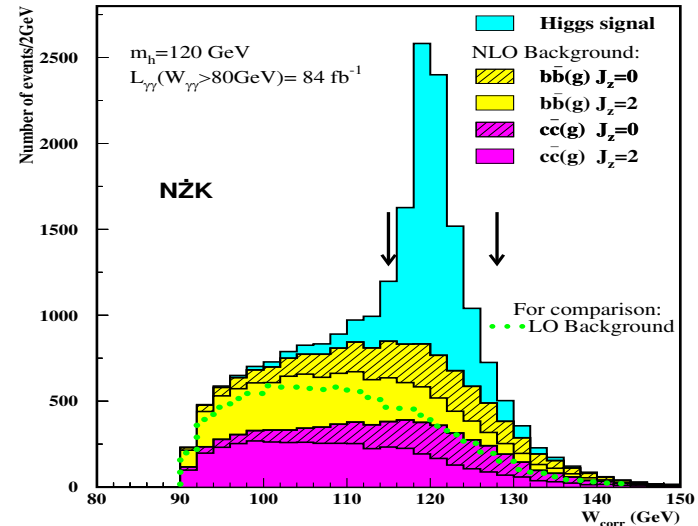
Fizyka

Jedyny kolajder, który może “sięgnąć” skali unifikacji

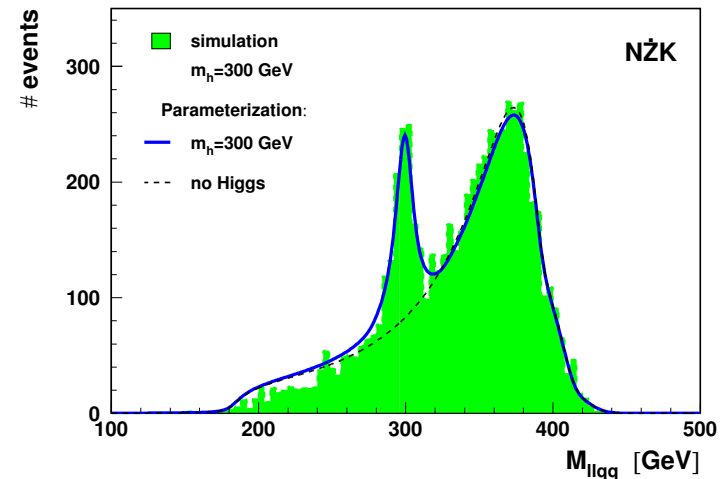


Wyniki symulacji prowadzonych w Warszawie:

$$\gamma\gamma \rightarrow h \rightarrow b\bar{b} \quad e^+e^- \text{ beams with } \sqrt{s_{ee}} = 210 \text{ GeV}$$



$$\gamma\gamma \rightarrow h \rightarrow ZZ$$



???

Dalsze ?!

Barierą w budowie dalszych akceleratorów są przede wszystkim koszty !

⇒ konieczne są nowe pomysły, nowe rozwiązania...

Koszty ⇔ rozmiary

- maszyny hadronowe - pole magnetyczne
- maszyny e^+e^- - pole przyspieszające (a. liniowe)
straty energii na promieniowanie (a. kołowe)

CLIC

Akceleratory liniowe

Koszt \sim długość $\sim \sqrt{s}/\langle \mathcal{E} \rangle$ ($\langle \mathcal{E} \rangle$ - średnie pole przyspieszające)

ILC: $\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$ przy $\langle \mathcal{E} \rangle \sim 20 \text{ MV/m} \Rightarrow 25 \text{ km}$

Jeśli chcemy zwiększyć \sqrt{s} musimy zwiększyć \mathcal{E}

CLIC (Compact Linear Collider)

Rezygnujemy z “klasycznych” wnęk rezonansowych (i klistronów)

Wyższe pola przyspieszające uzyskujemy wykorzystując... drugą wiązkę

\Rightarrow pola przyspieszające $\mathcal{E} \sim 150 \text{ MV/m}$

$\Rightarrow \sqrt{s} \sim 3 - 5 \text{ TeV}$ przy rozmiarach podobnych do ILC

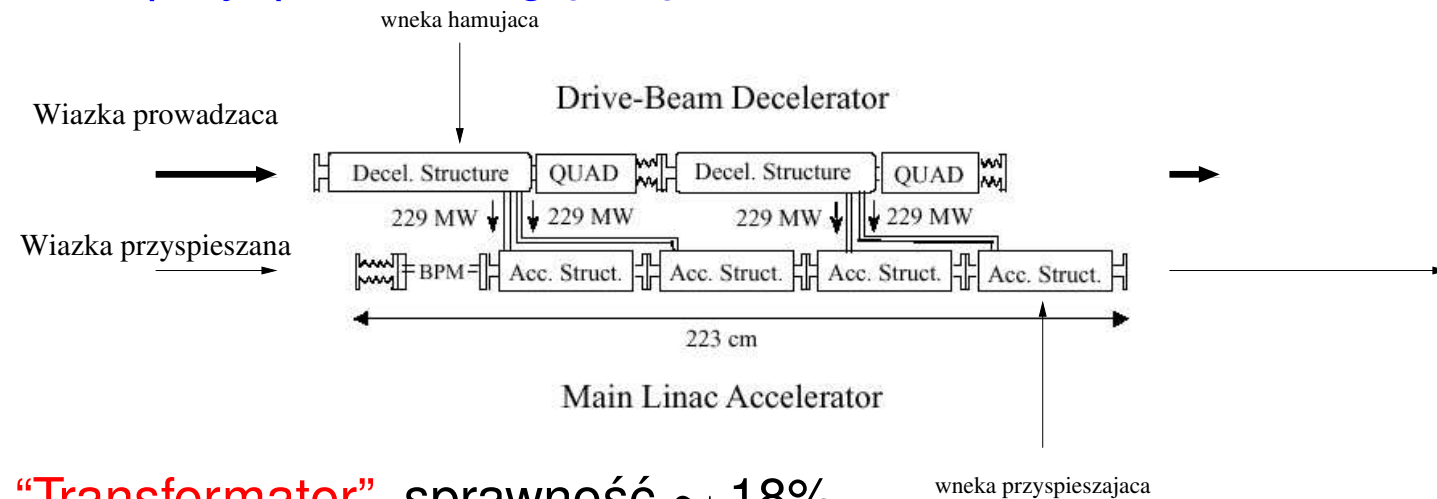
Jedyny problem: nie wiadomo czy zadziała...

(ILC: technologia sprawdzona w 99%)

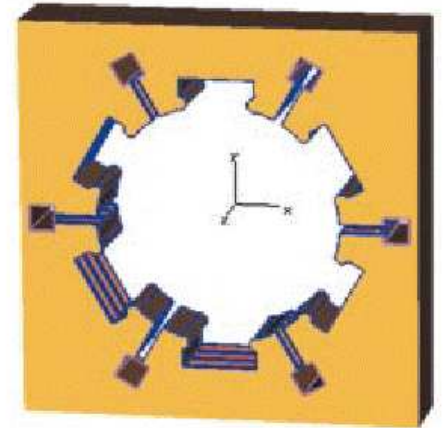
CLIC

Zasada działania

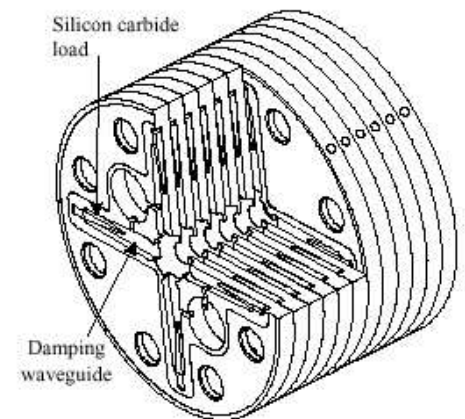
Wiązka prowadząca wytwarza pole elektryczne (falę EM), które przyspiesza drugą wiązkę:



Wnęka hamująca



Wnęka przyspieszająca



“**Transformer**”, sprawność $\sim 18\%$

- wiązka prowadząca - duży prąd, mała energia
- wiązka przyspieszana - mały prąd \Rightarrow duża energia

Obecnie przygotowywane są testy kolejnego (3) prototypu

Ostateczny projekt ~ 2008 , uruchomienie ~ 2020 (???)

VLHC

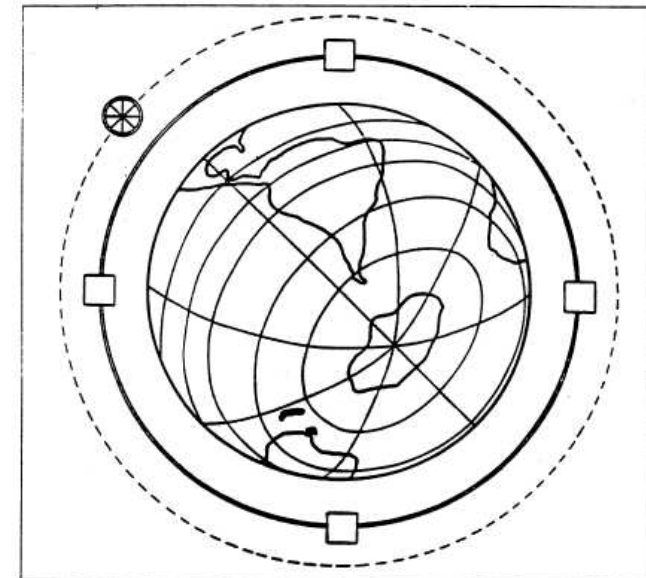
Pomysł

- zbudować jak największy tunel (w granicach rozsądku)
 - wstawić “tani” akcelerator
 - modernizować akcelerator do wyższych energii w miarę rozwoju nowych technologii
- ⇒ kosztą rozłożone na wiele lat
- ⇒ cały czas w czołówce energii

Rozważana budowa tunelu o obwodzie 233 km w ośrodku FNAL pod Chicago

- Etap I : pole $B \sim 2 \text{ T} \Rightarrow \sqrt{s} \sim 40 \text{ TeV}$
- Docelowo : pole $B \sim 10 \text{ T} \Rightarrow \sqrt{s} \sim 200 \text{ TeV}$

E.Fermi, 1954:

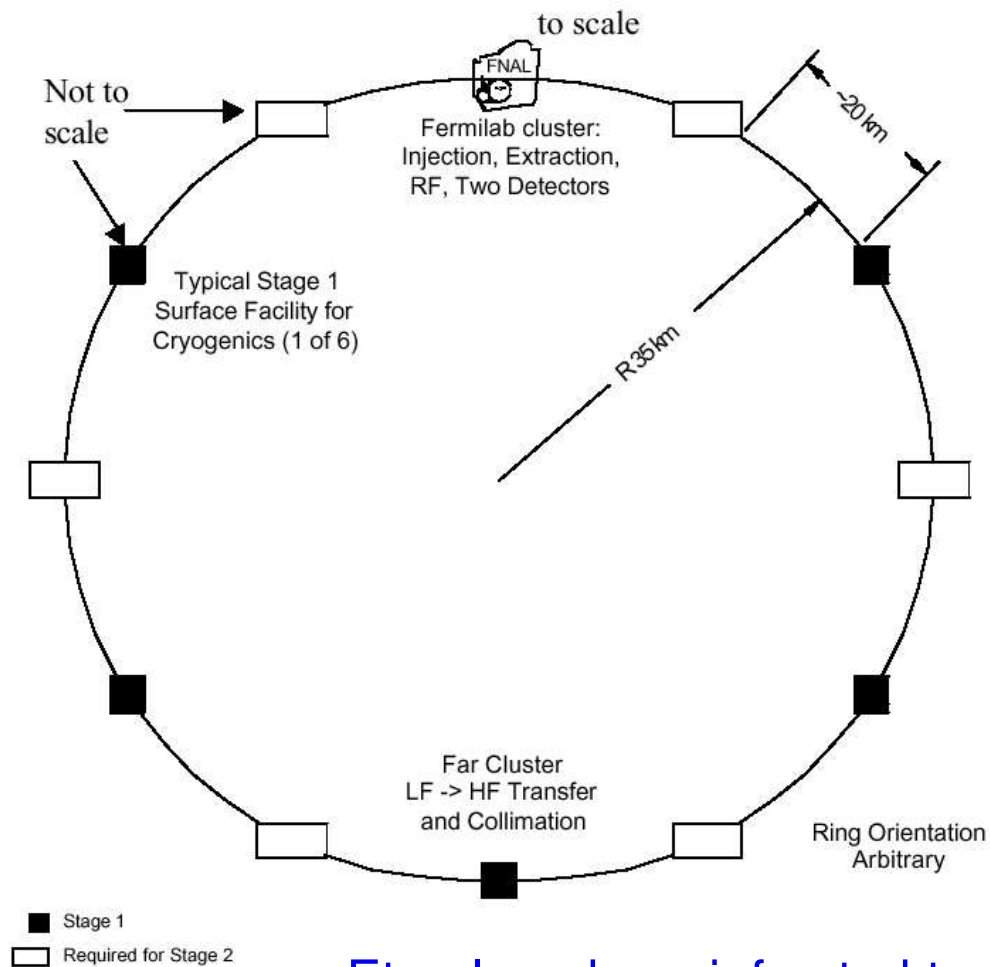


From a 1954 Slide by Enrico Fermi, University of Chicago Special Collections.

VLHC

Propozycja

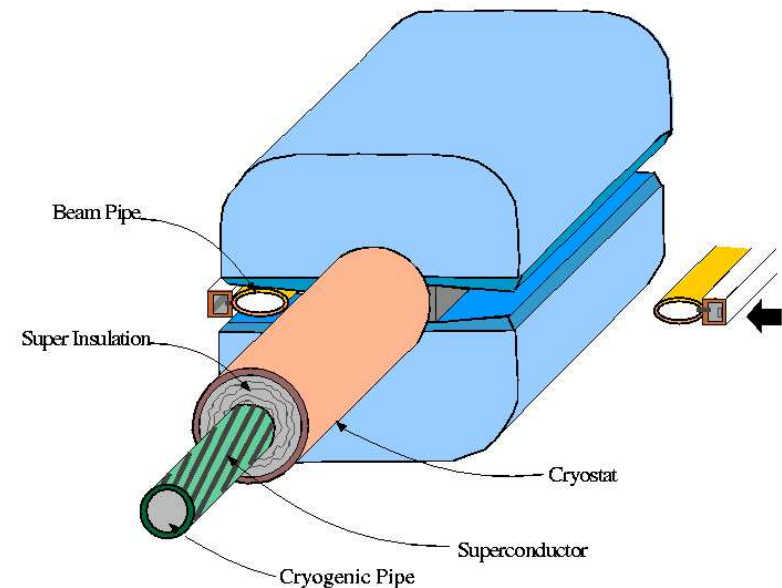
Oba detektory koło siebie ↓ (w Fermilabie)



Etap I : połowa infrastruktury

Magnes dipolowy

Najprostsza (najtańsza) możliwa konstrukcja dla etapu I:



Pojedynczy prosty przewodnik
 $I=75-100 \text{ kA} \Rightarrow B \sim 2 \text{ T}$

Zderzenia $\mu^+\mu^-$

Pierwsze pomysły: ~ 1960

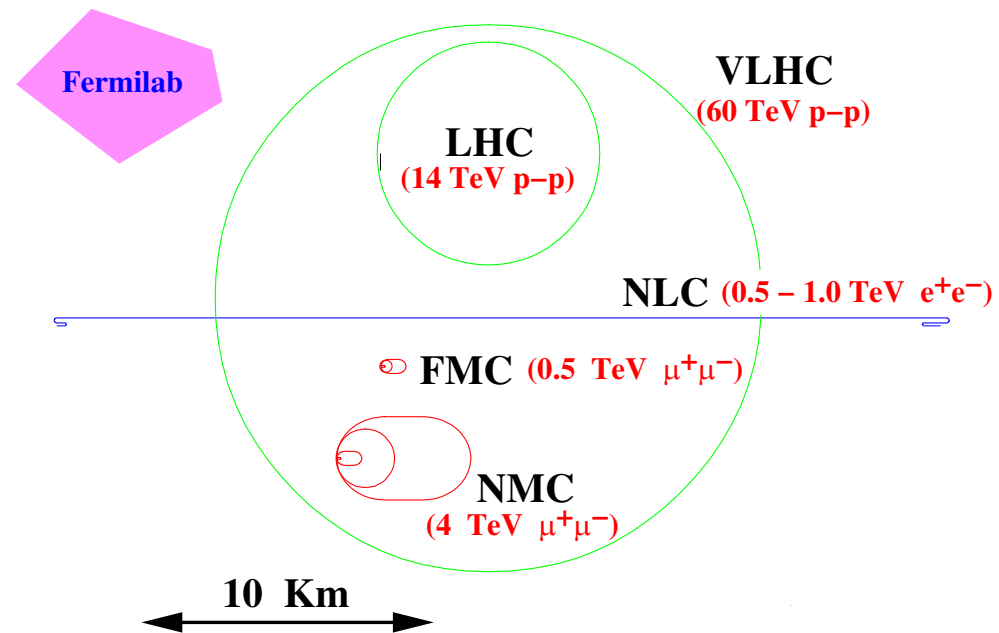
Zalety

$$m_\mu/m_e \approx 207$$

- mniejsze promieniowanie hamowania
- \Rightarrow dużo mniejszy pierścień (koszt !!!)
- \Rightarrow wyższe energie (!)
- \Rightarrow mniejsze rozmycie energii wiązki
- rezonansowa produkcja Higgsa
- fabryka neutrin

Czy to możliwe ?

Czy potrafimy zbudować akcelerator przeciwbieżnych wiązek $\mu^+\mu^-$?



Zderzenia $\mu^+ \mu^-$

Problem

Teoretycznie potrafilibyśmy zbudować akcelerator $\mu^+ \mu^-$ już dziś.

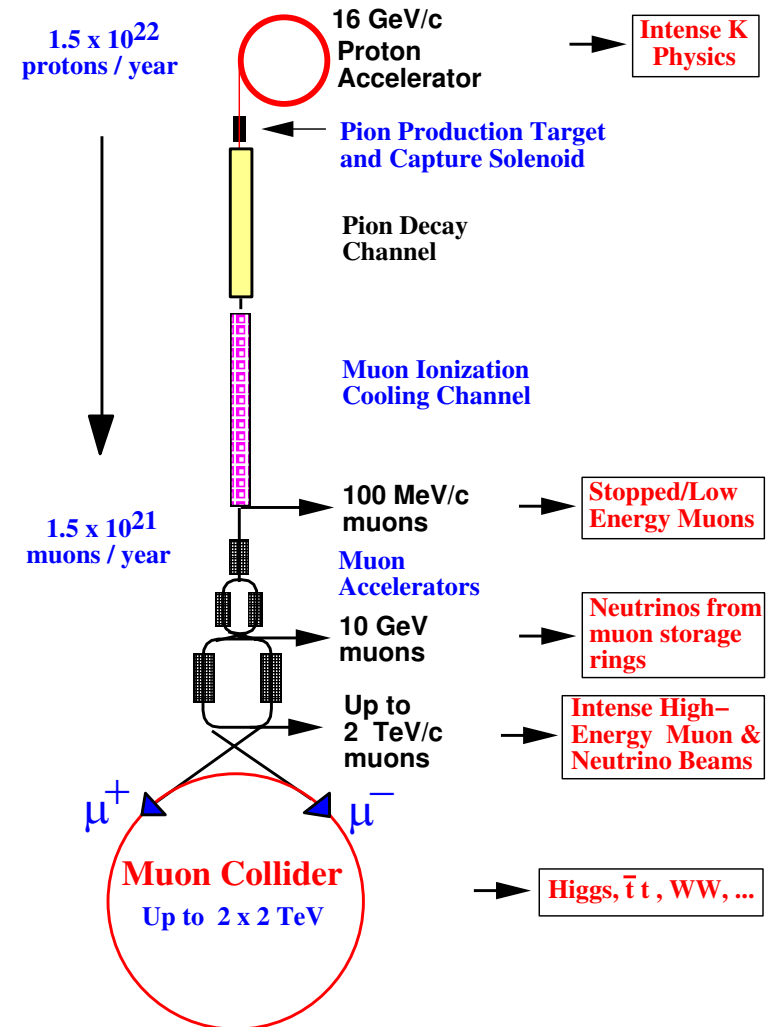
Problem: **światłość**

- produkowane w rozpadach miony mają różne pędy \Rightarrow rozmycie wiązki $\Rightarrow \mathcal{L} \downarrow$
- $\tau_\mu \sim 2 \cdot 10^{-6}$ s - szybko rozpadają się

Wymagania

- intensywne źródło mionów
rozpady π^\pm produkowanych w zderzeniach p -tarcza
- szybkie “chłodzenie” do $p \sim m_\mu$
konieczne dla uzyskania dobrze skolimowanej wiązki
- szybkie przyspieszanie
aby zminimalizować liczbę rozpadów

Muon Collider Schematic



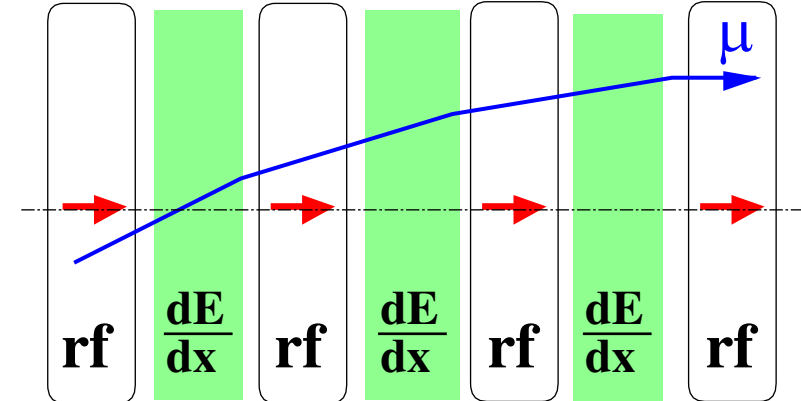
Zderzenia $\mu^+ \mu^-$

Chłodzenie jonizacyjne

Pomysł: Skrinsky i Parkhomchuk, 1981.

- przechodząc przez warstwy absorbera mion traci energię na jonizację
⇒ zmniejszenie wszystkich składowych pędu
- we wnękach przyspieszających mion odzyskuje straconą energię
⇒ tylko podłużną składową pędu

Ionization Cooling



Efekt sumaryczny: **zmniejszenie pędów poprzecznych** wiązki
⇒ **lepsze ogniskowanie** ⇒ **wyższa świetlność**

Nie musimy spowalniać mionów do $p \sim 0$
⇒ **mniej rozpadów**

Zderzenia $\mu^+ \mu^-$

Fabryki neutrin

Rozpady mionów krążących w pierścieniu akumulacyjnym

⇒ intensywne źródło neutrin

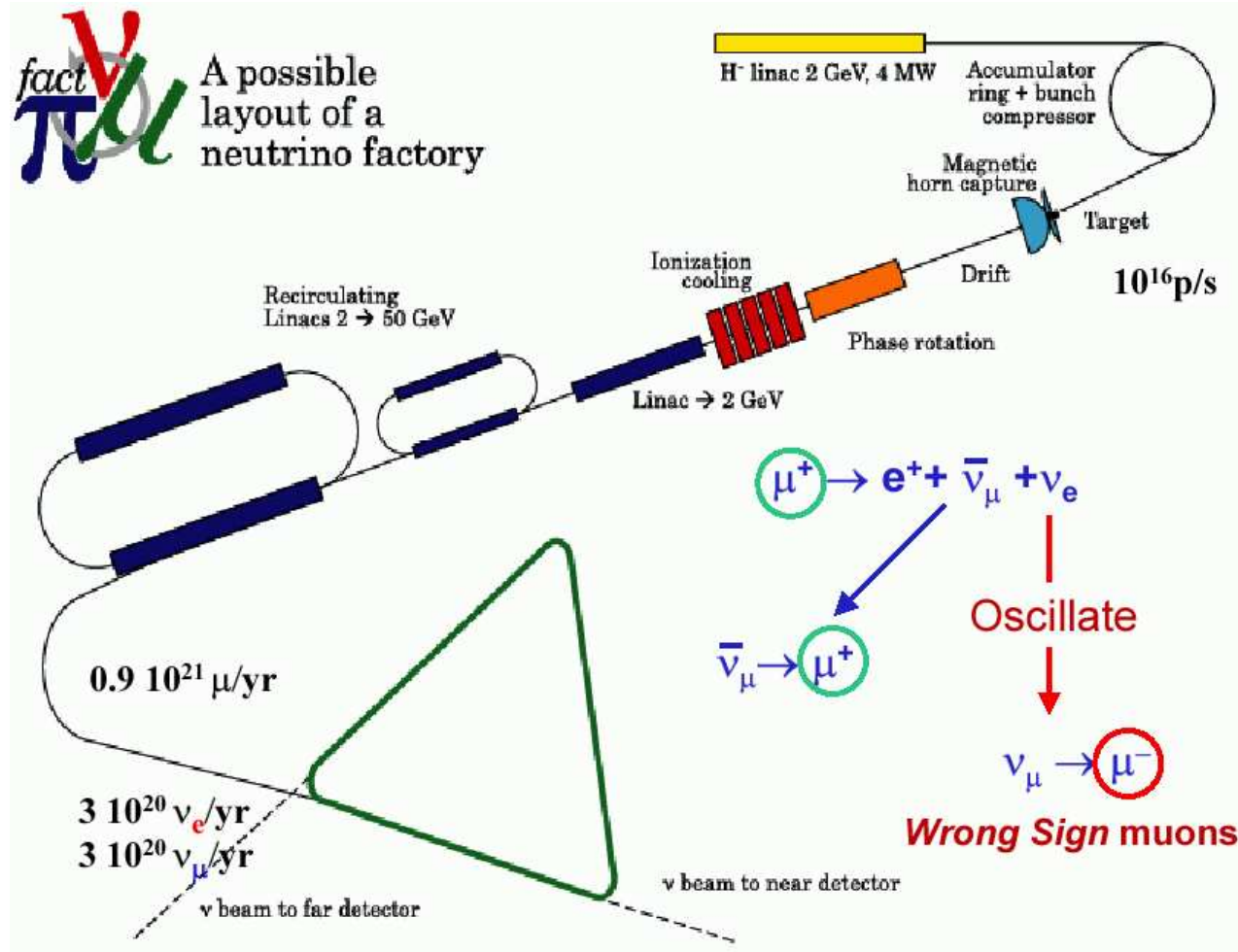
Proste odcinki pierścienia

⇒ "laser" neutrinowy

- b. dobra kolimacja
- wysoka intensywność
- wysoka energia $E_\nu \sim E_\mu$

⇒ nowe era w badaniach neutrin

Dużo łatwiejsze do zbudowania niż akcelerator (collider) $\mu^+ \mu^-$





Where do you prefer to take shifts?

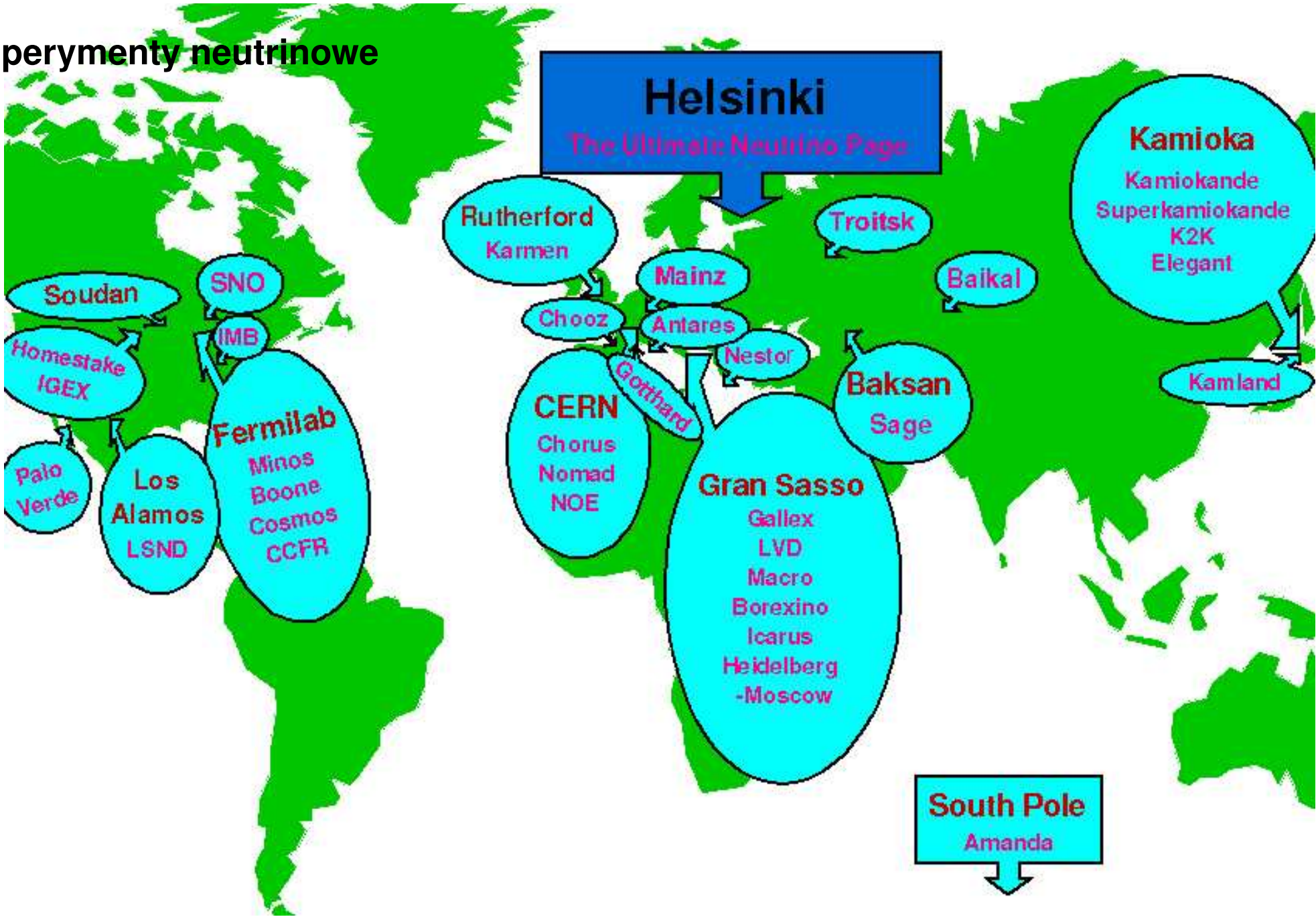


Ostateczny projekt: 2007 (?)

Budowa: ????



Eksperymenty neutrinowe



Eksperymenty neutrinowe

MINOS

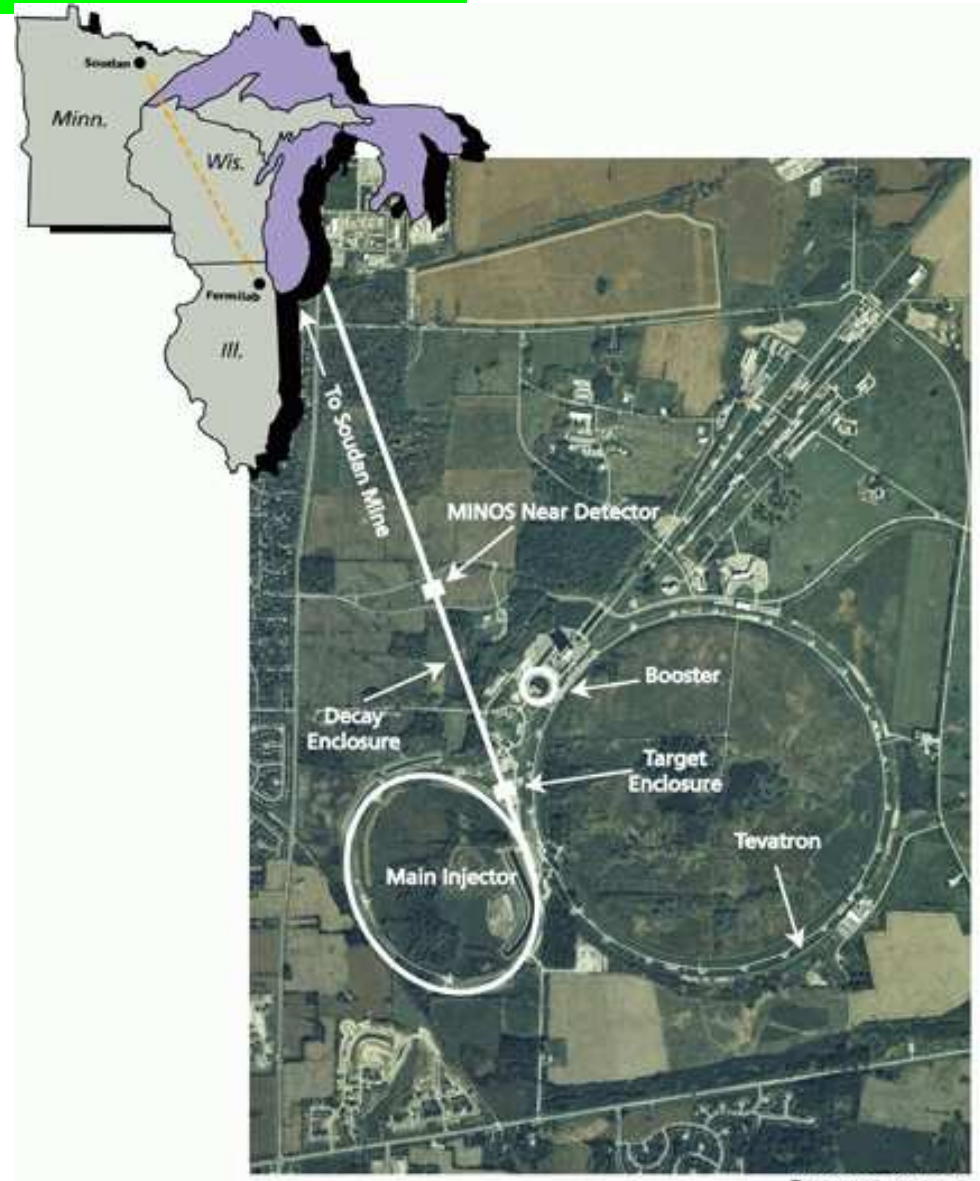
Nowy eksperyment neutrinowy.

Uruchomiony 4 marca 2005 !

Wiązka neutrin z Fermilab

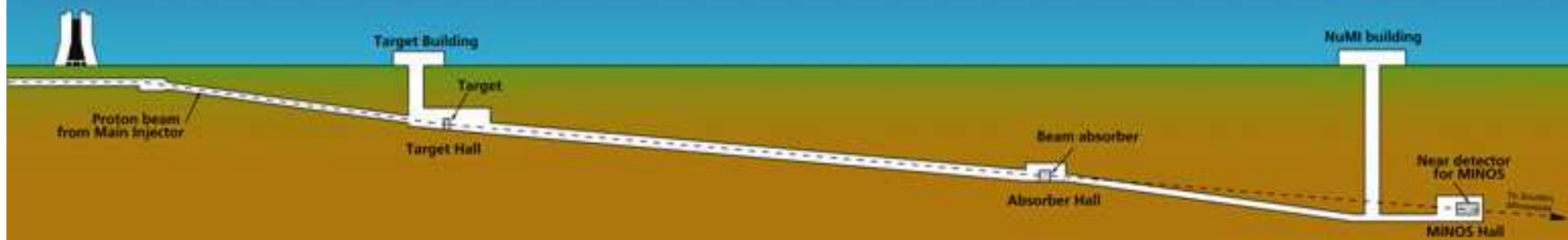
z rozpadów pionów powstających w zderzeniach protonów o energii 120 GeV

skierowana do odległej o 730 km kopalni Soudan, Minesota

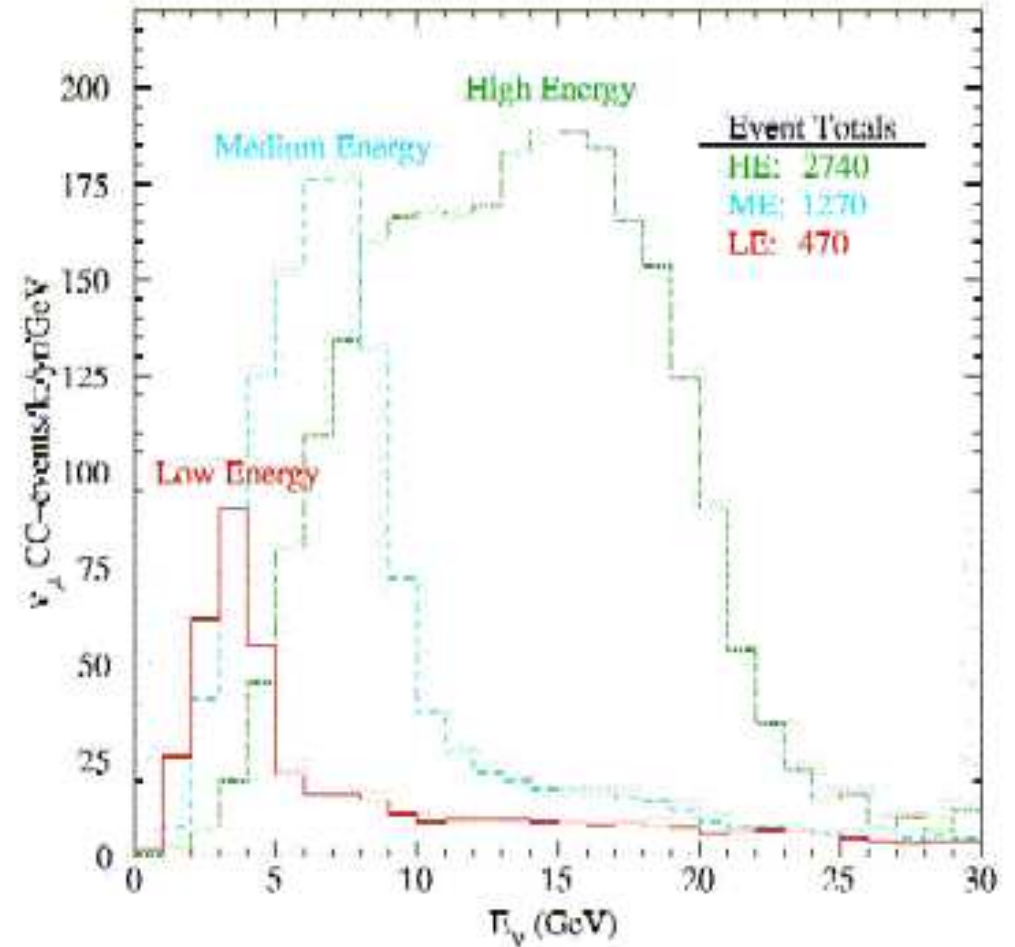
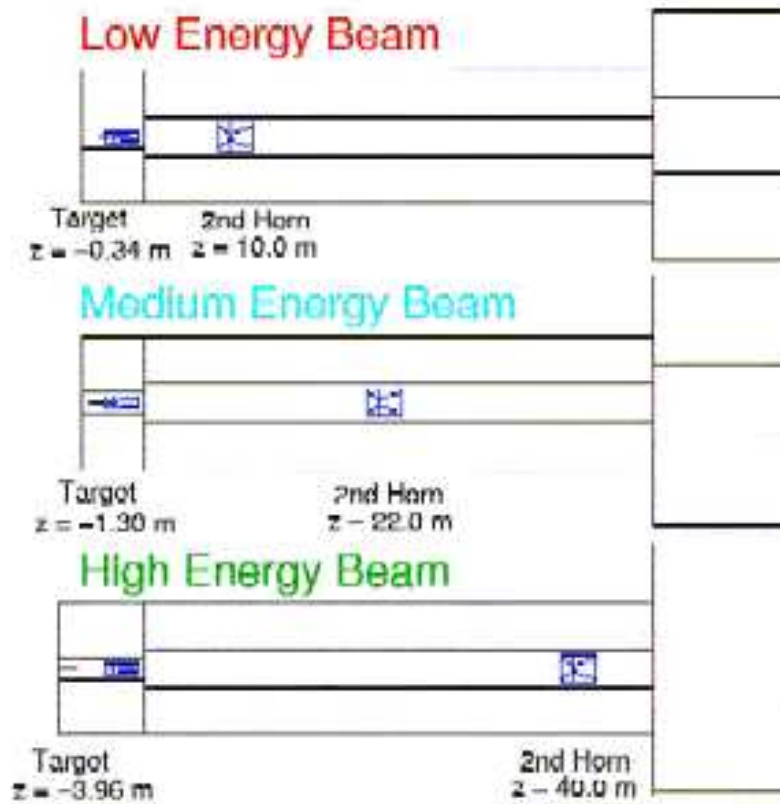


FERMILAB #98-1321D

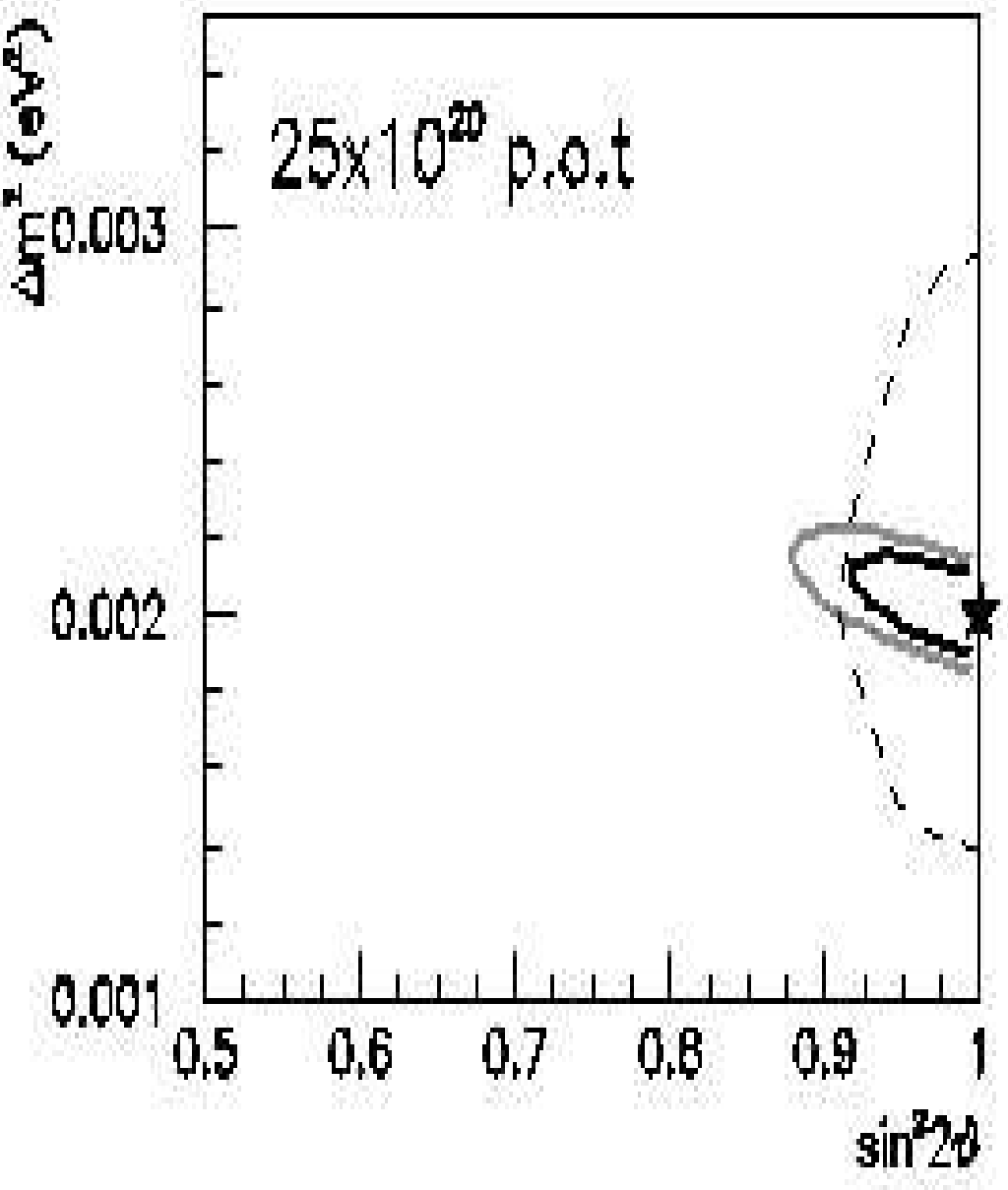
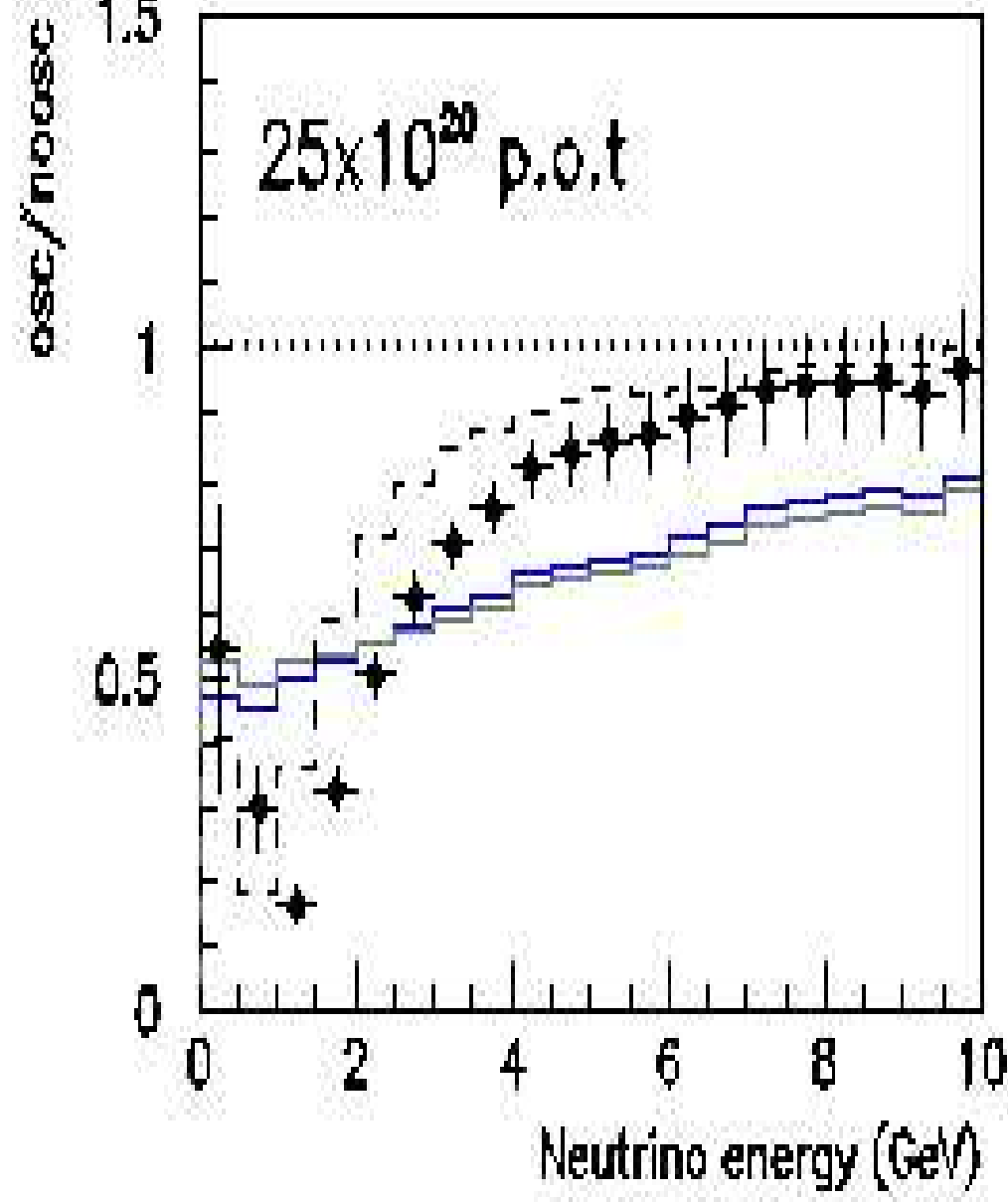
NuMI Tunnel Project



NuMI Beam Lines



Oczekiwana precyzja pomiaru po 5 latach, w porównaniu z Super-Kamiokande



Eksperymenty neutrinowe

CERN → Gran Sasso

Poszukiwanie oscylacji na odległości 730 km.

Eksperymenty OPERA i ICARUS.

Zbieranie danych od 2006 roku (?)

Tokai → Super-Kamikande

Odległość około 300 km.

Nowy akcelerator protonów o wysokiej intensywności.

Początek planowany na rok 2009...

In the context of supersymmetric models, the constraint on dark matter severely constrains the parameter space :

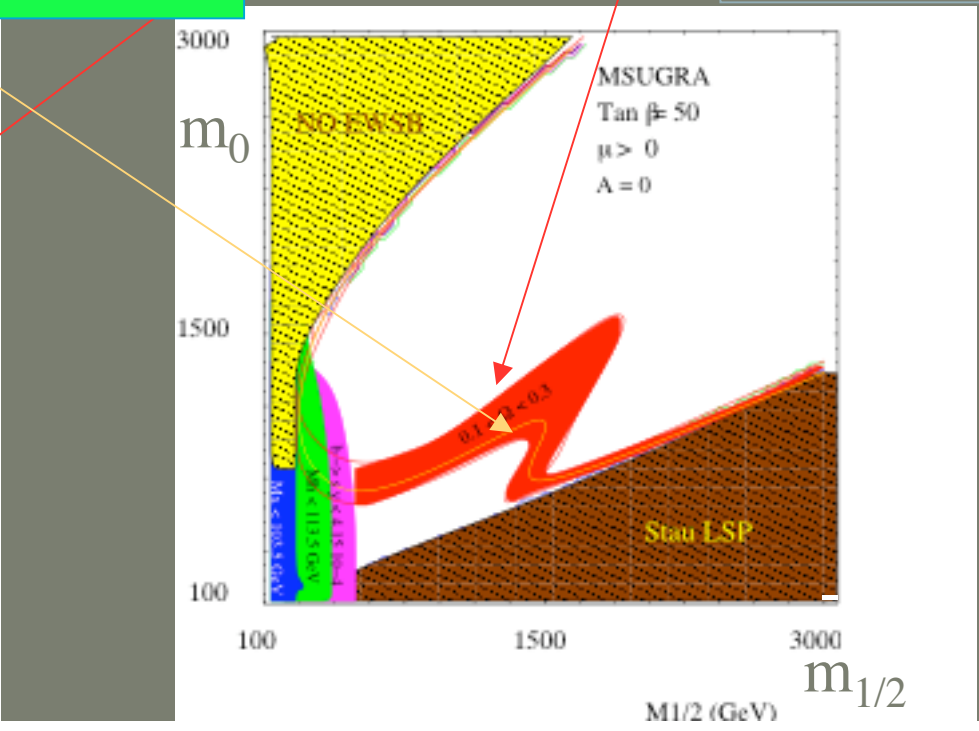
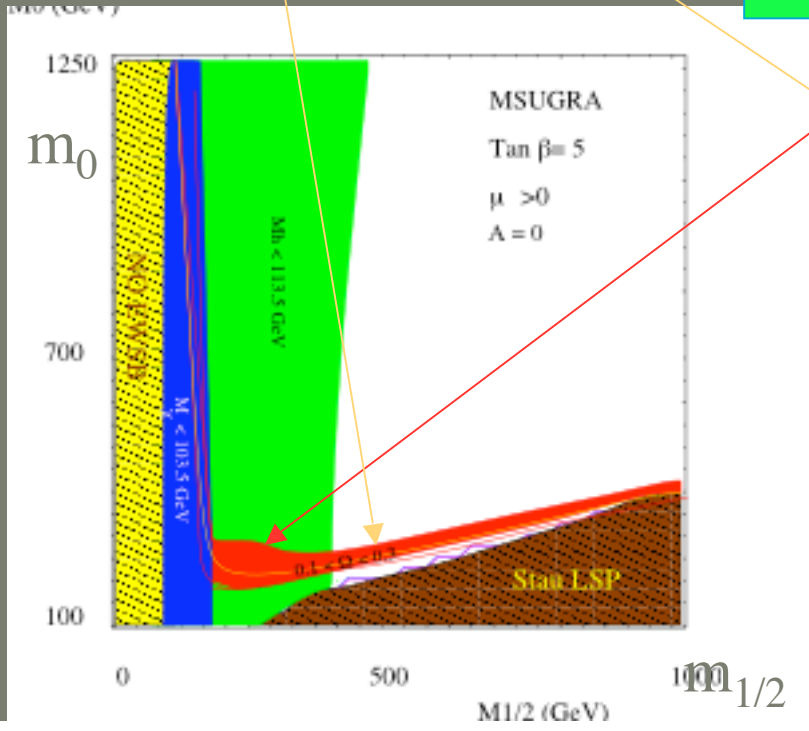
$$\Omega_{\text{CDM}} = 0.1126^{+0.0161}_{-0.0181}$$

$$0.03 < \Omega_{\text{CDM}} < 0.3$$

$\tan\beta=5$

mSUGRA

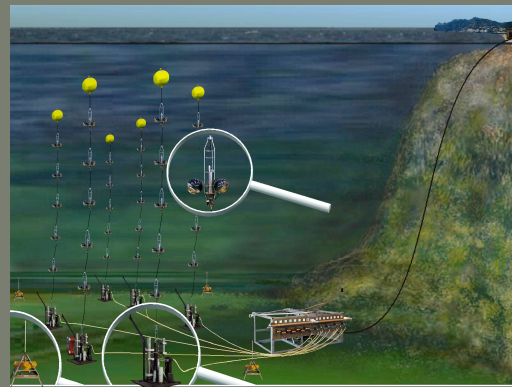
$\tan\beta=50$



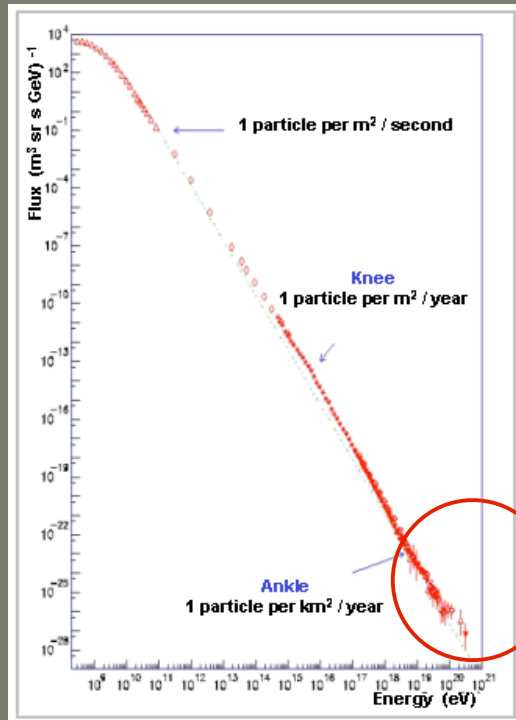
A new frontier

Three domains at the heart of particle astrophysics represent a new window open on the sky :

- ultra-high energy cosmic rays
- high energy neutrinos
- gravitational waves



D. The frontiers : 1. Ultra-high energy cosmic rays



GZK cut-off : protons above $5 \cdot 10^{19} \text{eV}$ cannot come from sources beyond 50Mpc because they interact with the γ of CMB

$$(N_{\gamma} \rightarrow N_{\pi})$$

Extragalactic origin?



HiRes

J. Belz

Two nitrogen fluorescence detectors, 13 km apart

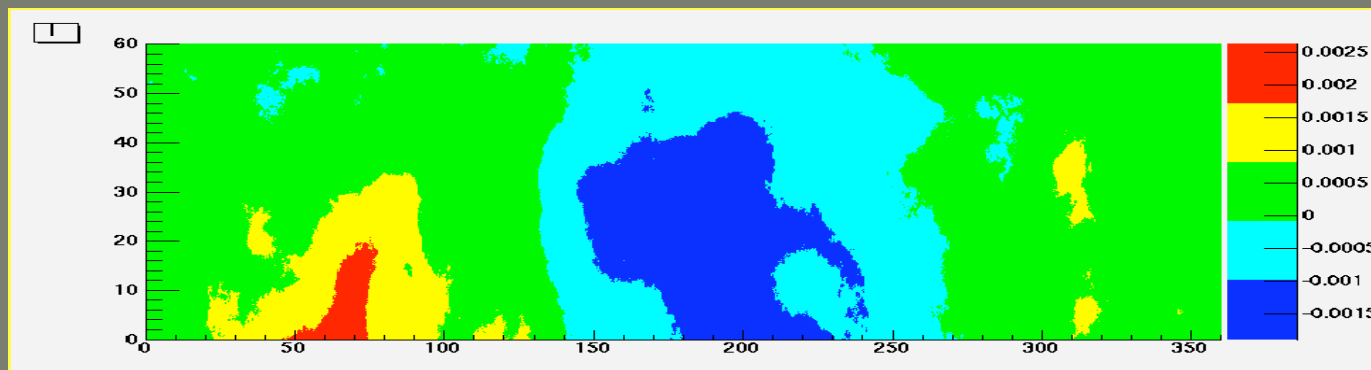
Tibet air shower array

Cosmic rays in the TeV region

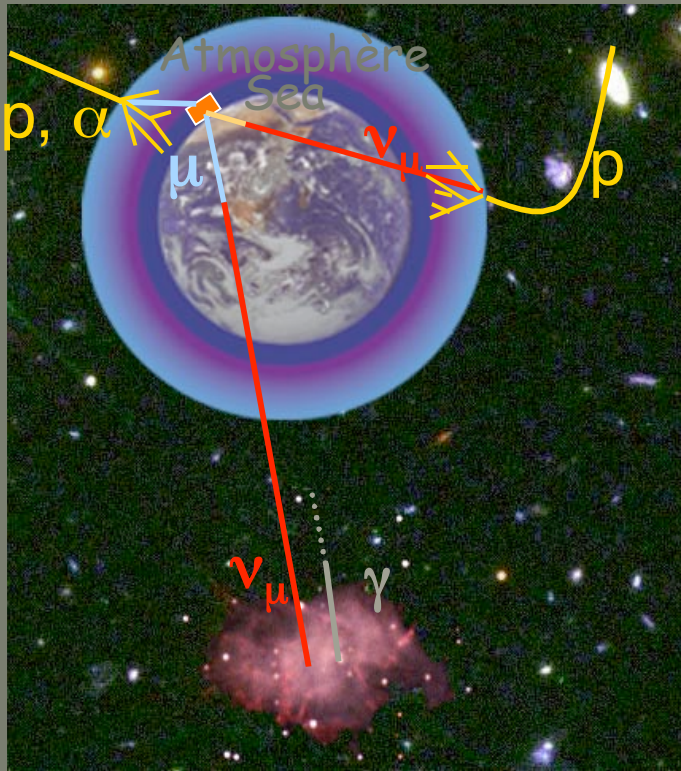
Zhang Yi



Large scale anisotropy observed with a magnitude of about 0.1%

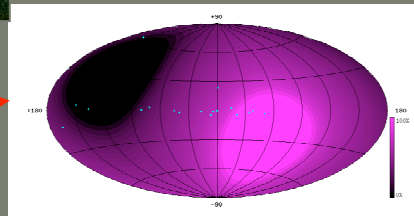
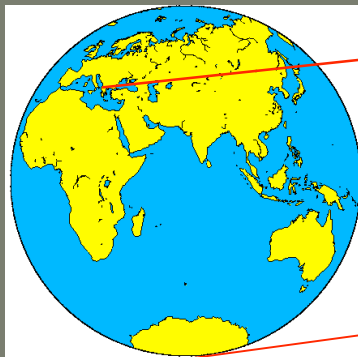


The frontier : 2. High energy neutrinos

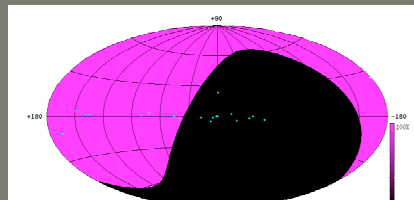


Neutrinos point to the source :

- galactic sources
 - pulsars, SNR, microquasars
- extragalactic sources
 - AGN, GRB
- center of the earth or the sun
 - annihilation of wimps



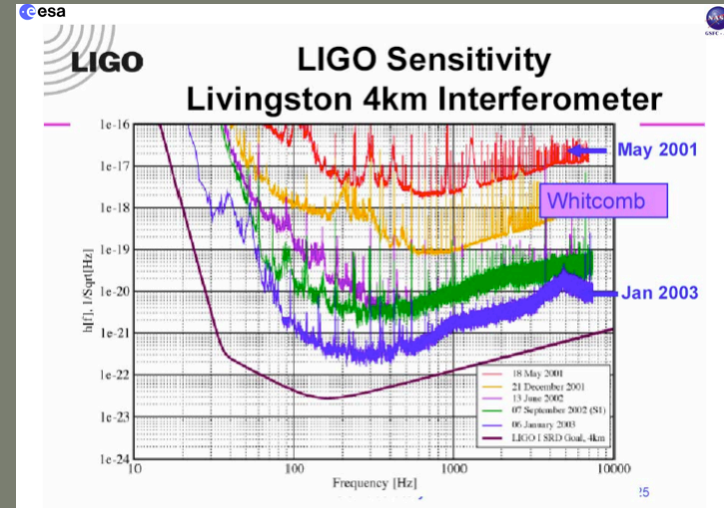
Antares, 43° North



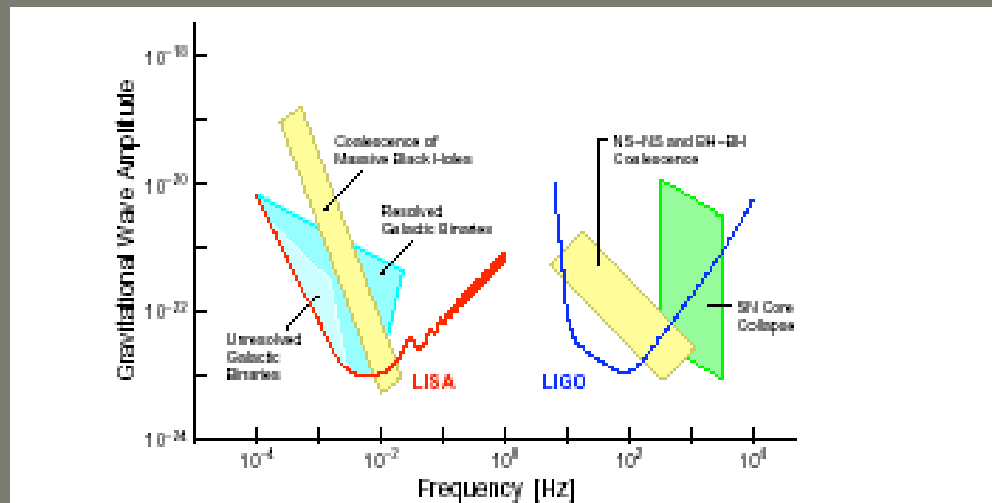
Amanda, South Pole

The frontier : 3. Gravitational waves

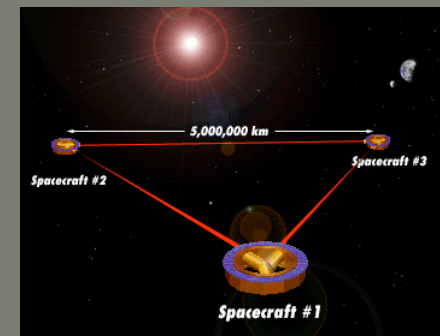
Good news from the ground interferometers



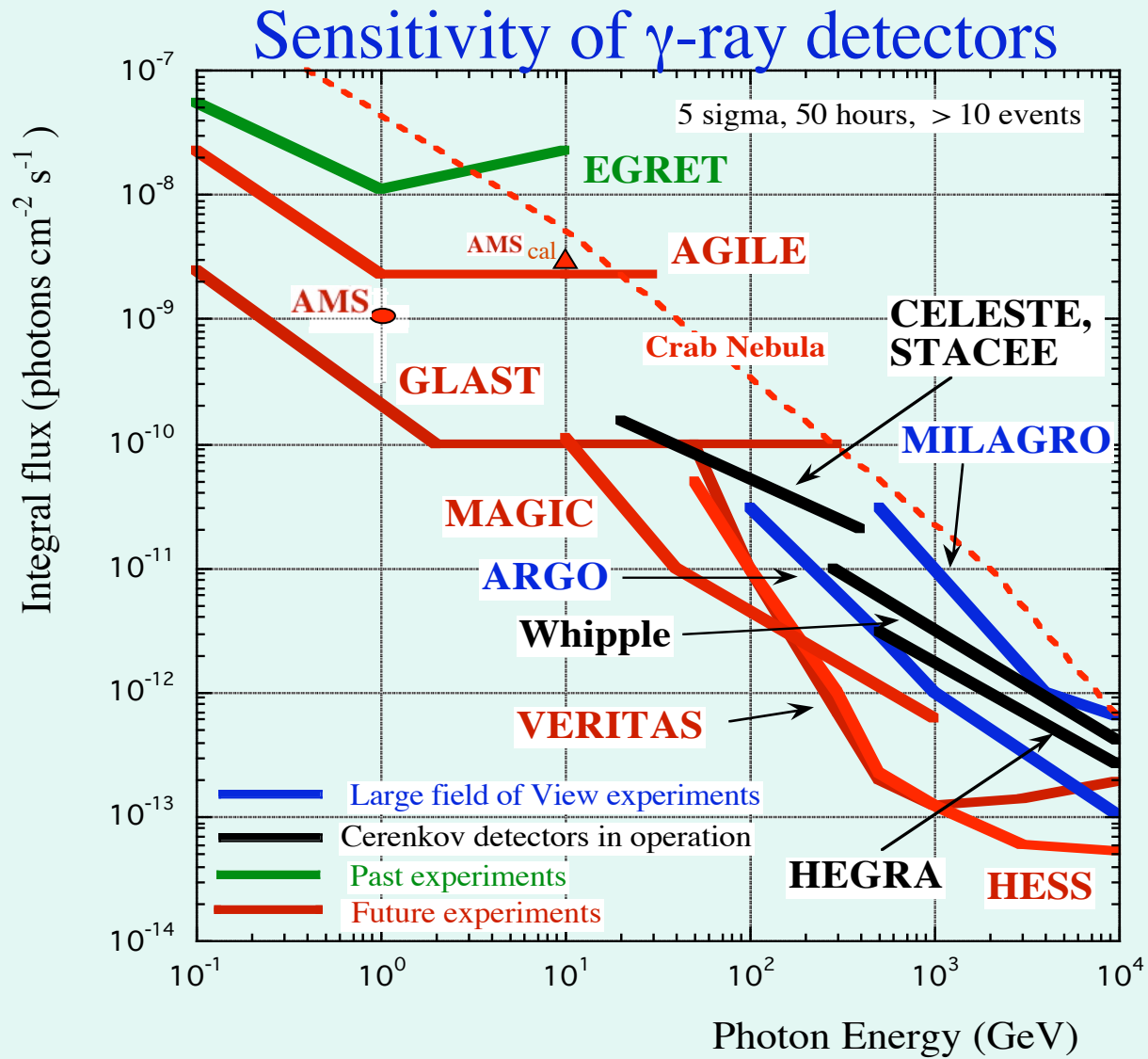
But, at this stage, detection of gravitational waves is not assured



- advanced ground interferometers
- space interferometer LISA (2012)



Future experiments : 2007



Błyski gamma

ang. Gamma Ray Bursts (GRB)

- krótkie (0.1-100s) pulsy promieni gamma z punktowych źródeł na niebie
- odkryte w 1967r. przez satelity szpiegowskie USA
- “świecą” jaśniej niż cała reszta nieba
- największe obserwowane kataklizmy
 10^{51} erg = 10^{44} J = 0.001 $M_{\text{Słońca}} c^2$
- pochodzą spoza Galaktyki
- częstość: ~3 dziennie (obecnie rejestrowane ~3/miesiąc)

Cel eksperymentu:

poszukiwanie optycznych odpowiedników błysków gamma

Projekt “ π of the Sky”

Rozwiązania zaczerpnięte z eksperymentów fizyki cząstek

- Stałe monitorowanie ~całego nieba
- Duży strumień danych
- Analiza w czasie rzeczywistym (on-line)
- Wielostopniowy system selekcji (tryger)

Realizacja

- Faza 1 - dwie kamery na ruchomym montażu ($33^\circ \times 33^\circ$)
- Faza 2 - dwa moduły po 16 nieruchomych kamer ($>\pi$ sterad)
- Kamery CCD, każda 2032×2032 pikseli
- obiektywy fotograficzne $f=50\text{mm}$, $f/2$
- rozmiar piksla $\sim 15\mu\text{m}$, pokrycie kątowe $1'$

Detektor na stanowisku testowym w Polsce



Płaskowyż Las Campanas w Chile



„ π of the Sky”: obserwacje meteorów

Wybuch bolidu zarejestrowany 2.12.2004



Egzamin

Egzamin pisemny **16 czerwca, 13³⁰ – 15³⁰, SDD**

Egzamin będzie miał formę **testu**:

50 pytań z materiału przedstawionego na wykładach,
w miarę możliwości równomiernie rozłożonych tematycznie (**~4 pytania na wykład**)

Do każdego pytania 4 odpowiedzi, z czego **dokładnie jedna** prawidłowa.

Punktacja:

- dobra odpowiedź $\Rightarrow +1$
- zła odpowiedź $\Rightarrow -0.5$ (**losowe skreślanie nie opłaca się**)

W oparciu o wyniki testu **zaproponowana** będzie **ocena**

Egzamin ustny **20 czerwca (?)**

- w sytuacjach wątpliwych (**“granicznych”**)
- w celu poprawienia zaproponowanej oceny (**gdym jest to możliwe**)

Egzamin

Przykładowe pytania testowe (z zeszłego roku):

1. Energia dostępna w zderzeniach przeciwbieżnych wiązek elektronów o energiach 1 GeV i 9 GeV wynosi
 A 8 GeV B 6 GeV C 10 GeV D 5 GeV
2. Typowe pole przyspieszające w obecnych akceleratorach cząstek to:
 A 100 kV/m B 10 MV/m C 1 GV/m D 10 MV/cm
3. Hipotezę istnienia kwarków zaproponował
 A Feynman B Fermiego C Bjorken D Gell-Mann i Zweig
4. Największy wkład do funkcji struktury F_2 protonu, mierzonej w rozpraszaniu NC DIS ep , wnoszą
 A gluony B kwarki d C kwarki s D kwarki u
5. Stosunek liczby produkowanych w atmosferze neutrino elektronowych do mionowych $\frac{N_{\nu_e}}{N_{\nu_\mu}}$ wynosi około
 A 1/2 B 2 C 3 D 1