

Fizyka neutrin i Ciemna Materia

Agnieszka Zalewska

IV rok fizyki UJ, 14 i 21.12.2007

Zakład 16 IFJ PAN:

Eksperyment ICARUS

Projekt LAGUNA

Eksperyment T2K

Eksperyment WARP

Krótkie wprowadzenie do fizyki neutrin (ze szczególnym uwzględnieniem oscylacji neutrin)

Fizyka neutrin - dynamicznie rozwijający się
dział - od blisko 10 lat średnio 3 prace dziennie
ze słowem „neutrino” w tytule - badania
fundamentalne i aplikacyjne

Czym są neutrina i skąd się biorą?

Oscylacje neutrin

Ile waży neutrino?

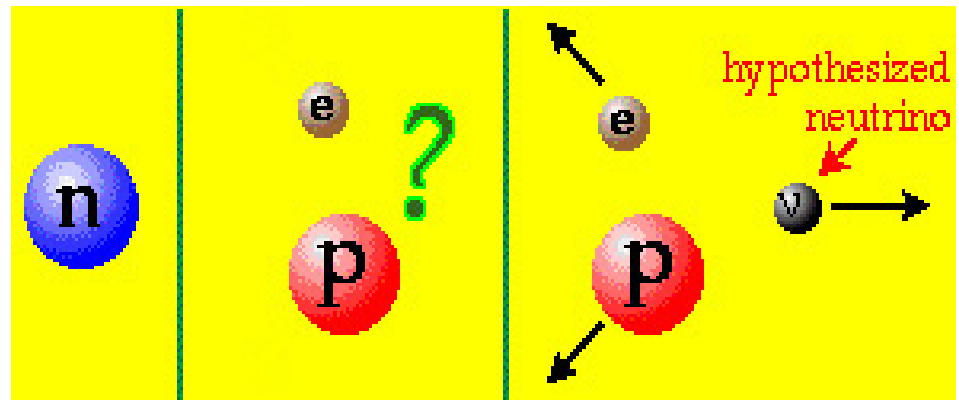
Cząstka Diraca czy Majorany?

Astrofizyka i geofizyka neutrin

Narodziny neutrino



1930 - Wolfgang Pauli postuluje istnienie nowej, neutralnej cząstki, aby ratować prawo zachowania energii i krętu w jądrowych rozpadach β

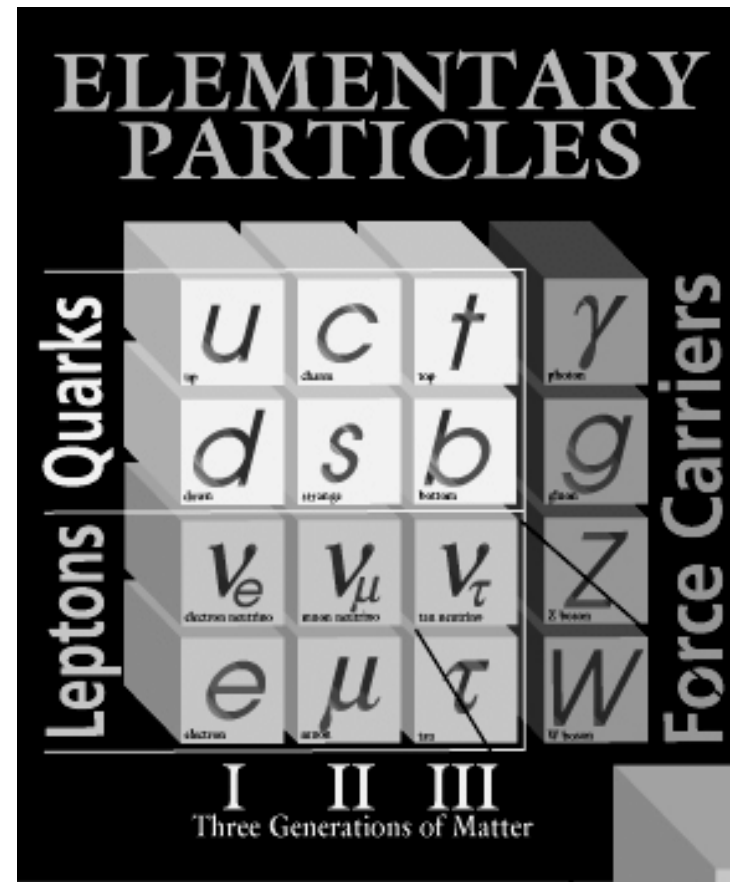


„Zrobiłem straszną rzecz. Zaproponowałem cząstkę, która nie może być wykryta. To jest coś, czego teoretyk nie powinien nigdy robić”
Wolfgang Pauli

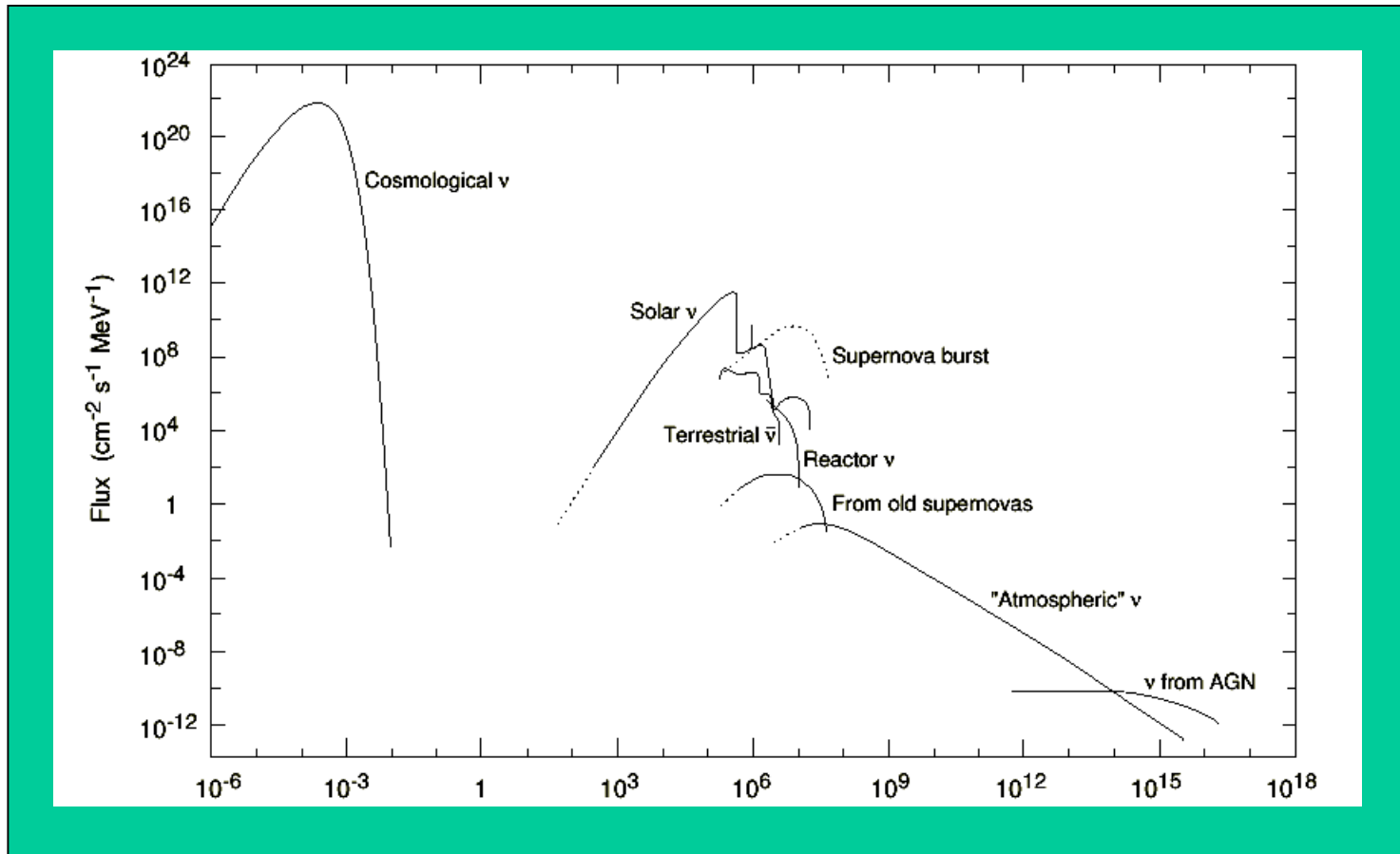
Czym są neutrina?

W Modelu Standardowym to elementarne cząstki materii

- są neutralnymi leptonami, które oddziałują wyłącznie słabo
np. średnia droga na oddziaływanie neutrin z rozpadu β neutronu w wodzie jest rzędu kilku tysięcy lat świetlnych
- drugie po fotonach, jeśli idzie o częstość występowania we Wszechświecie
- istnieją trzy rodzaje („zapachy”) lekkich neutrin
wynik bardzo dokładnych pomiarów w eksperymentach przy zderzaczu LEP



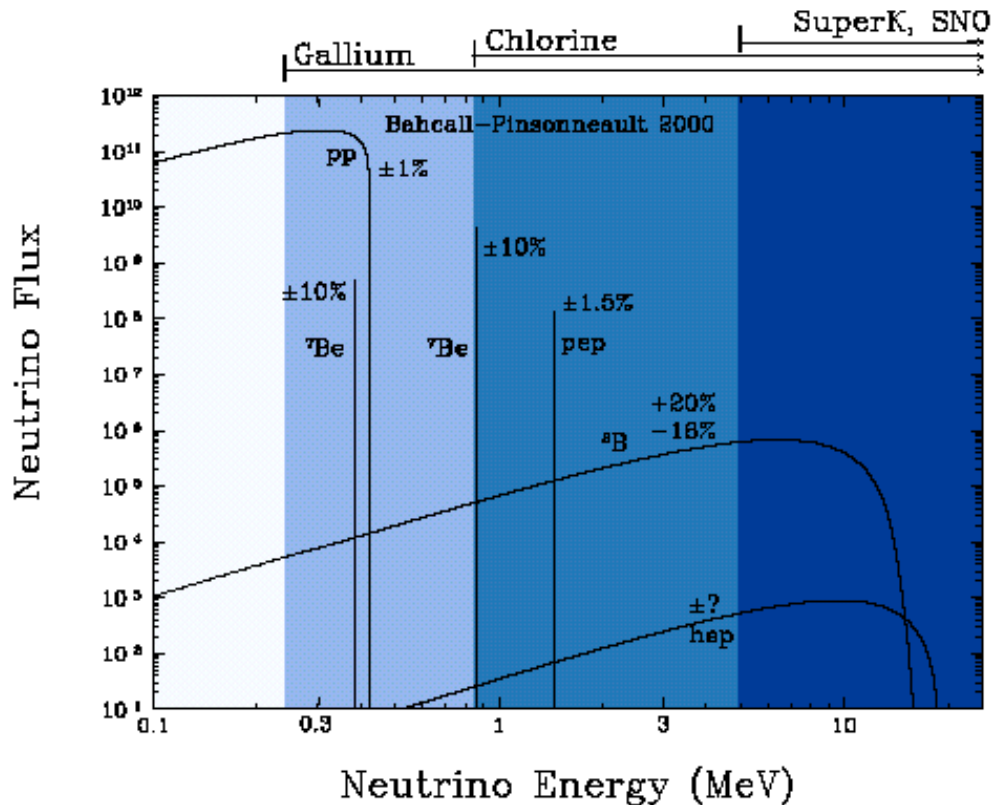
Źródła neutrin



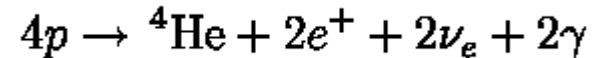
Neutrina kosmologiczne, słoneczne, z wybuchów Supernowych, z rozpadów β naturalnych pierwiastków promieniotwórczych (w tym neutrina reaktorowe), atmosferyczne i akceleratorowe oraz skrajnie wysokich energii

WWE-4 rok 14.12.2007

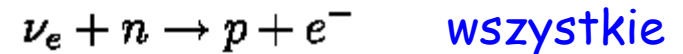
Neutrina słoneczne



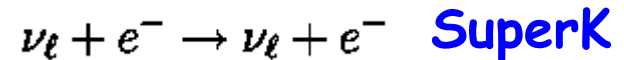
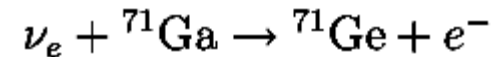
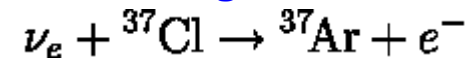
Większość neutrin słonecznych pochodzi z reakcji pp



Eksperymenty (od 1969 r) mierzą reakcje:



W szczególności:



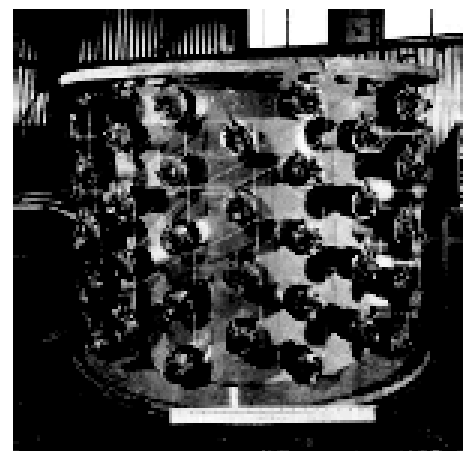
- Słoneczne ν_e powstają w samym środku Słońca
- Przez ponad 30 lat obserwowano na Ziemi niedobór ν_{ston} względem przewidywań modelu Słońca (od 40% do blisko 70%)
- Częściowe wyjaśnienie dzięki pomiarom SuperK, **całkowite -SNO**

Antyneutrina z reaktorów



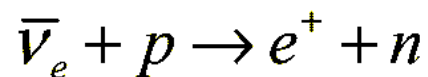
Duża siłownia
jądrowa daje
 6×10^{20} anty- ν /sek
i 3 GW mocy
cieplnej

Detector at the Savannah River
nuclear reactor



Pierwsza obserwacja oddziaływań
(anty)neutrin w eksperymencie Reinesa-
Cowana (1955) przy siłowni jądrowej

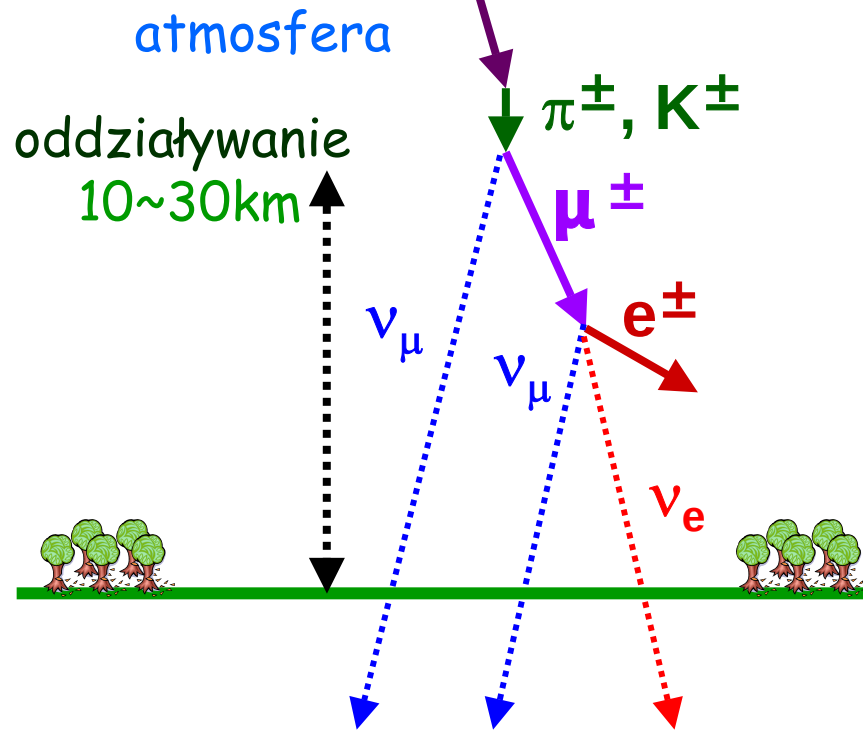
FWE-



"We are happy to inform you [Pauli]
that we have definitely detected neutrinos"

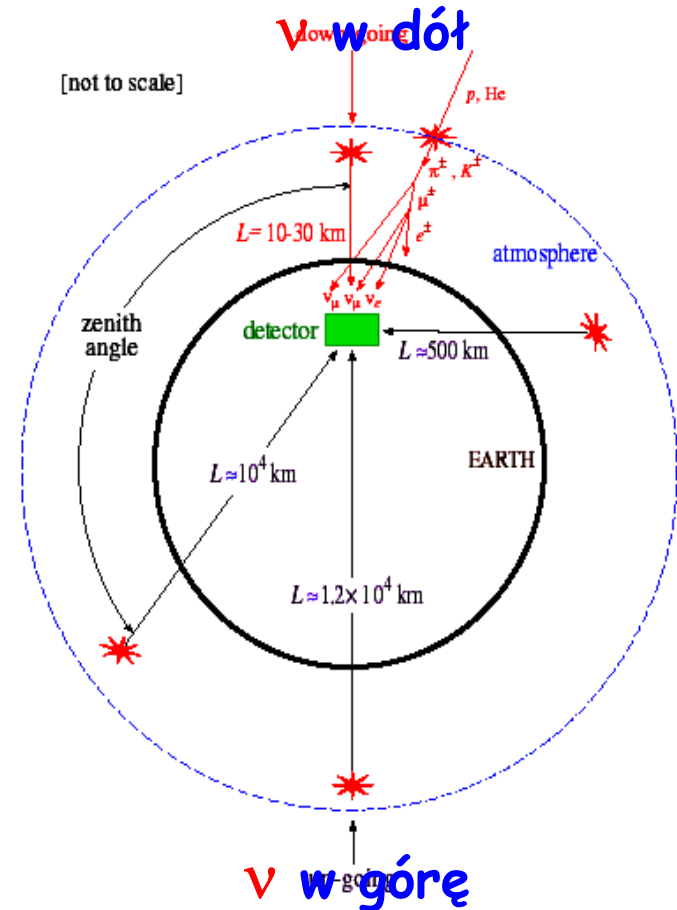
Neutrina atmosferyczne

Pierwotne promienie
kosmiczne $p, He \dots$



$$\frac{\phi(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)}{\phi(\nu_e + \bar{\nu}_e)} \begin{cases} \sim 2 (\text{dla } E_\nu < 1 \text{ GeV}) \\ > 2 (\text{dla } E_\nu > 1 \text{ GeV}) \end{cases}$$

FWF-4rok, 14.12.2007



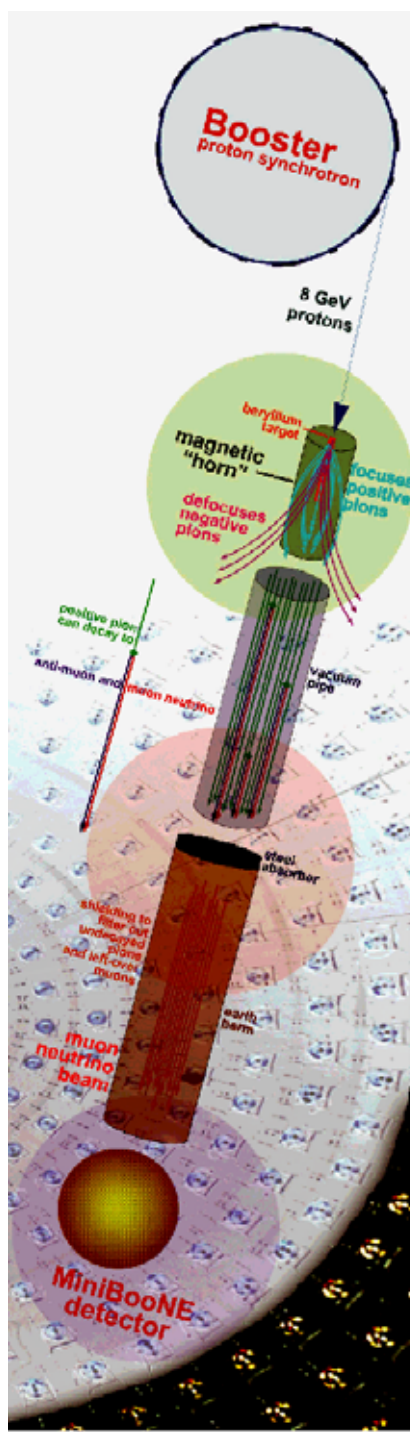
ν_{atm} - tło dla poszukiwań
rozpadu protonu

Neutrina akceleratorowe

W przypadku neutrin akceleratorowych rolę promieni kosmicznych pełnią protony przyspieszone w akceleratorze

Obecnie wykorzystywane są tylko ν_μ z rozpadów π

→ Lepsza kontrola strumienia i energii neutrin



Oscylacje neutrin

Przy założeniu dwu stanów zapachowych neutrin α i β oraz dwu stanów masowych 1 i 2, prawdopodobieństwo przejścia α w β w próżni:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E} \right)$$

gdzie $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$ wyrażone jest w $[\text{eV}^{-2}]$, L w $[\text{km}]$, a E w $[\text{GeV}]$

Δm^2 i θ (kąt mieszania stanów 1 i 2) to parametry teoretyczne, L (długość bazy pomiarowej) i E (energia neutrin) są dobierane eksperymentalnie

Wpływ materii: wzory na prawdopodobieństwa takie same jak dla oscylacji w próżni, ale efektywne masy i efektywne kąty mieszania - na razie ważny tylko w przypadku neutrin słonecznych

Oscylacje neutrin

Przykłady:

$L \sim 1 \text{ km}, E_\nu \sim 1 \text{ GeV} \Rightarrow \Delta m^2 \sim \text{eV}^2$ (eksp. NOMAD i CHORUS)

$L \sim 10^4 \text{ km}, E_\nu \sim 100 \text{ MeV} \Rightarrow \Delta m^2 \sim 10^{-5} \text{ eV}^2$ (ν_{atm} niskiej en. i średnica Ziemi)

$L \sim 10^3 \text{ km}, E_\nu \sim 1 \text{ GeV} \Rightarrow \Delta m^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$ (ν_{accel} i baza L rzędu kilkuset km)

$L \sim 10^8 \text{ km}, E_\nu \sim 10 \text{ MeV} \Rightarrow \Delta m^2 \sim 10^{-10} \text{ eV}^2$ (ν_{ston} i odległość Słońce-Ziemia)

Oscylacje neutrin słonecznych (reaktorowych) i atmosferycznych (akceleratorowych) są całkiem niezłe opisywane przez ten prosty model z udziałem dwu stanów zapachowych i dwu stanów masowych

Wiemy jednak, że są trzy rodzaje neutrin

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

5 parametrów oscylacyjnych: dwie niezależne różnice kwadratów mas, trzy kąty mieszania, faza odpowiedzialna za zachowanie/łamianie symetrii CP

neutrino atmosferyczne

faza łamiąca CP

neutrino słoneczne

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

wiąże sektor atmosferyczny i słoneczny

Aspekty eksperymentalne

Eksperymenty poszukujące sygnału β w wiązce α :

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \geq 0$$

Eksperymenty mierzące osłabienie wiązki α :

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) \leq 1$$

Liczba obserwowanych przypadków N_{obs} oddziaływań neutrin jest proporcjonalna do fizycznego przekroju czynnego na oddziaływanie σ [cm²], wielkości strumienia neutrin Φ [cm⁻²] oraz liczby atomów tarczy N na ich drodze:

$$N_{\text{obs}} \approx \sigma * \Phi * N \quad (\sigma < 10^{-40} \text{ cm}^2 \text{ dla energii rzędu MeV})$$

→ Potrzebne jak najsilniejsze źródło neutrin i wielki oraz wydajny detektor; optymalizacja eksperymentów neutrinowych polega na łącznym traktowaniu źródła neutrin, bazy pomiarowej L i detektora

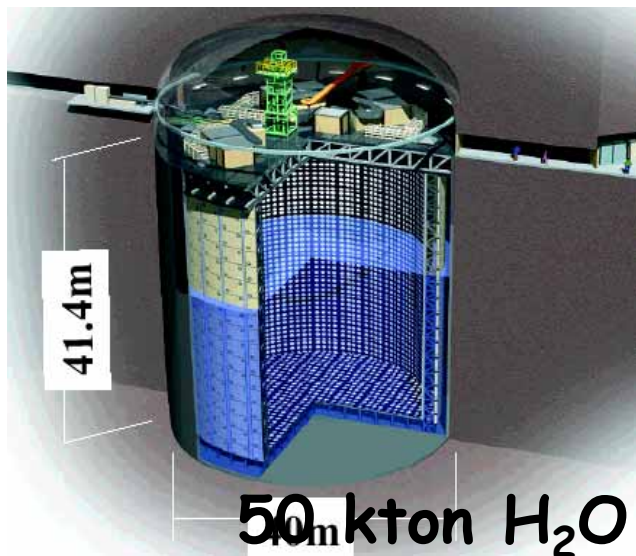
Pomiary oscylacji neutrin

1998-2002 wielkie odkrycia

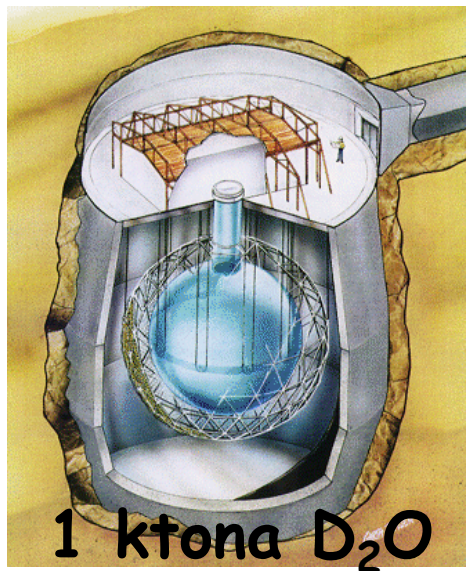
w eksperymentach SuperKamiokanie (ν atmosferyczne), K2K (akceleratorowe), SNO (ν słoneczne) i KamLAND (ν reaktorowe)

2003

początek precyzyjnych pomiarów w badaniach oscylacji neutrin



SuperKamiokanie



SNO



KamLAND

Bardzo ważne pytania

Wyniki pomiarów: kąt $\theta_{23} = 45^\circ$ (maksymalny), $\theta_{12} = 33^\circ$ (duży), $\theta_{13} < 10^\circ$ (mały), inaczej niż dla kwarków

→ Czy to przejaw jakiejś nowej symetrii przyrody?

$$\Delta m_{23}^2 \approx 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2, \Delta m_{12}^2 \approx 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2, \\ |\Delta m_{13}^2| = |\Delta m_{23}^2 - \Delta m_{12}^2|$$

→ Czy symetria CP w sektorze leptonowym jest zachowana czy jest łamana?

Pomiar możliwy, jeśli θ_{13} nie jest zbyt mały

Bardzo ważne pytanie, bo łamanie symetrii CP dla kwarków nie wystarcza dla wyjaśnienia asymetrii między materią i antymaterią

Przyszły program badań oscylacji neutrin

Potrzebne bardzo precyzyjne pomiary

Pierwsza generacja eksperymentów (rozpoczęte lub bliskie realizacji)

- lata 2005-2011:

- Eksperyment MINOS na wiązce NuMi
- • Eksperymenty OPERA i ICARUS na wiązce CNGS
- Eksperymenty Borexino (słoneczny) i Double-CHOOZ (reaktorowy)

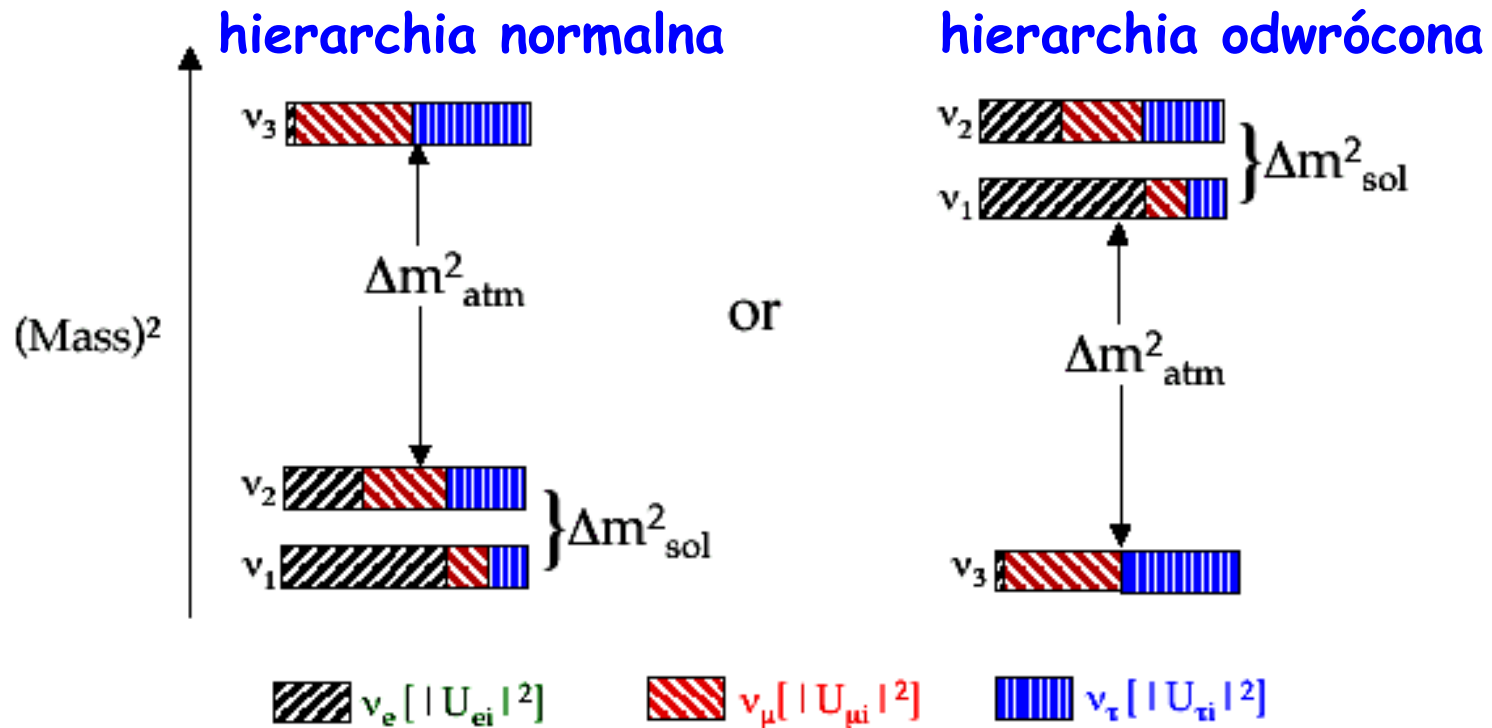
Druga generacja eksperymentów (w trakcie zatwierdzania i finalnych dyskusji) - lata 2009-2015:

- • Eksperyment T2K w Japonii na super-wiązce z Tokai do Kamioki
- Eksperyment NO ν A na wiązce (potem super-wiązce) NuMi
- Eksperymenty reaktorowe nowej generacji

Trzecia generacja eksperymentów (obecnie w realizacji tylko programy R&D) - po 2015:

- Eksperymenty na wiązках z fabryki neutrin lub wiązках β
- • Gigantyczne detektory, bardzo długie bazy pomiarowe

Masy neutrin - czego uczą oscylacje



→ Najcięższe z neutrin musi mieć masę większą niż 50 meV

Dwa ważne pytania:

Gdzie jest zero na tej skali masy?

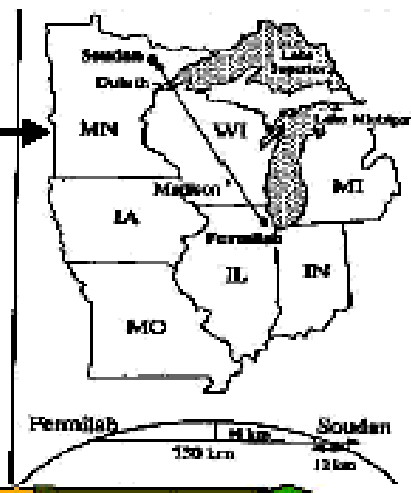
Czy hierarchia jest normalna czy odwrócona względem Δm^2_{atm}

Eksperyment ICARUS w podziemnym laboratorium Gran Sasso

Amerykański i europejski projekt eksperymentów z długą bazą pomiarową

- ♦ NuMi - wiązka z FNAL do detektora MINOS w kopalni Soudan pod granicą kanadyjską, start w styczniu 2005 roku
- ♦ CNGS - wiązka z CERN-u do Gran Sasso do detektorów OPERA i ICARUS, start w 2006 roku

**USA: NUMI
(732 km)**



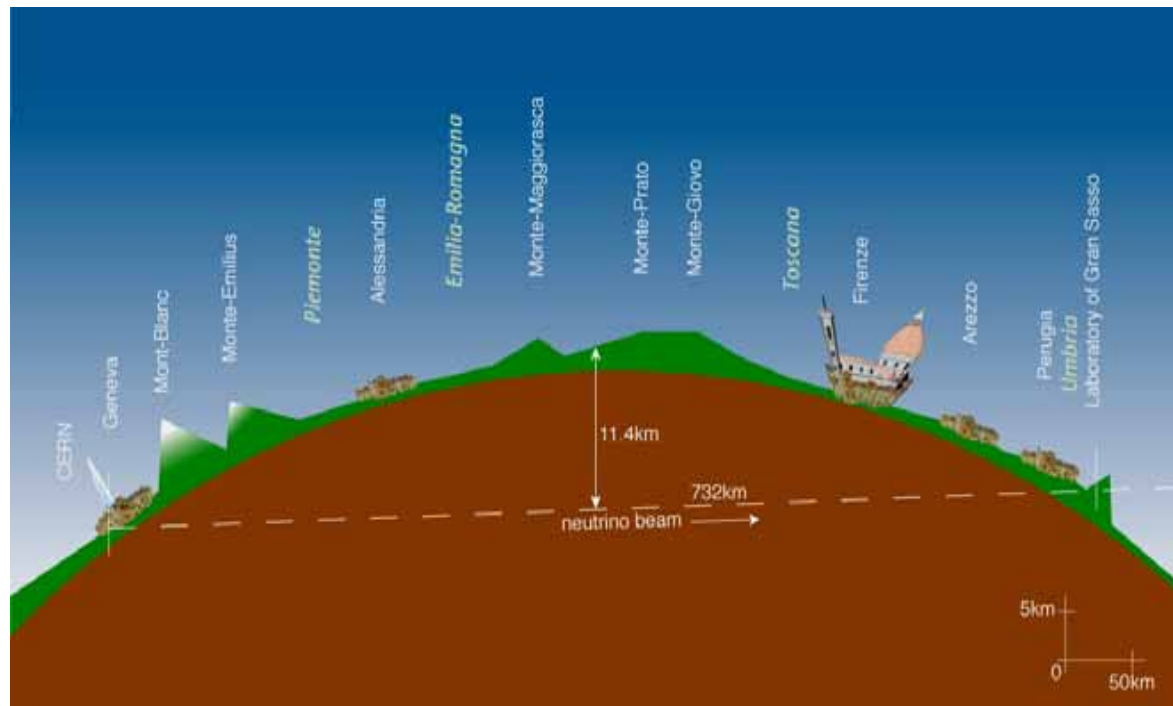
**Europe: NGS
(732 km)**



Program CNGS

→ CNGS — wiązka wysokoenergetycznych neutrin mionowych z CERN-u do Gran Sasso, program nastawiony na zaobserwowanie oddziaływań neutrin taonowych (i elektronowych) pochodzących z oscylacji neutrin mionowych, start w 2006 roku

ν_μ



ν_τ

ν_e

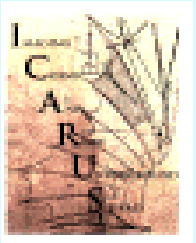
Wiązka neutrin z CERN-u do Gran Sasso

CERN



Gran Sasso





Eksperyment ICARUS

(Imaging Cosmic And Rare Underground Signals)

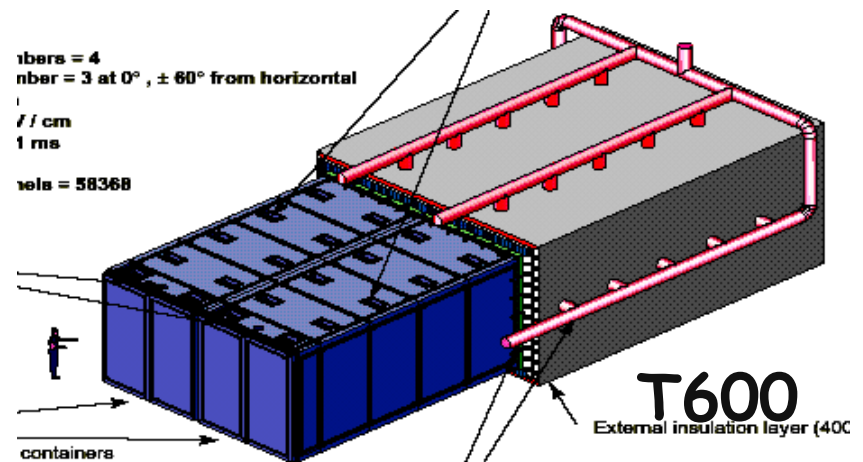
Problematyka fizyczna:

Badanie oddziaływań neutrin słonecznych, atmosferycznych, z wybuchu Supernowej i z wiązki akceleratorowej CNGS oraz poszukiwanie rozpadu protonu przy użyciu wielkich komór TPC wypełnionych ciekłym argonem.

Dwa etapy:

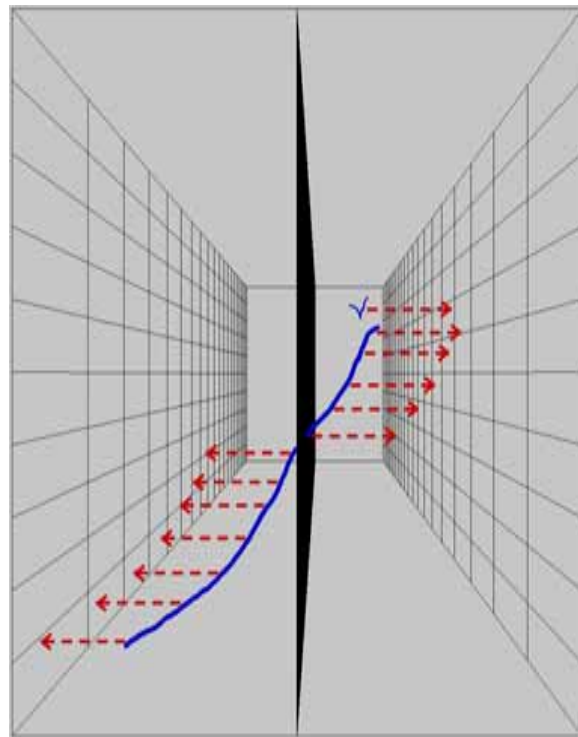
→ T600 - detektor o całkowitej masie 600 ton, instalacja w Gran Sasso rozpoczęta

Detektor o całkowitej masie kilku kton - program R&D



ICARUS - wielkie komory TPC wypełnione ciekłym argonem

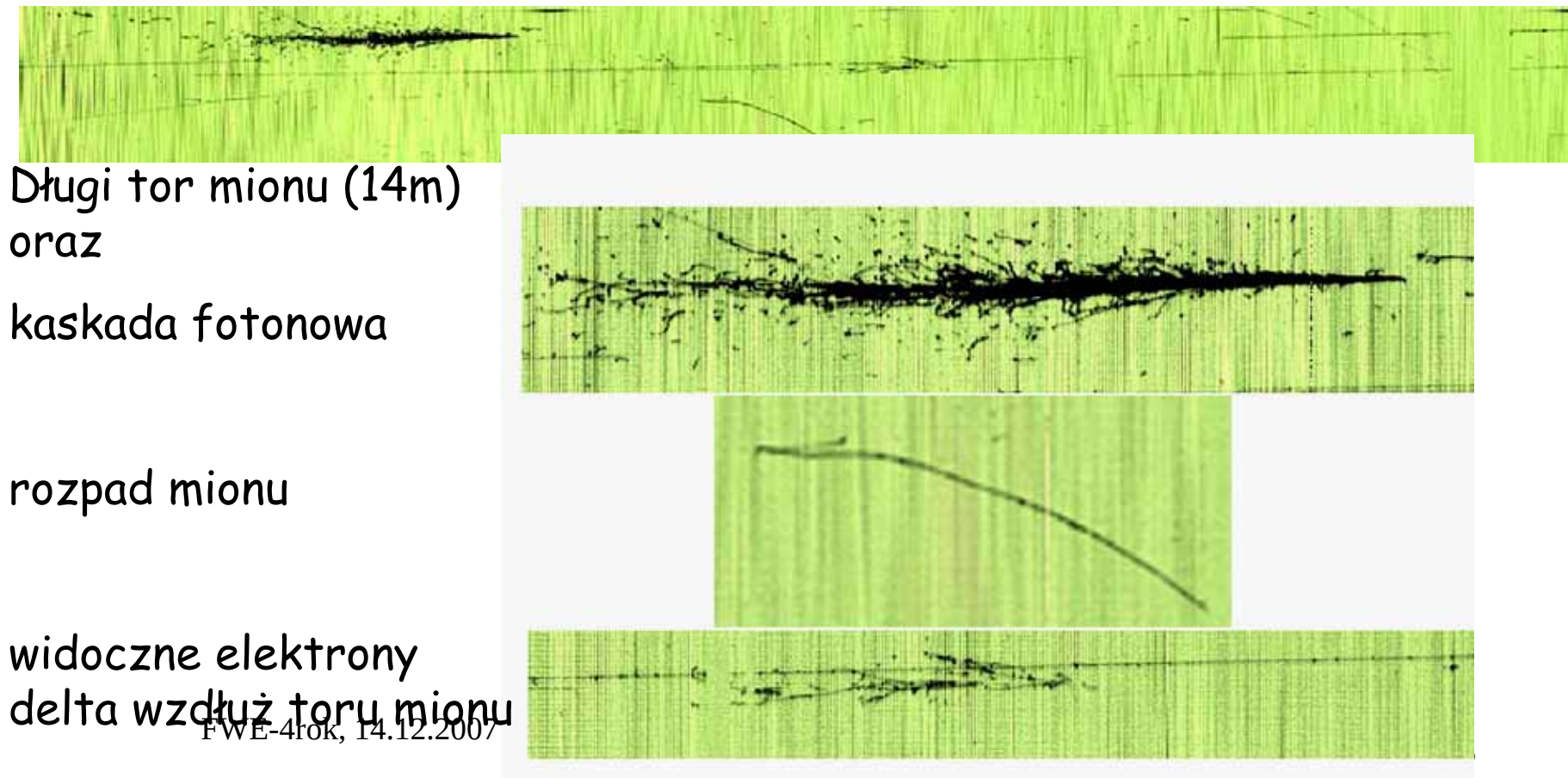
- Wykorzystywane zjawisko jonizacji w ciekłym argonie wzdłuż torów cząstek naładowanych, trójwymiarowy obraz przypadku oddziaływania w oparciu o pomiar sygnałów na drutach (dwie współrzędne) i o pomiar czasu dryfu (trzecia współrzędna).
- Uniwersalny detektor dla fizyki neutrin, pozwalający na równoczesne rejestrowanie oddziaływań neutrin słonecznych, atmosferycznych i neutrin z wiązki



T600-dane z testów pierwszej komory TPC

Technika eksperymentalna: całkowicie elektroniczny detektor, dający trójwymiarowy obraz przypadku oddziaływania o jakości porównywalnej z obrazami z komór pęcherzykowych oraz bardzo dobry pomiar energii w oparciu o pomiar strat energii na jonizację w ciekłym argonie.

Przykładowy przypadek:



**Europejski projekt LAGUNA
- wielkie detektory
w przyszłym podziemnym laboratorium**

Co to jest LAGUNA?

Akronim LAGUNA oznacza „Large Apparatus studying Grand Unification and Neutrino Astrophysics”

Projekt skupia większość europejskich grup zainteresowanych budową wielkiego detektora o masie rzędu $10^5 - 10^6$ ton w technologiach wykorzystujących ciecze: wodę, ciekły argon i ciekły scyntylator

Żadne z istniejących podziemnych laboratoriów nie jest w stanie pomieścić tak wielkiego detektora → potrzebne jest nowe, wielkie laboratorium

Wystąpienie o europejski projekt typu studyjnego (design study) w ramach FP7 (2.05.2007), którego głównym celem jest wybór optymalnej lokalizacji nowego laboratorium.

Mapa drogowa ApPEC, styczeń 2007

Field/ Experiments	Cost scale (M€)	Desirable start of construction	Remarks
Dark Matter Search: Low background experiments with 1-ton mass	60-100 M€	2011-2013	2 experiments (different nuclei, different techniques), e.g. 1 bolometric, 1 noble liquid; more than 2 worldwide.
Proton decay and low energy neutrino astronomy: Large infrastructure for p- decay and ν astronomy on the 100kt-1Mton scale	400-800 M€	2011-2013	- multi-purpose - 3 different techniques; large synergy between them. - needs huge new excavation - expenditures likely also after 2015 - worldwide sharing - possibly also accelerator neutrinos in long baseline experiments
The high energy universe: <u>Gamma rays:</u> Cherenkov Telescope Array CTA <u>Charged Cosmic Rays:</u> Auger North <u>Neutrinos:</u> KM3NeT	100 M€ (South) 50 M€ (North) 85 M€ 300 M€	first site in 2010 2009 2011	Physics potential well defined by rich physics from present gamma experiments Confirmation of physics potential from Auger South results expected in 2007 FP6 design study. Confirmation of physics potential from IceCube and gamma ray telescopes expected in 2008-2010
Gravitational Waves: Third generation interferometer	250-300 M€	Civil engineering 2012	Conceived as underground laboratory

COLLABORATIVE PROJECT

2.05.2007

Design Study

FP7-INFRASTRUCTURES-2007-1

<u>Proposal title (max 200 characters)</u>	<u>Design of a pan-European Infrastructure for Large Apparatus studying Grand Unification and Neutrino Astrophysics</u>
<u>Proposal acronym</u>	<u>LAGUNA</u>
<u>Type of funding scheme</u>	<u>RI design study implemented as Collaborative Project</u>
<u>Work programme topics addressed</u>	<u>Deep underground science, particle physics, astroparticle physics</u>
<u>Name of the coordinating person</u>	<u>Prof. André Rubbia</u>

List of participants:

Participant no.	Participant organisation name	Country
1. ETH Zurich	Swiss Federal Institute of Technology Zurich	Switzerland
2. U-Bern	University of Bern	Switzerland
3. U-Jyväskylä	University of Jyväskylä	Finland
4. U-Oulu	University of Oulu	Finland
5. Rockplan	Kalliosuunnittelu Oy Rockplan Ltd	Finland
6. CEA/ DSM/ DAPNIA	Commissariat à l'Energie Atomique /Direction des Sciences de la Matière	France
7. IN2P3	Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (CNRS/IN2P3)	France
8. MPG	Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V.	Germany
9. TUM	Technische Universität München	Germany
10. U-Hamburg	Universität Hamburg	Germany
11. IFJ PAN	H.Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics of the Polish Academy of Sciences, Krakow	Poland
12. IPJ	A.Soltan Institute for Nuclear Studies	Poland
13. US	University of Silesia	Poland
14. UWr	Wroclaw University	Poland
15. KGHM CUPRUM	KGHM CUPRUM Ltd Research and Development Centre	Poland
16. IGSMiE PAN	Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences	Poland
17. LSC	Laboratorio Subteraneo de Canfranc	Spain
18. UGR	University of Granada	Spain
19. UDUR	University of Durham	United Kingdom
20. U-Sheffield	The University of Sheffield	United Kingdom
21. Technodyne	Technodyne International Ltd	United Kingdom
22. ETL	Electron Tubes	United Kingdom
23. U-Aarhus	University of Aarhus	Denmark
24. AGT	AGT Ingegneria Srl, Perugia	Italy

Table 1.3 a: Work package list

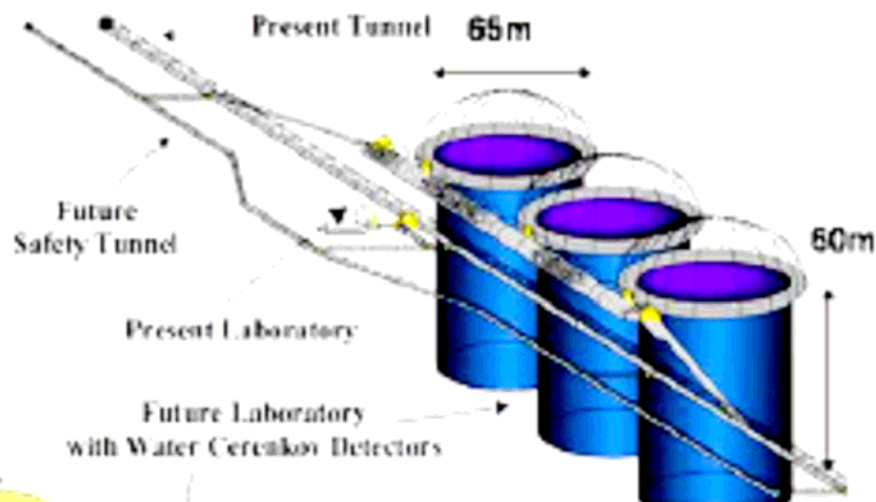
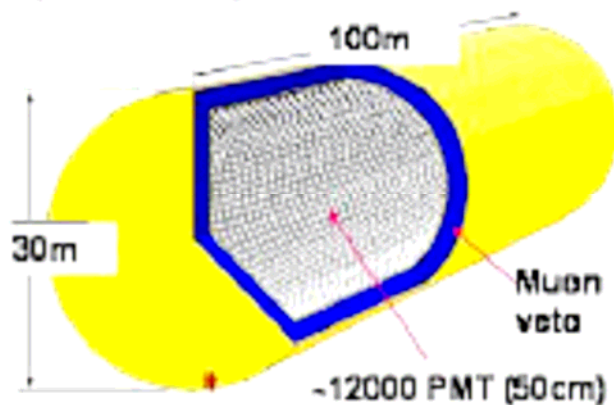
Work package no.	Work package title	Type of activity	Lead participant no.	Person-months	Start month	End month
WP1	Management, coordination and assessment	MGT	ETHZ	52	1	36
WP2	Underground Infrastructures and Engineering	RTD	U-Oulu	221	1	35
WP3	Tank Infrastructure and Liquid Handling	RTD	TUM	249	1	35
WP4	Tank Instrumentation and Data Handling	RTD	IN2P3	439	1	35
WP5	Safety and environmental issues	RTD	U-Sheffield	65	1	35
WP6	Science Impact and Outreach	RTD	IFJ PAN	454	1	35
	TOTAL			1480		

Koncepcje detektorów

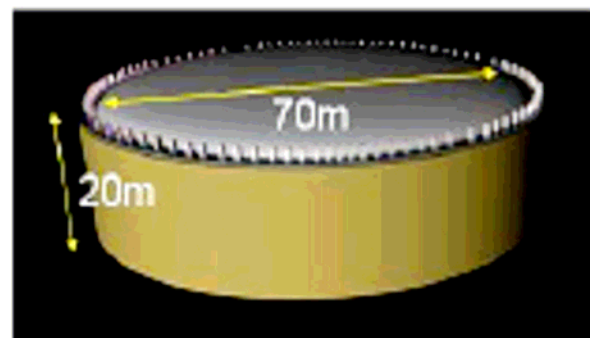
Wodny (MEMPHYS), scyntylacyjny (LENA), ciekło-argonowy (GLACIER)

MEMPHYS:
Water Cherenkov,
(420 kton - 1 Mton)

LENA:
Liquid Scintillator
(30-70 kton)



GLACIER: Liquid Argon (50 - 100 kton)



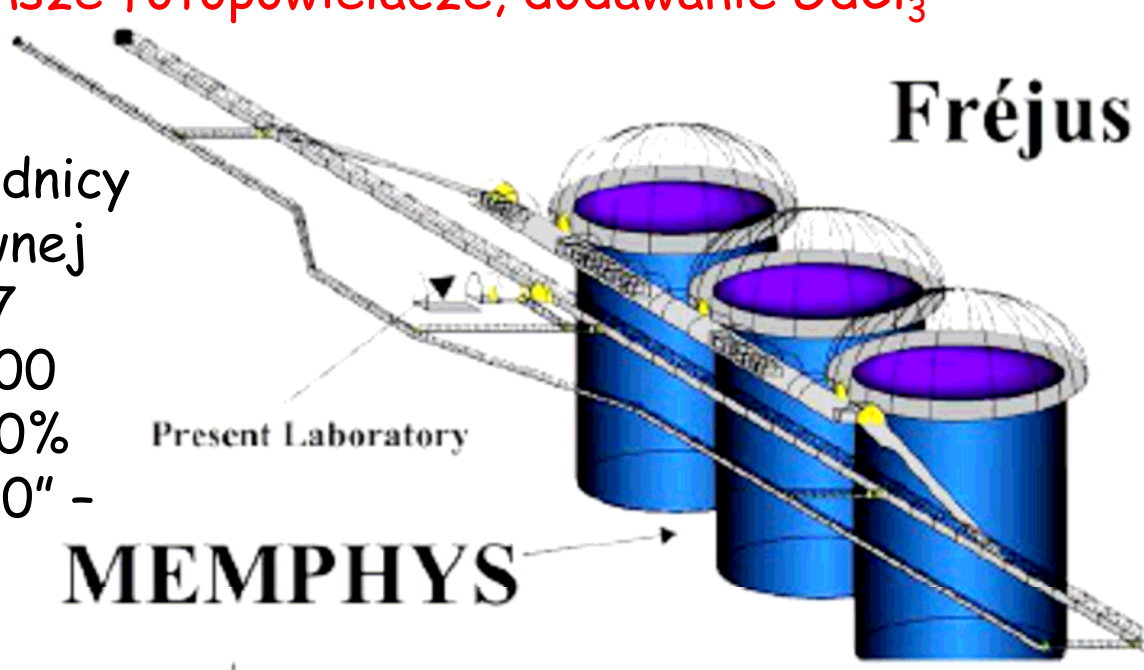
Wodny detektor MEMPHYS

Koncepcja: pierwotnie rozwijana dla laboratorium Frejus, pierwowzór detektor SuperKamiokande

Zalety: najtańszy materiał tarczy, dobrze opanowana technologia, możliwa ekstrapolacja do masy rzędu 1 Mtony

Wyzwania: lepsze i tańsze fotopowielacze, dodawanie $GdCl_3$

Konstrukcja: 3-5 zbiorników, każdy o średnicy i wysokości 65 m, aktywnej masie detektora ok. 147 kton, odczyt przez 81000 fotopowielaczy (12" - 30% pokrycia powierzchni, 20" - 40% pokrycia)



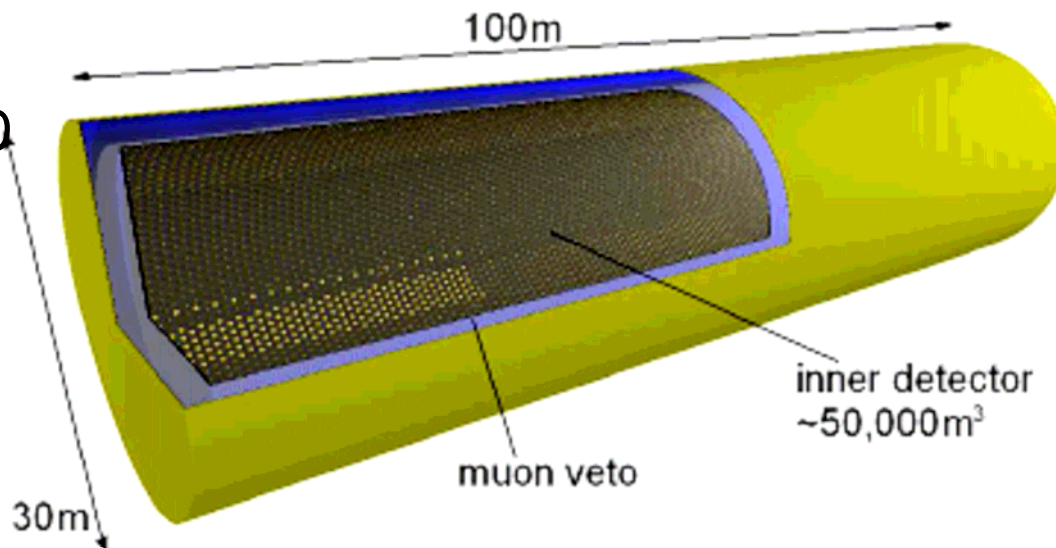
Scyntylacyjny detektor LENA

Koncepcja: pierwotnie rozwijana dla laboratorium Pyhäsalmi (Finlandia), pierwowzór - detektory Borexino i KamLAND

Zalety: niski próg energetyczny, dobra energetyczna zdolność rozdzielcza, znana technologia

Wyzwania: lepszy i tańszy odczyt światła (fotopowielacze, koncentratory światła)

Konstrukcja: cylinder o średnicy 30 m i długości 100 m, pomiarowej masie detektora ok. 50 kton, odczyt przez 12 000 fotopowielaczy (20" - 30% pokrycia powierzchni, z koncentratorami światła - 50% pokrycia)



Ciektło-argonowy detektor GLACIER

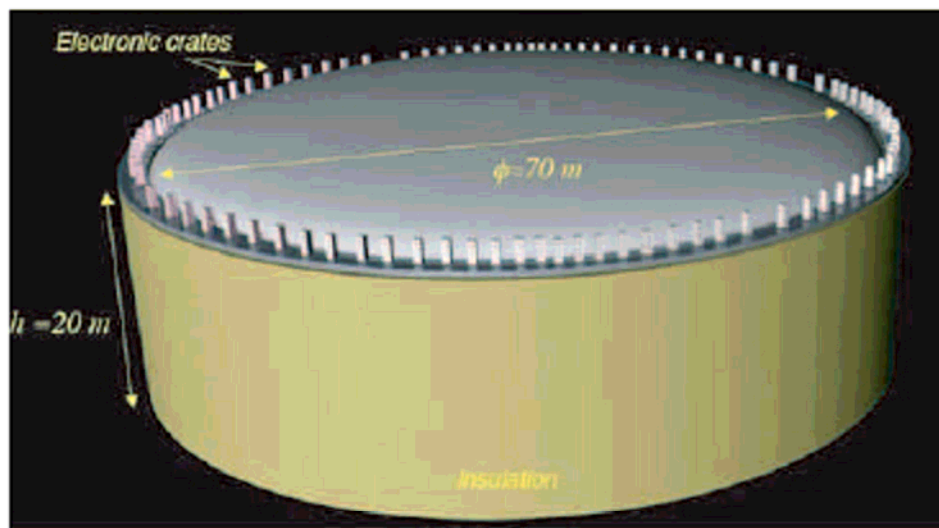
Koncepcja: pierwotnie rozwijana dla Sieroszowic i Gran Sasso
pierwowzór - detektor ICARUS

Zalety: bardzo dobra przestrzenna i energetyczna zdolność rozdzielcza → obrazowanie topologii, identyfikacja cząstek

Wyzwania: 20-metrowy dryf elektronów, wielka instalacja kriogeniczna, termiczna izolacja zbiornika

Konstrukcja: cylinder o średnicy 70 m i wysokości 100 m, masa detektora ok. 100 kton, odczyt elektronów jonizacji oraz światła (scyntylacje - 1000 8" PMT, promieniowanie Czerenkowa - 27000 8" PMT)

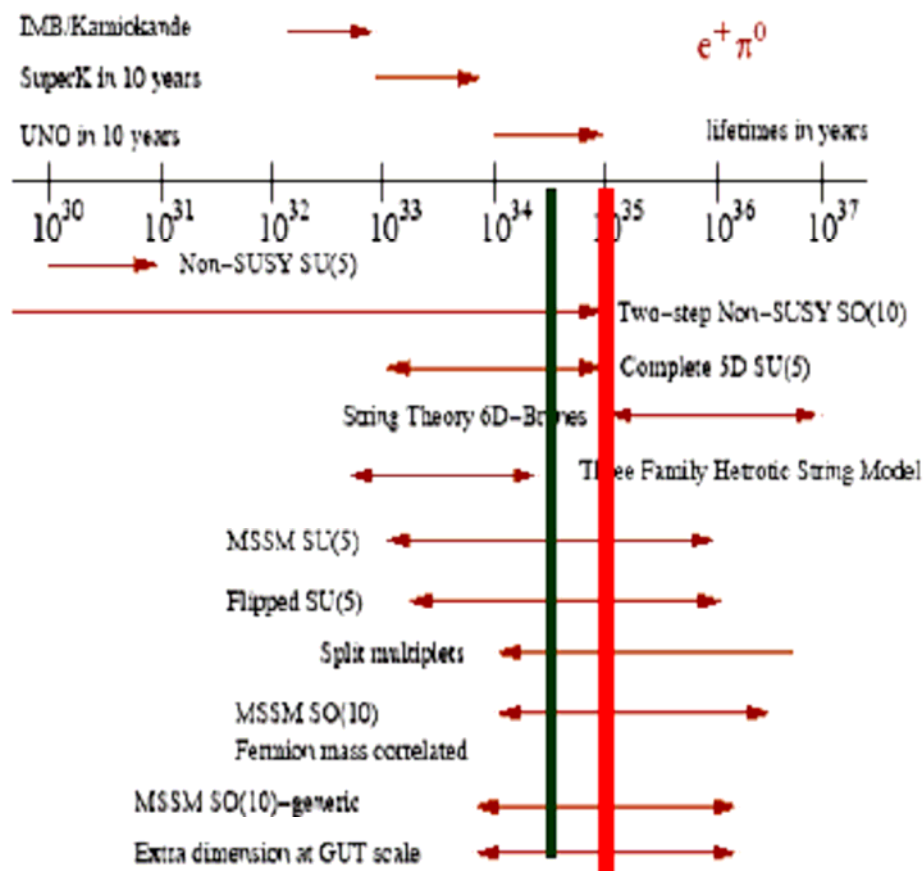
FWE-4rok, 14.12.2007



Program fizyczny

1. Poszukiwania rozpadu protonu
2. Badania nisko-energetycznych neutrin/antyneutrin pochodzenia astrofizycznego (z wybuchu SN, słoneczne, atmosferyczne, z tła od starych wybuchów SN w obrębie naszej galaktyki) oraz geo-neutrin
3. Badania własności neutrin w oparciu o wiązki akceleratorowe

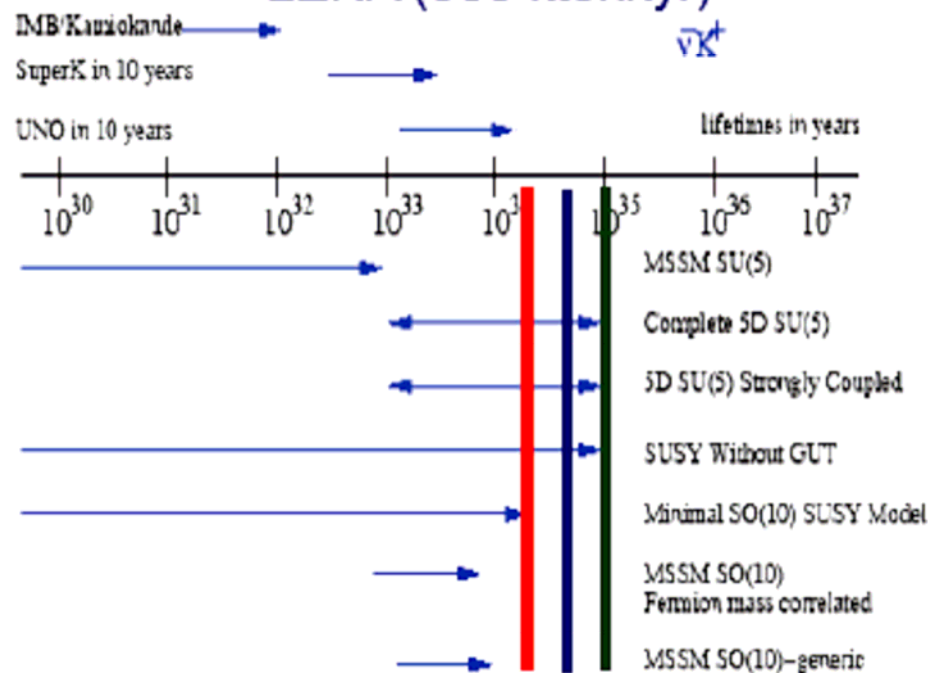
Rozpad protonu – pomiary, porównanie z teorią



MEMPHYS (10 Mtonxyr)

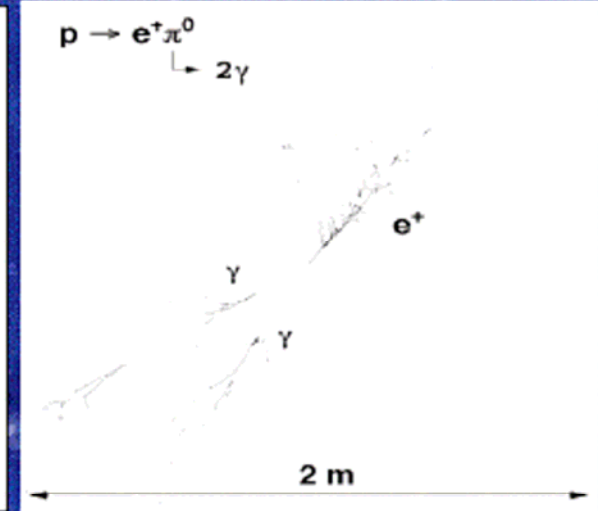
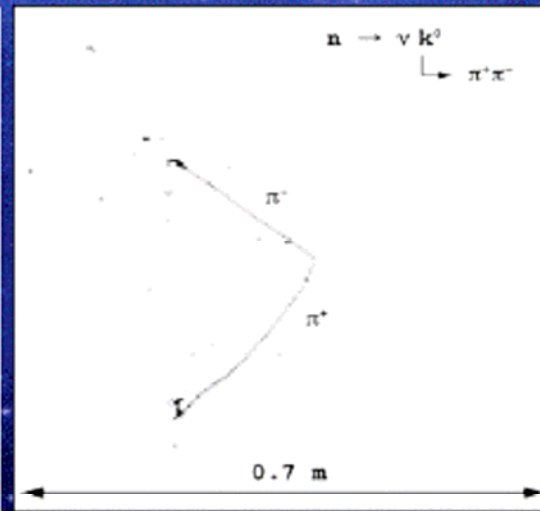
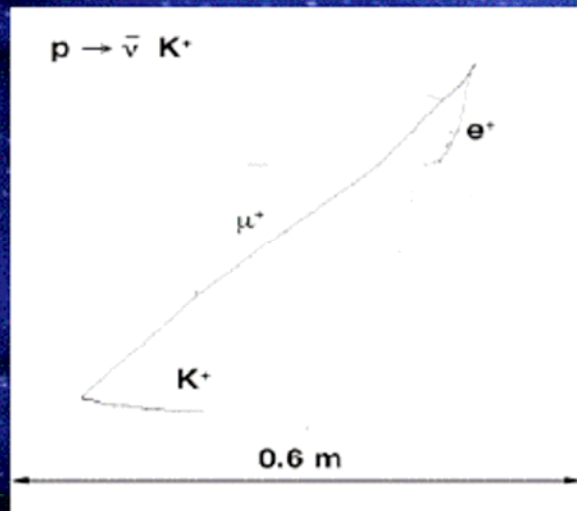
GLACIER (1000 ktonxyr)

LENA (500 ktonxyr)



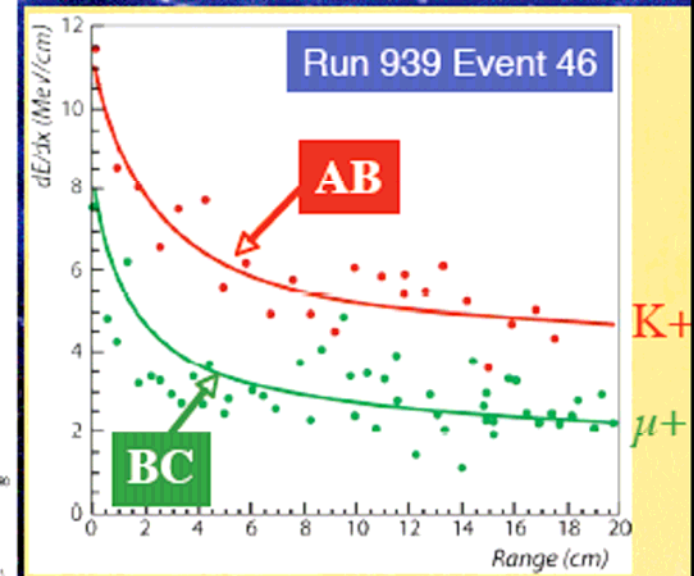
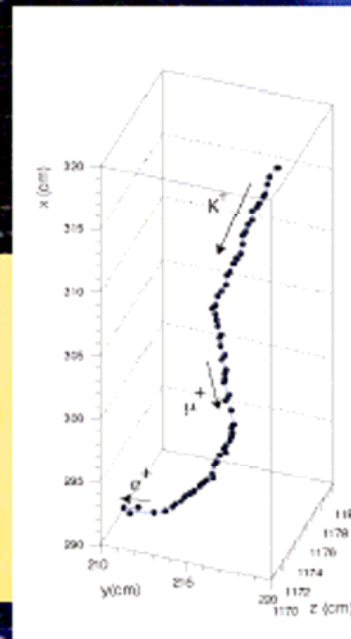
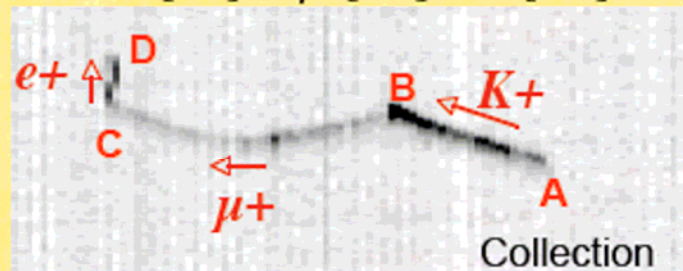
Lista zawiera tylko wybrane, najprostsze modele

Rozpad protonu w ciekło-argonowej TPC

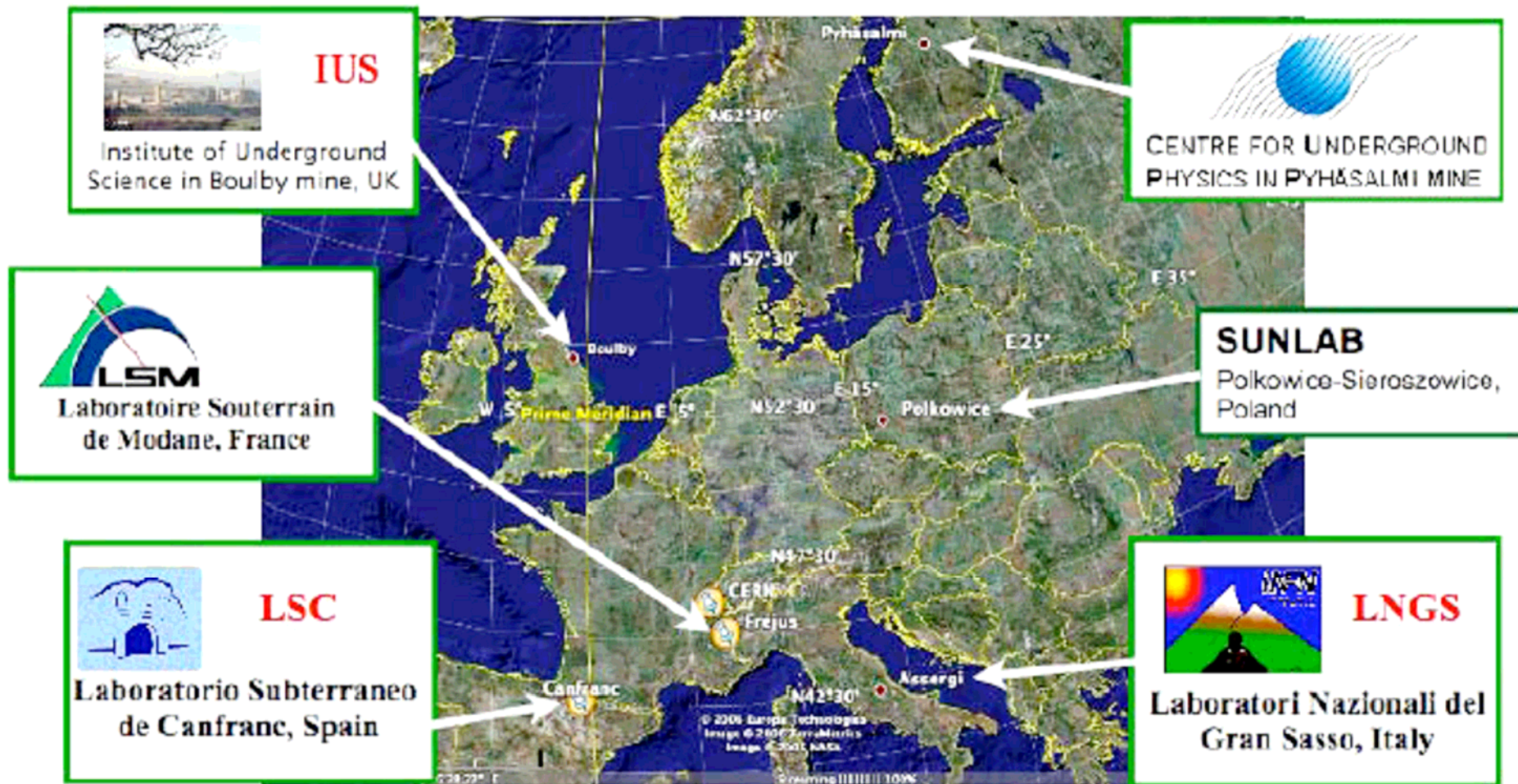


An example of
real event:

$$K^+[AB] \rightarrow \mu^+[BC] \rightarrow e^+[CD]$$

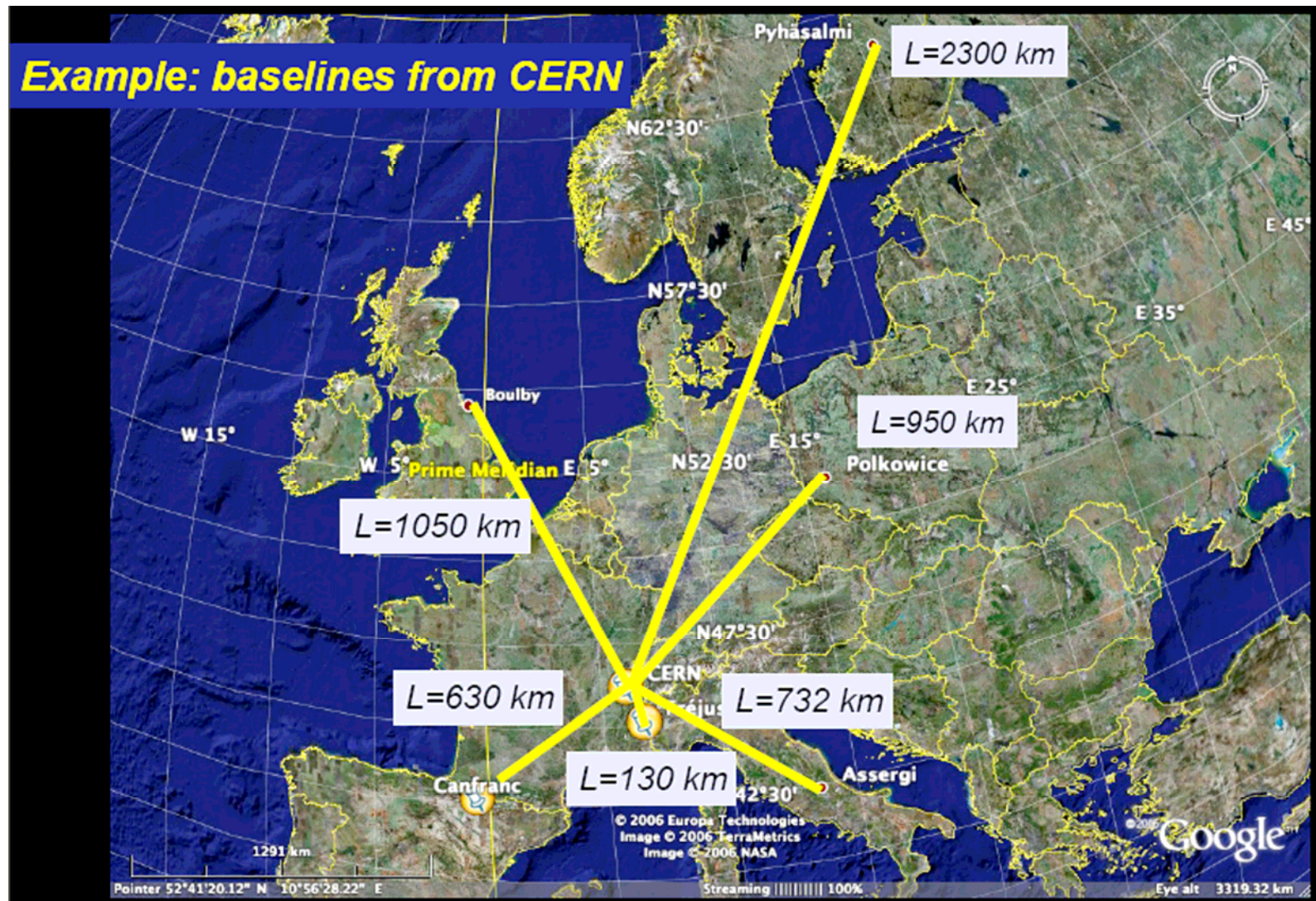


Lokalizacja podziemnego laboratorium



Istniejące i powstające podziemne laboratoria europejskie

Różne aspekty lokalizacji podziemnego laboratorium: warunki geologiczne, głębokość, tło od naturalnej promieniotwórczości i tło reaktorowe, odległość od CERN-u



SUNLAB - Sieroszowice Underground Laboratory



Południowo-wschodnia Polska,
nieдалeko Wrocławia → blisko jest
lotnisko i dobry dojazd z Niemiec
autostradą A4

Kopalnia Sieroszowice
(należy do holdingu KGHM)



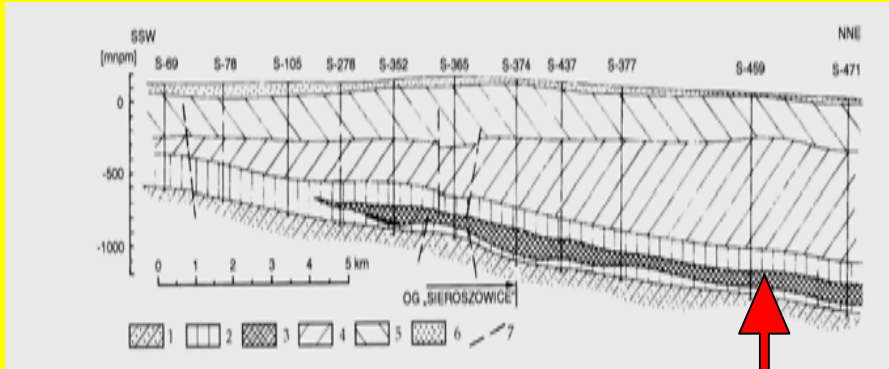
FWE-4rok, 14.12.2007



Rejon kopalni miedzi (6-ta pozycja
w świecie w wydobyciu miedzi i 2-ga
w wydobyciu srebra



Gruba warstwa soli powyżej rud miedzi



Przekrój geologiczny - sól

Istniejąca wielka komora solna:

- objętość: $85 \times 15 \times 20 \text{ m}^3$
- na głębokości ~950 m pod powierzchnią ziemi (2200 m.w.e.)
- bardzo niska wilgotność, temperatura $\sim 35^\circ$

Monitorowany ruch ścian od blisko 10 lat

FWE-4rok, 14.12.2007



Fotografie z pomiarów - lata 2004-2006



Bardzo niski poziom naturalnej promieniotwórczości

Radiochemiczne pomiary zawartości uranu, toru i potasu

Sól:

U-238: 0.0165+-0.0030 Bq/kg

U-234: 0.0225+-0.0030 Bq/kg

Th-232: 0.008+-0.001 Bq/kg

K-40: 4.0 +-0.9 Bq/kg

(average ~2.3 +- 0.3 BG/kg)

Anhydryt:

U-238: 0.82+-0.10 Bq/kg

U-234: 0.76+-0.09 Bq/kg

Th-232: 0.52+-0.15 Bq/kg

Th-230: 1.26+-0.24 Bq/kg

Pomiary dawki przy użyciu detektorów TL (czas integracji 8 miesięcy)



1.8 nGy/godz, podobna wartość dla 11 zestawów detektorów (w Krakowie, 1m pod powierzchnią ziemi dawka wynosi 65 nGy/godz)

Radon głównie na skutek wentylacji

PWE-410k, 14.12.2007