



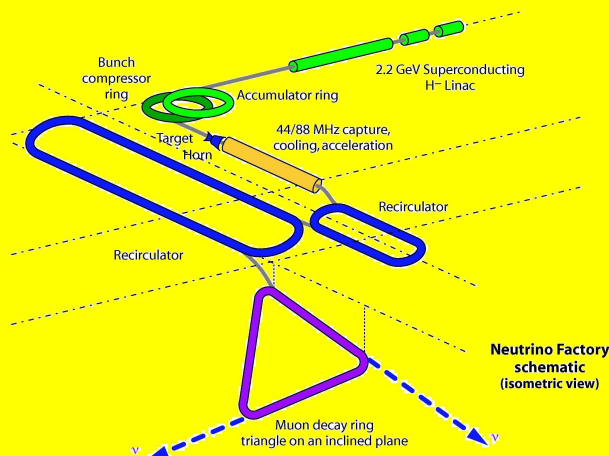
Neutrino Factories

Alessandra Tonazzo

Università Roma Tre

ORGANISATION EUROPÉENNE POUR LA RECHERCHE NUCLÉAIRE
CERN EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH

ECFA/CERN STUDIES OF A
EUROPEAN NEUTRINO FACTORY COMPLEX



Edited by

A. Blondel, G. Buchalla, M. Campanelli, J. Ellis, J.J. Gomez Cadenas,
G. Giudice, P. Gruber, H. Haseroth, P. Hernandez, A. Kataev, S. Kraml,
M. Mangano, M. Mezzetto, W.J. Murray, A. van der Schaaf

GENEVA
2004



Yellow Report
CERN-2004-002
ECFA/04/230

Ulteriori informazioni:
<http://muonstoragerings.cern.ch>

Altri studi in corso
per la realizzazione
di una Neutrino Factory:

► USA

[http://www.cap.bnl.gov/mumu/
mu_home_page.html](http://www.cap.bnl.gov/mumu/mu_home_page.html)

► UK

[http://hepunx.rl.ac.uk/
neutrino-factory/](http://hepunx.rl.ac.uk/neutrino-factory/)

► Giappone

[http://www-prism.kek.jp/
nufactj/index.html](http://www-prism.kek.jp/nufactj/index.html)

Misura dei parametri delle oscillazioni di ν

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

ν atmosferici
fase δ $\not{C}P$ leptonica
 ν solari

Super-K $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$
 $\Delta m^2_{23} = (2.0 \pm 0.4) 10^{-3} \text{eV}^2$
 $0.9 < \sin^2 \theta_{23} < 1$

Chooz
 $\sin^2(2\theta_{13}) < 0.1$

Solari+KAMLAND $P(\nu_e \rightarrow \nu_x)$
 $\Delta m^2_{12} = (7 \pm 1) 10^{-5} \text{eV}^2$
 $0.2 < \sin^2 \theta_{12} < 0.5$

Il futuro: Esperimenti "Long Baseline"

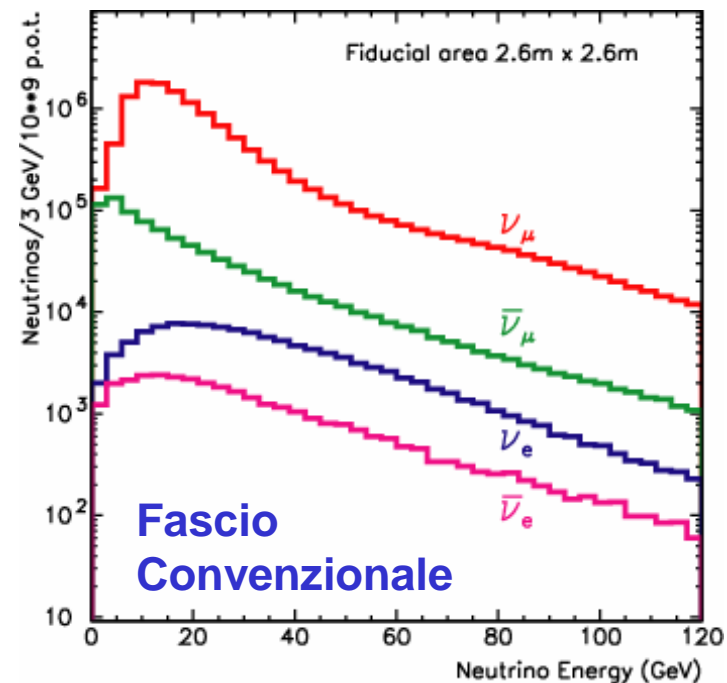
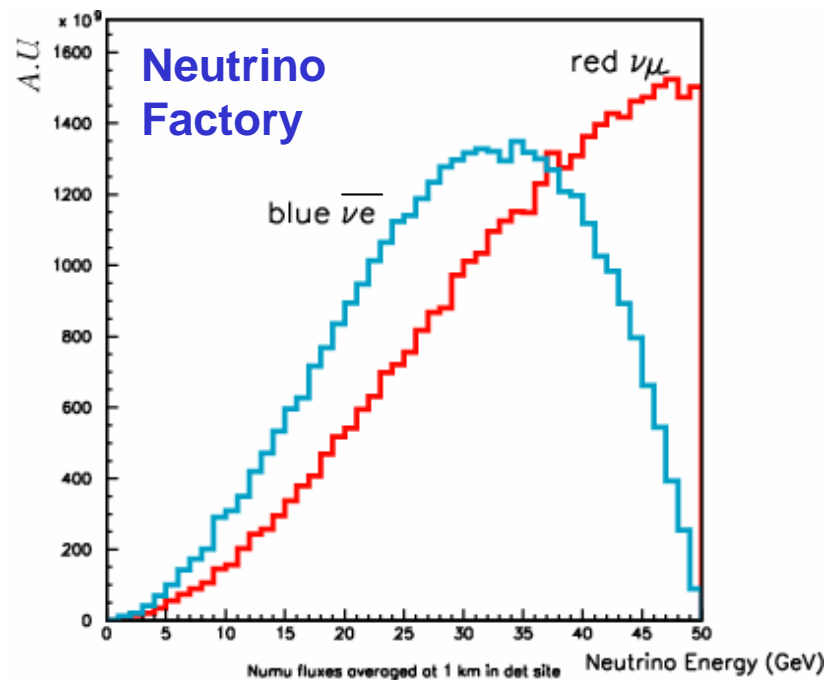
- 2001-2010: K2K, CNGS, Minos \rightarrow conferma risultati SK/atmosferici
- 2009-2015: T2K, Minos off-axis, Chooz2 $\rightarrow \theta_{13}$, precisione su atmosferici
- 2015-2025: Super e/o Beta-Beam $\rightarrow \theta_{13}$ - δ_{CP} (correlati), gerarchia di massa
- >2020: Neutrino Factories
 - Fase di violazione di CP nel settore leptonico
 - Gerarchia di massa
 - Misura di precisione di tutti i parametri delle oscillazioni

La Neutrino Factory

$$\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu}_\mu \nu_e$$

- Intensità maggiore dei fasci tradizionali di un fattore 2
- Composizione e spettro del fascio ben determinati
- Flusso noto senza bisogno di MC adronici (incertezze <1%)



Oscillazioni a una Neutrino Factory

$$\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e$$

Disappear.

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$$

$$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$$

Appearance

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$$

$$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$$
 ("golden")

Appearance

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$$

$$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau$$
 ("silver")

e i coniugati partendo da μ^+

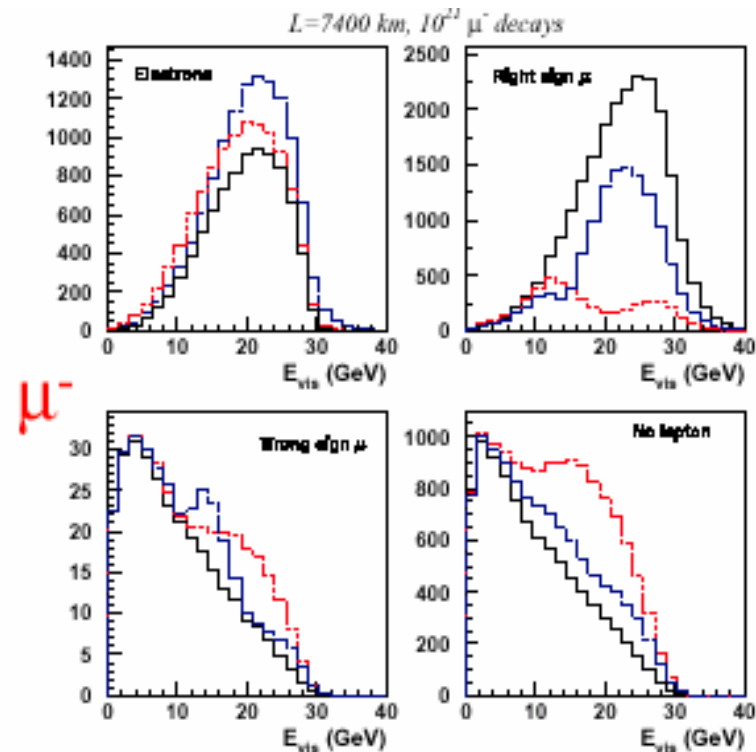
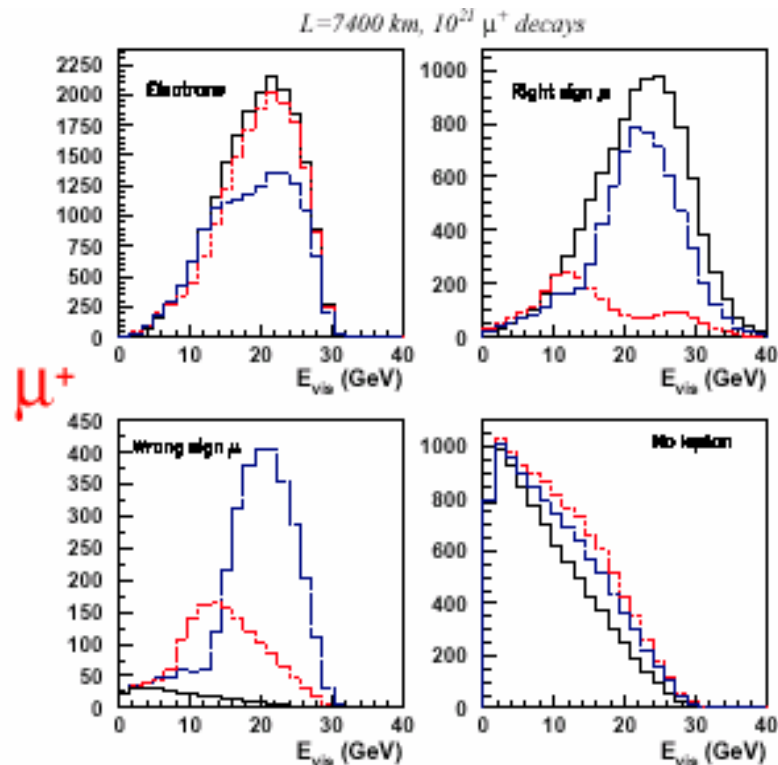
4 classi di eventi rivelati

→ Elettroni

→ Muoni di segno "giusto"

→ Muoni di segno "sbagliato"
(= OSCILLAZIONI)

→ Nessun leptone (o τ ...)



$$\Delta m_{23}^2 =$$

0
 $3.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
 $7.0 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

Richieste su fascio e rivelatori

- Fascio di alta intensità

- 10^{20} - 10^{21} decadimenti di μ all'anno

$$N_{osc} \propto \Phi \cdot \sigma_{\nu} \cdot P_{osc} \approx \frac{E_{\nu}^3}{L^2} \cdot \sin^2 \frac{L}{E} \approx E_{\nu}$$

- **Energia** il più possibile elevata...
ma con gli effetti di materia lo scaling L/E non è più valido per $L > 4000$ km

Valori ottimali: $L \sim 1000$ - 4000 km
 $E \sim 20$ - 50 GeV

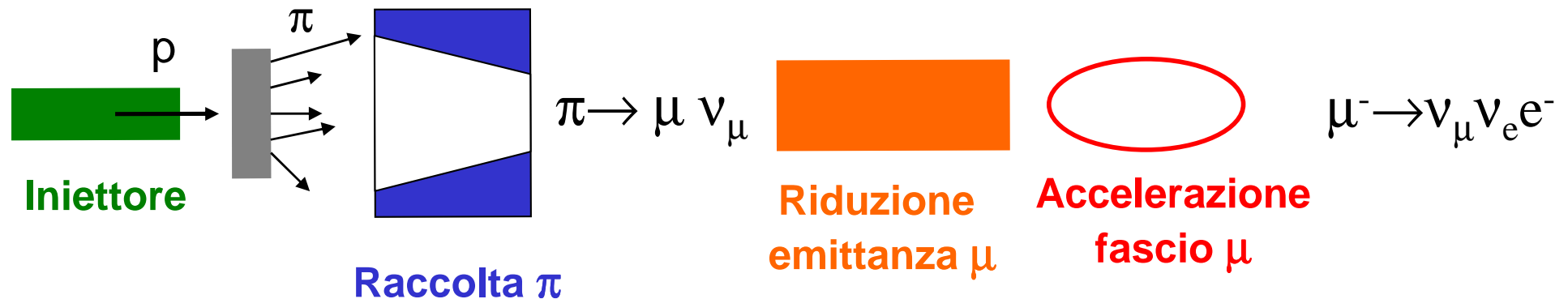
- Rivelatore

- Massa elevata (> 10 kton)
- Almeno identificazione dei μ e della loro carica
- Meglio se identifica anche e^{\pm} e τ

Esempio: Numero di eventi con Rivelatore 10 kt, 10^{21} μ , $E_{\mu} = 30$ GeV e $L = 3000$ km

Carica del μ	Tipo di evento	N eventi
μ^-	ν_{μ} CC	134362
	ν_{μ} NC	39952
	ν_e CC	52000
	ν_{μ} NC	18054
μ^+	ν_{μ} CC	60010
	ν_{μ} NC	21067
	ν_e CC	117369
	ν_{μ} NC	34558

Principio di realizzazione di una N.F.



Ogni elemento richiede un programma di Ricerca e Sviluppo dedicato

Molte attività sono già in corso:

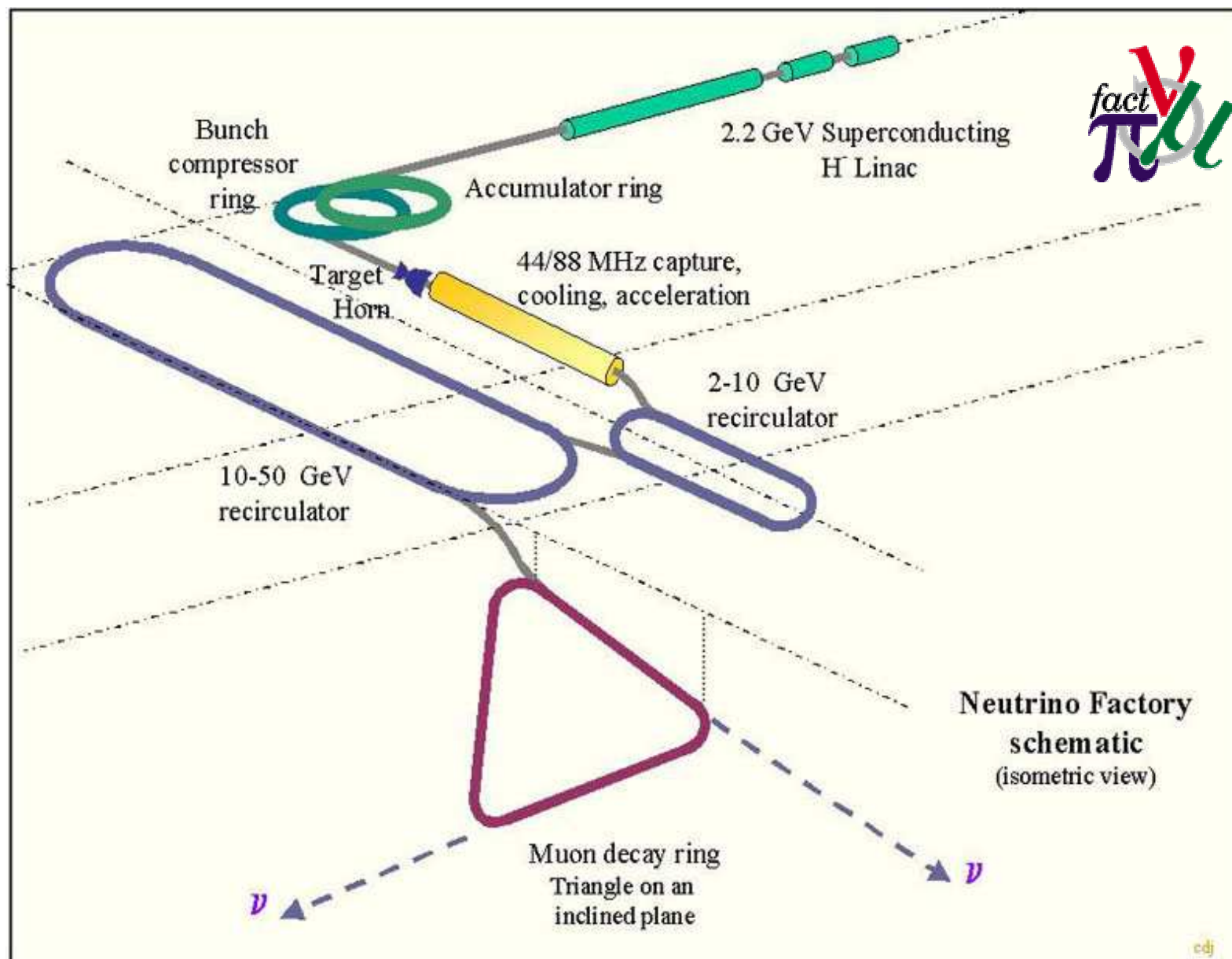
European Neutrino Group sponsorizzato da ECFA e BENE (Network UE)

HIPPI (High Energy Pulsed Proton Injector) --- Proton Rings --- Targetry ---

Pion Collection --- Muon Frontend --- Muon Accelerator and Storage Rings ---

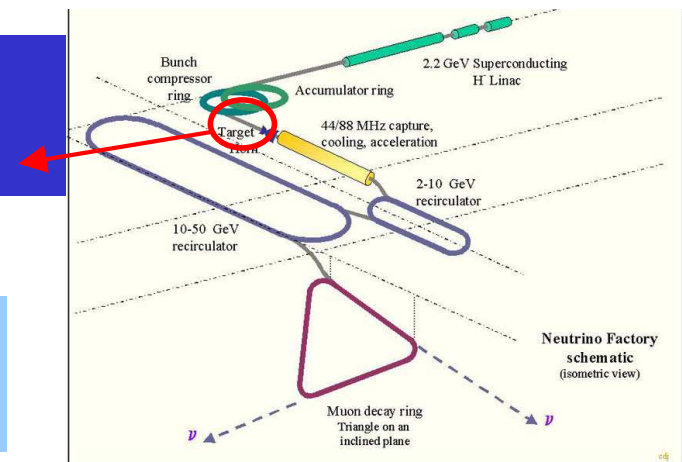
Neutrino Physics Working Group

Un possibile layout al CERN



Produzione dei pioni

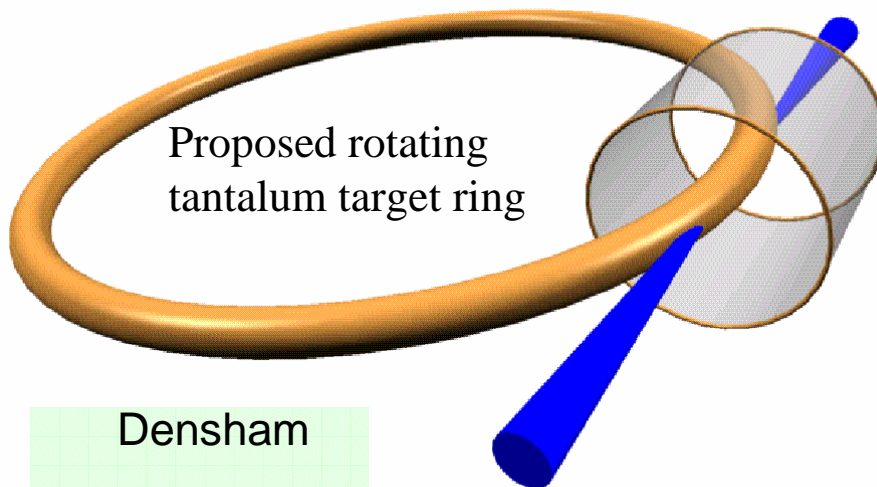
La scelta dell'energia dei protoni e del bersaglio dipenderanno dai risultati di HARP (cfr E.Radicioni)



Principali difficoltà per il bersaglio: enorme densità di energia (4 MW)
raccolta dei pioni

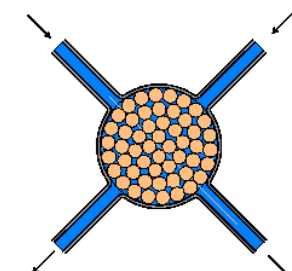
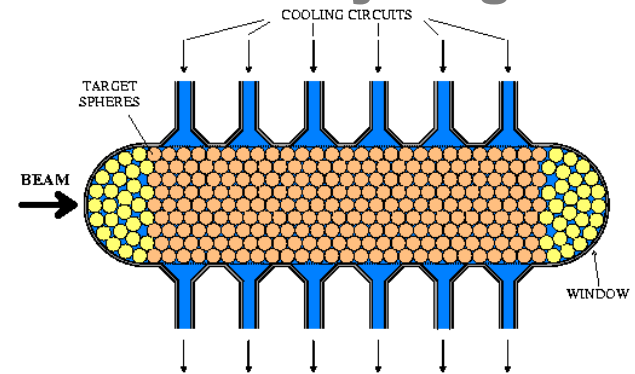
Replace target between bunches:

Liquid mercury jet or rotating solid target



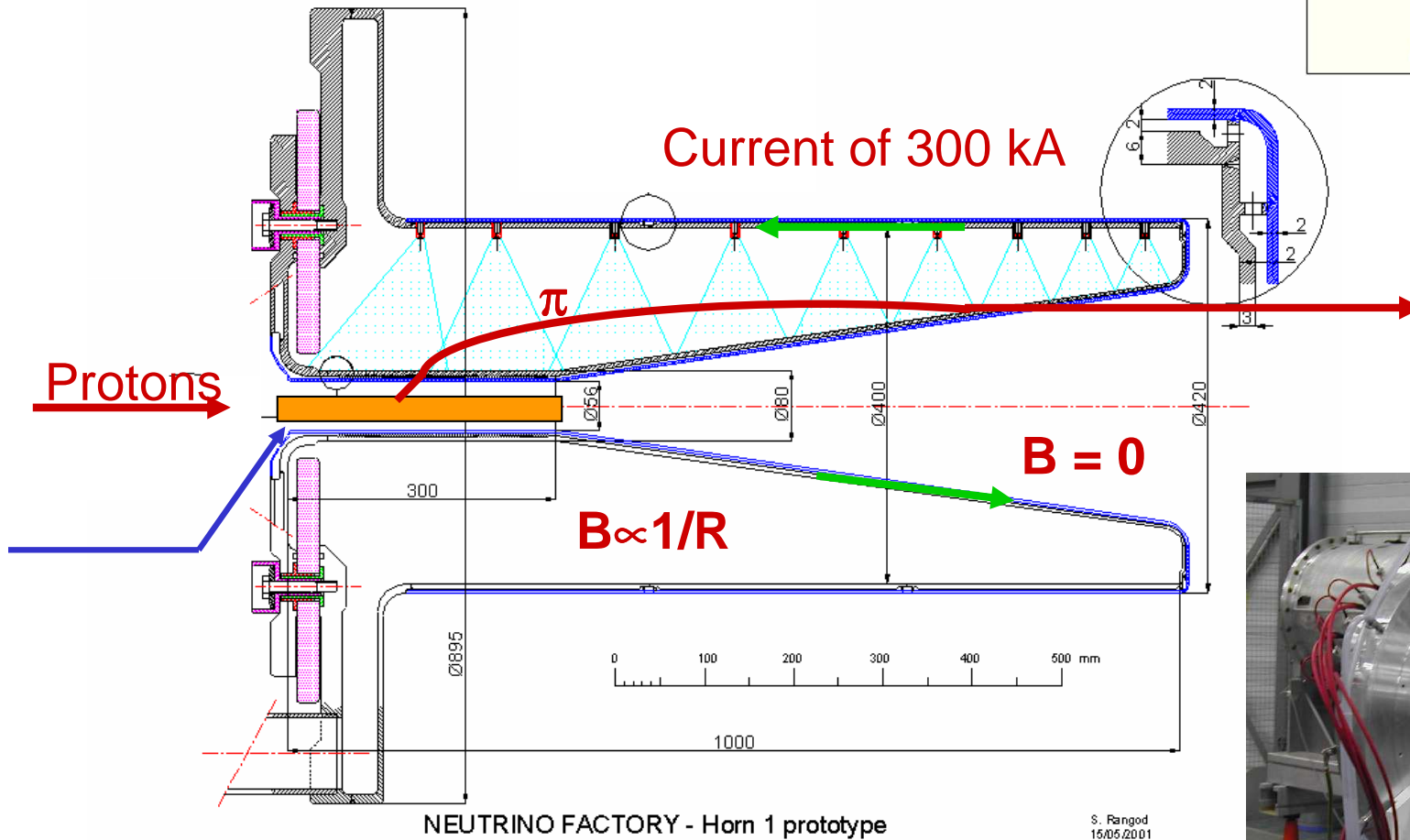
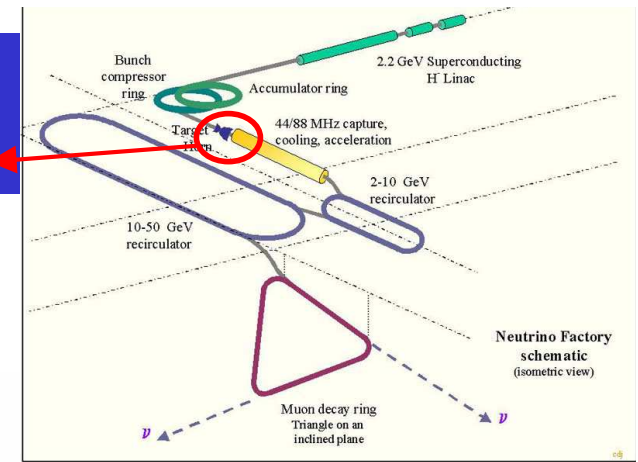
Densham

Stationary target:



Raccolta dei pioni

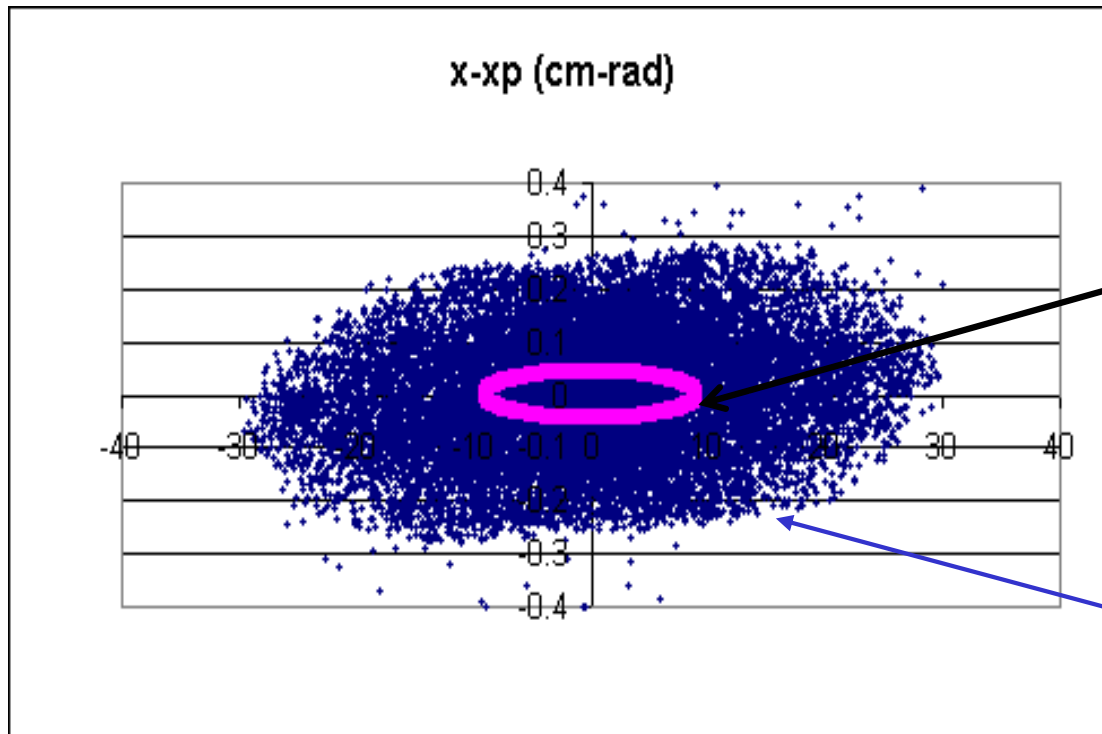
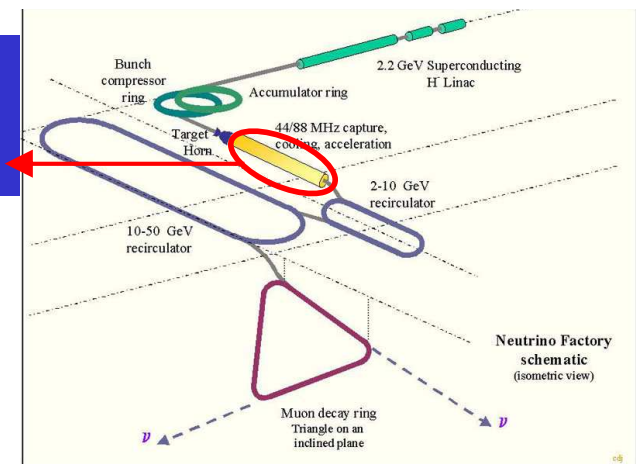
Opzione preferita: corno magnetico



Prototipo di 1m realizzato al CERN



Riduzione dell'emittanza dei μ



Accettanza dell'acceleratore

$R \approx 10$ cm, $x' \approx 0.05$ rad
riscalata @ 200 MeV

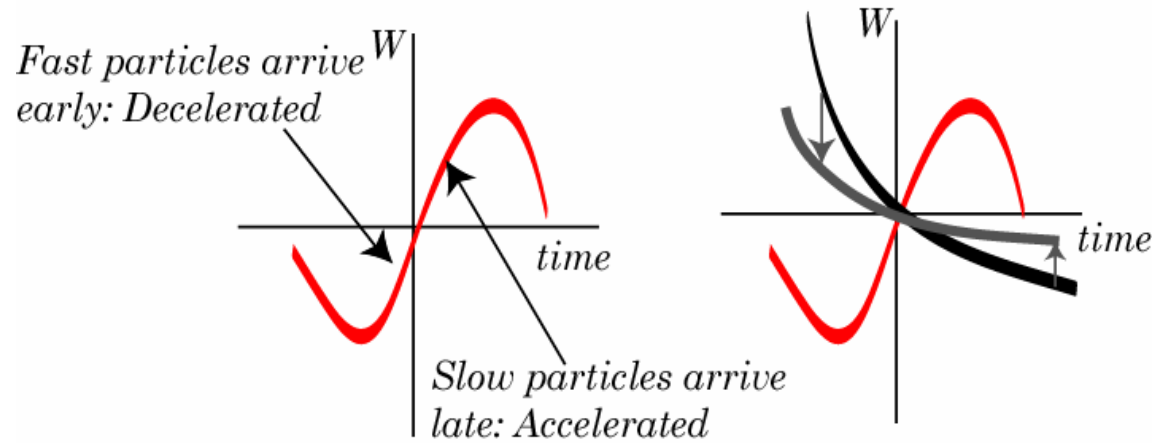
π e μ dopo la
focalizzazione

E' necessario ridurre l'emittanza del fascio di muoni per poterli iniettare nel sistema di accelerazione

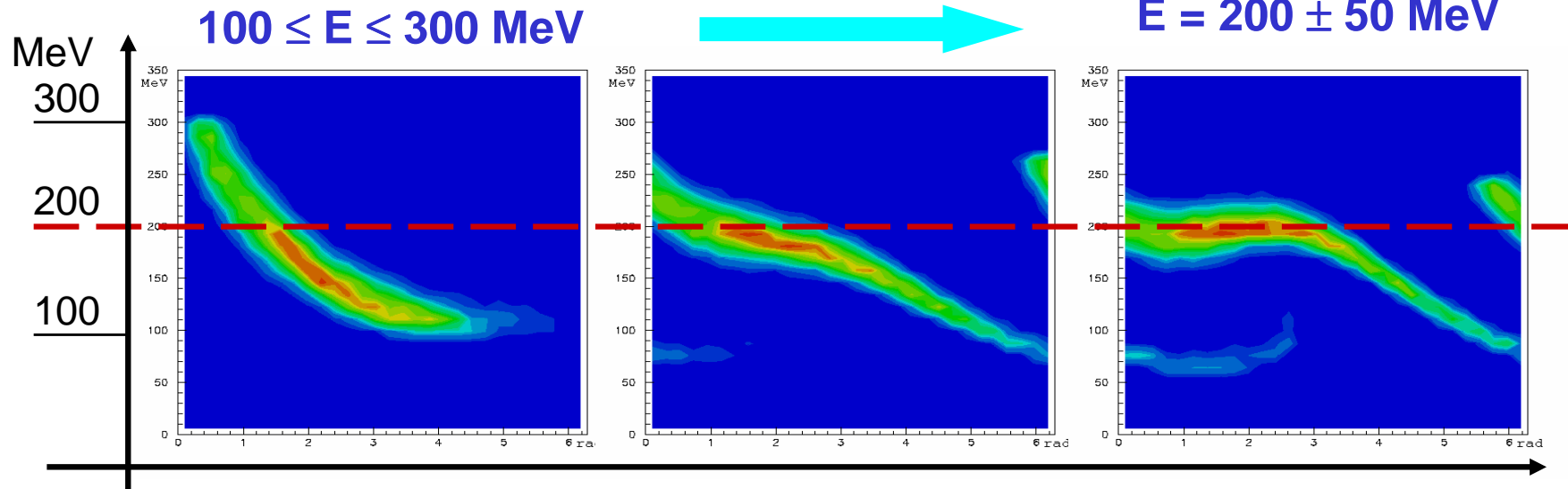
- Emittanza longitudinale ► rotazione di fase
- Emittanza trasversa ► raffreddamento per ionizzazione

Rotazione di fase

Riduzione della dispersione in energia tramite cavità RF



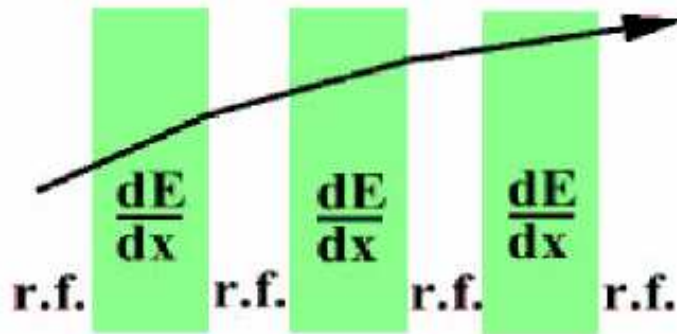
Esempio: con 30 cavità RF (2MV/m, 44 MHz, L=1m, B=1.8T)



Al CERN si stanno ora realizzando cavità a 88 MHz

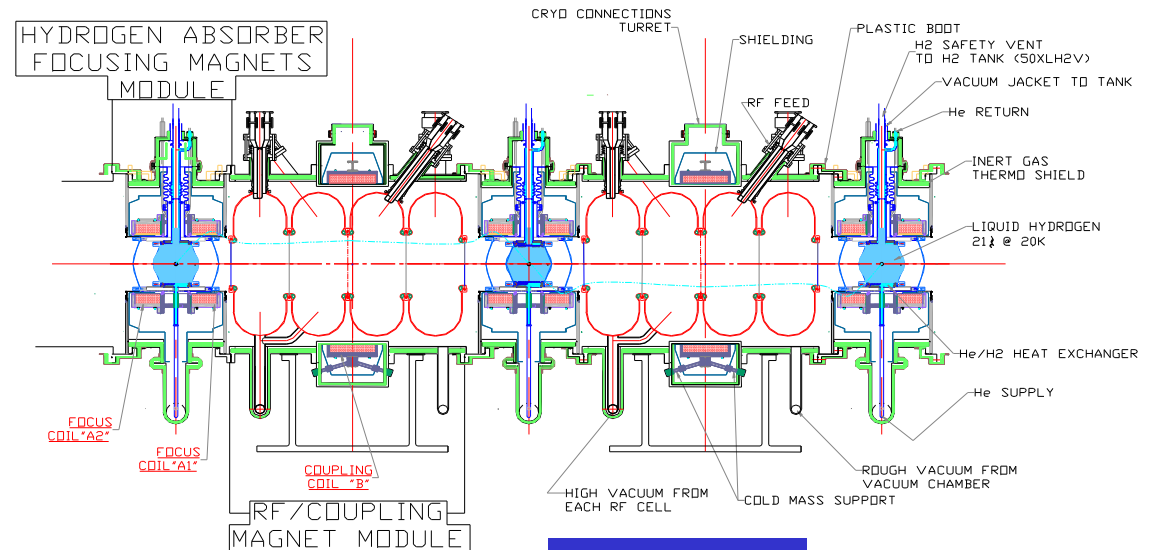
Raffreddamento per ionizzazione dei μ

principle:



this will surely work..!

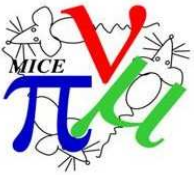
reality (simplified)



...maybe...

(da A.Blondel)

Mai realizzato sperimentalmente:
è necessario costruire un prototipo realistico e verificare che le prestazioni siano adeguate alle necessità della Neutrino Factory.

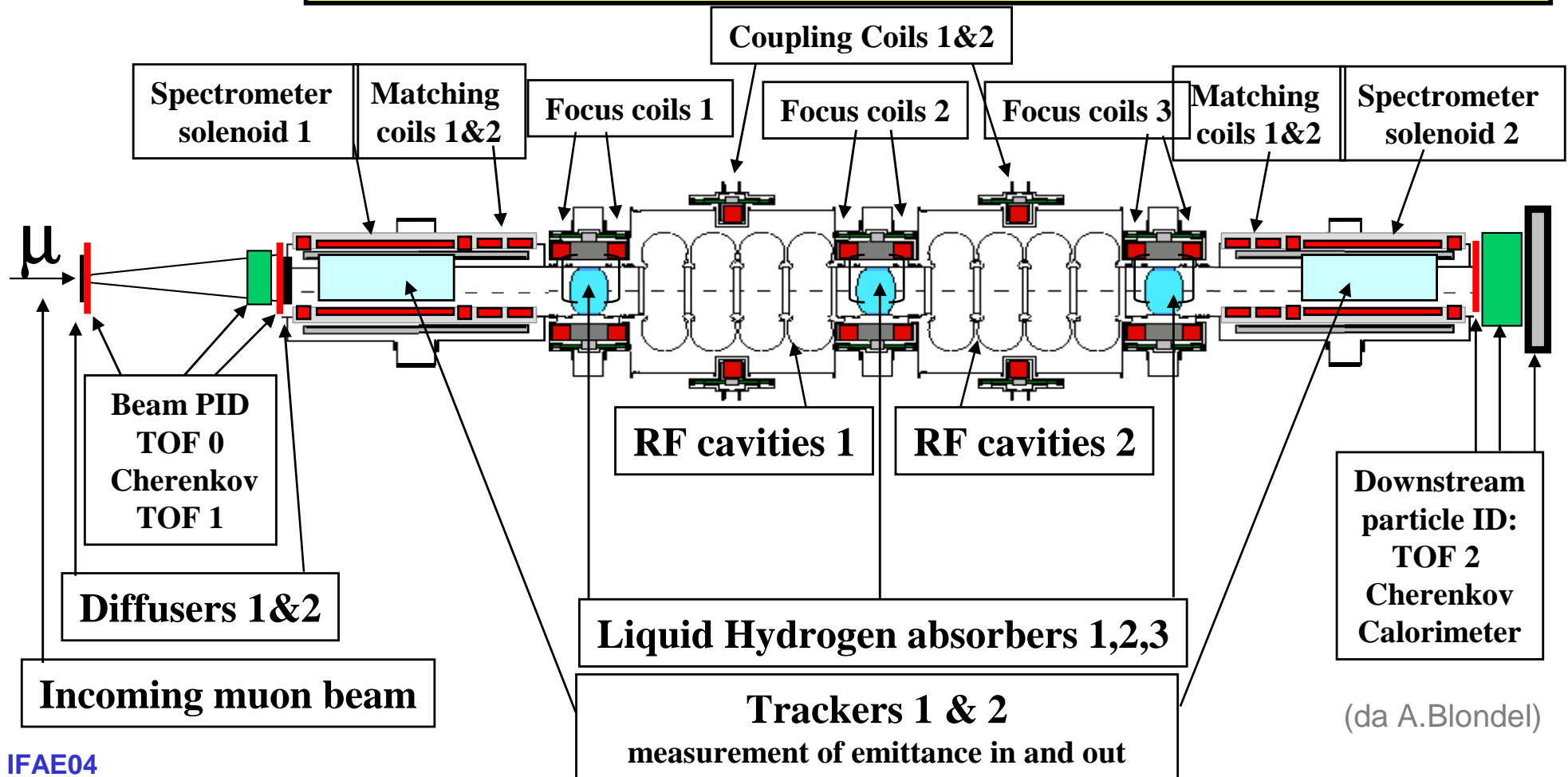


L'esperimento MICE

Proposal
sottomesso
Gennaio 2003

10% cooling of 200 MeV/c muons requires ~ 20 MV of RF
single particle measurements =>

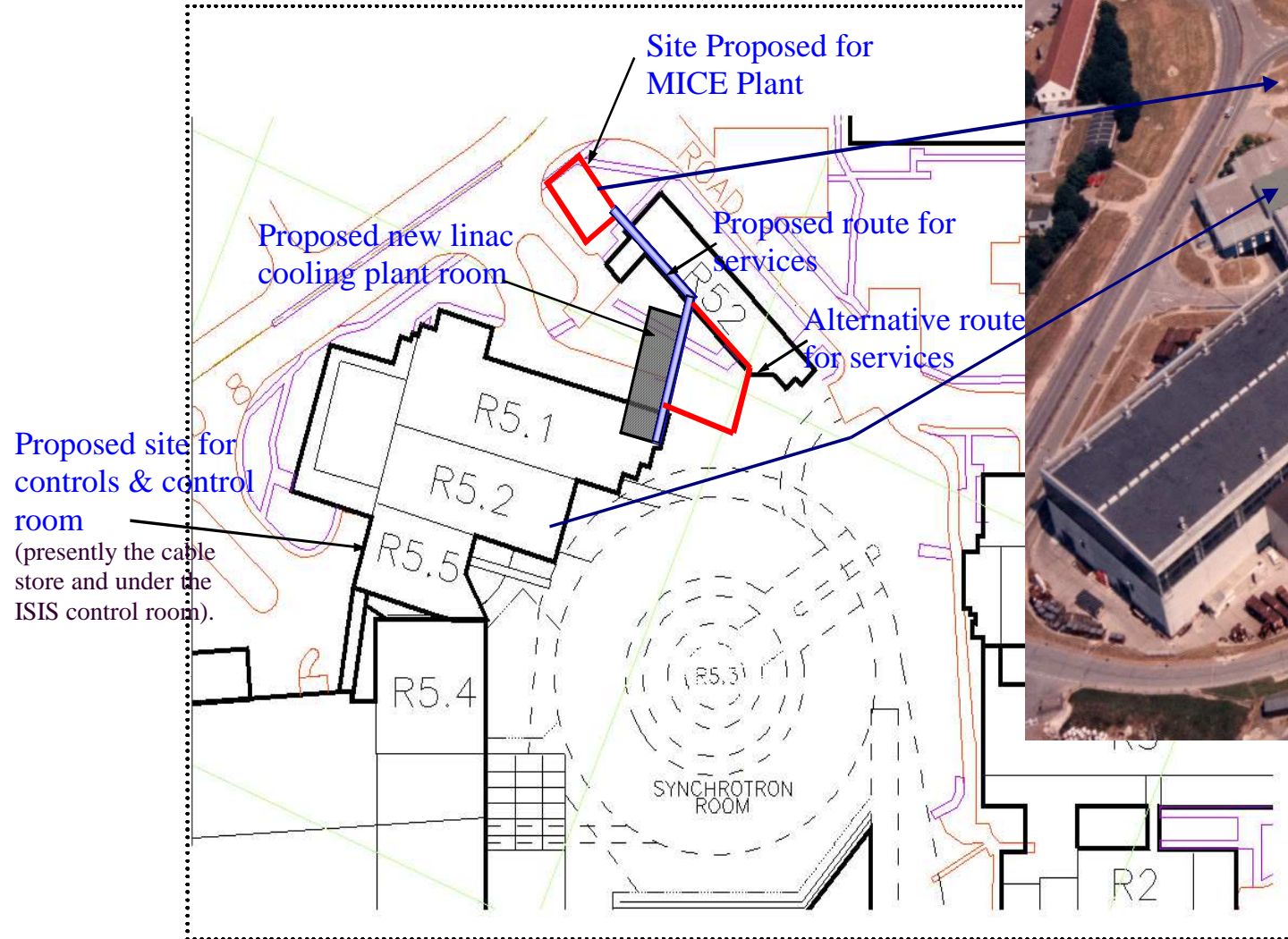
measurement precision can be as good as $\Delta(\epsilon_{out}/\epsilon_{in}) = 10^{-3}$
never done before either....



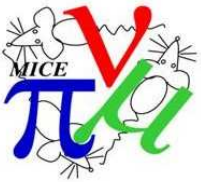
(da A.Blondel)



MICE at RAL

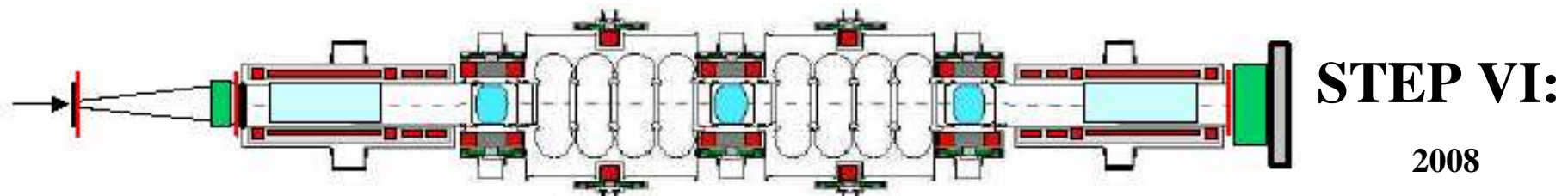
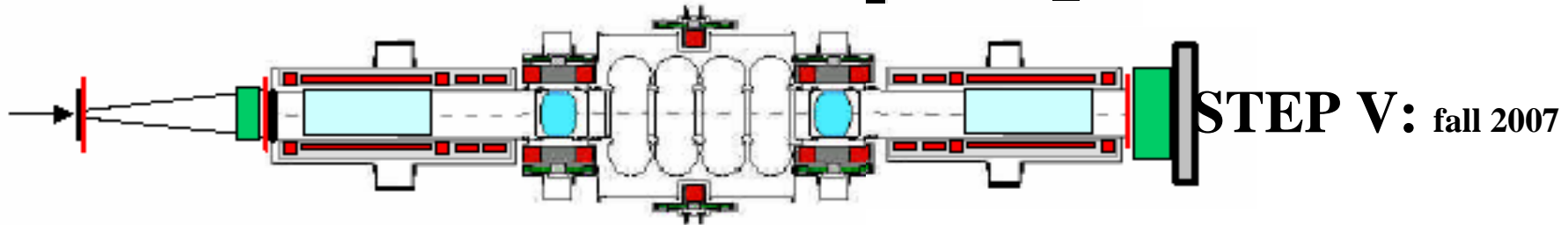
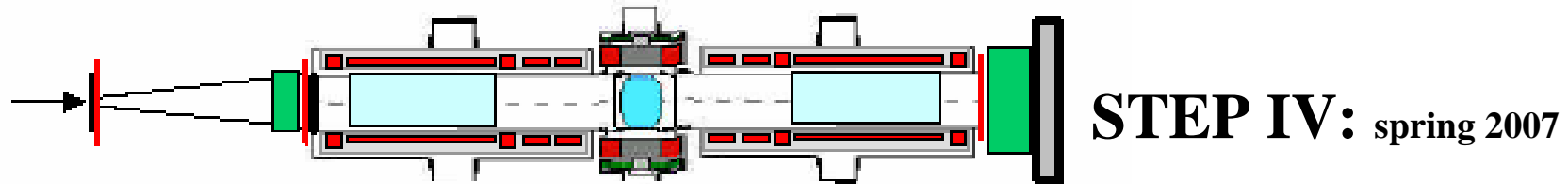
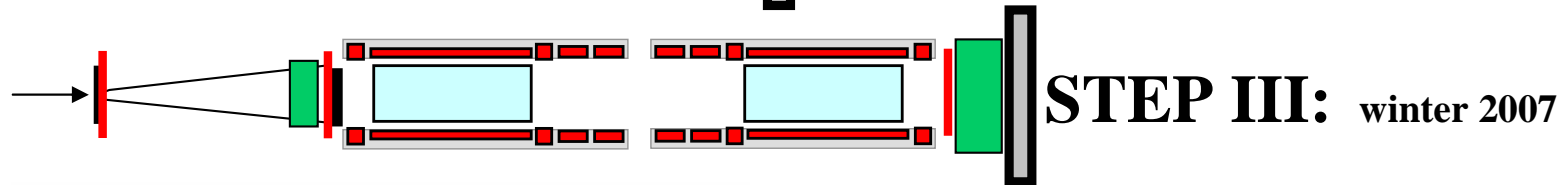
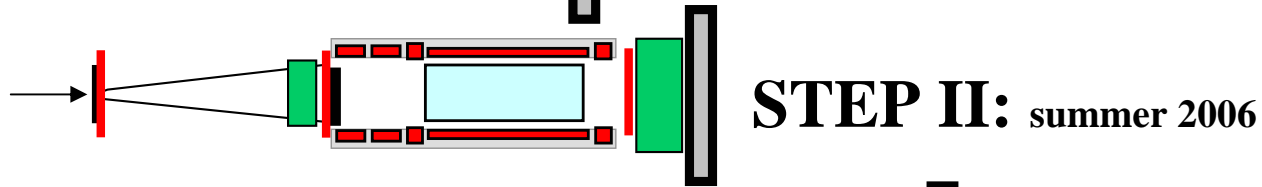


(da A.Blondel)



Fasi della realizzazione di MICE

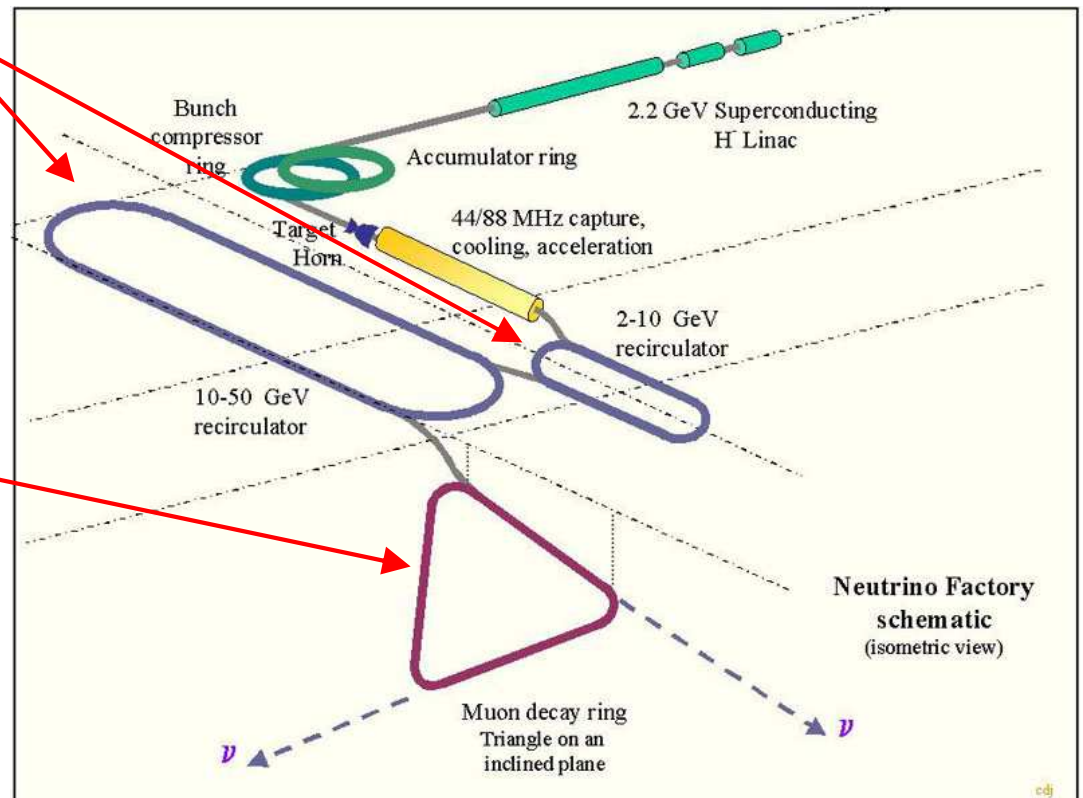
(da A.Blondel)



Accelerazione e decadimento dei μ

- 2 ricircolatori
 - un sincrotrone sarebbe troppo lento rispetto a τ_μ
- sezioni rettilinee + archi
 - non è possibile aumentare i campi magnetici curvanti da un giro all'altro: diversi canali di curvatura negli archi

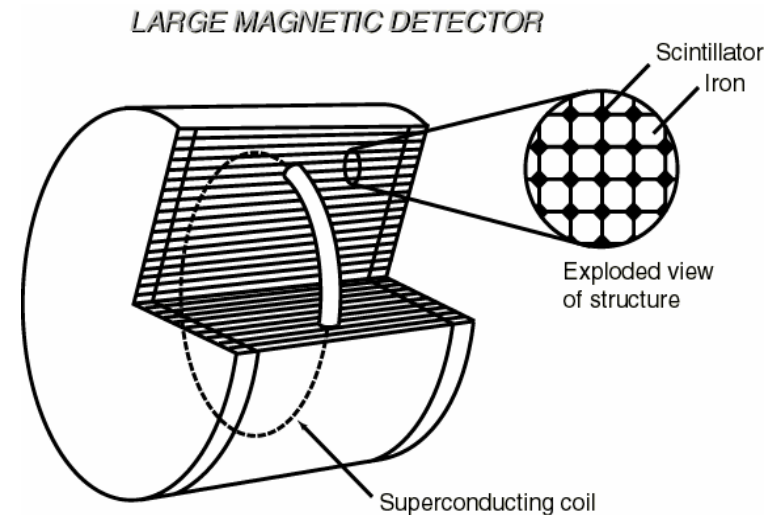
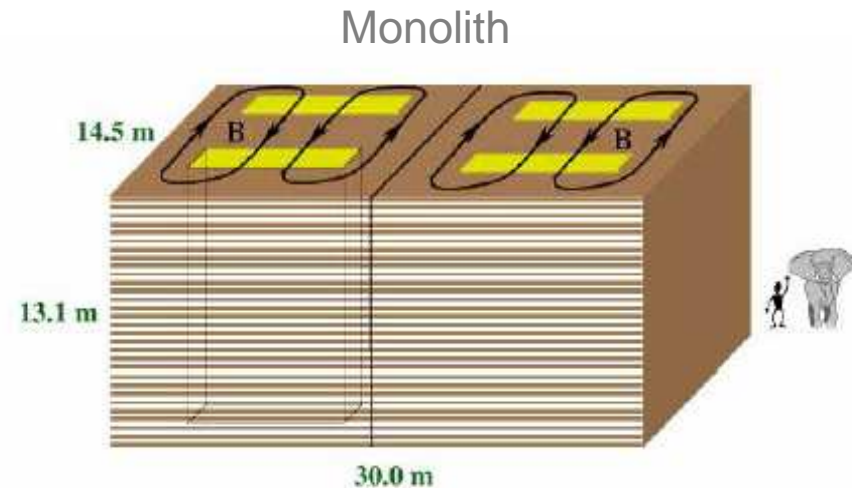
- Anello di decadimento
 - Geometria ad anello \rightarrow Precessione dello spin, che consente la misura della polarizzazione (utile per la conoscenza precisa del fascio)
- Sezioni rettilinee dirette verso 2 stazioni sperimentali a diverse distanze



Opzioni per il rivelatore (1)

Ferro Magnetizzato

- Possibilità di grande massa a basso costo
- Identificazione della carica del μ
- Diverse possibilità per la scelta degli elementi attivi
 - RPC in vetro (Monolith)
 - Barre di scintillatore (LMD)

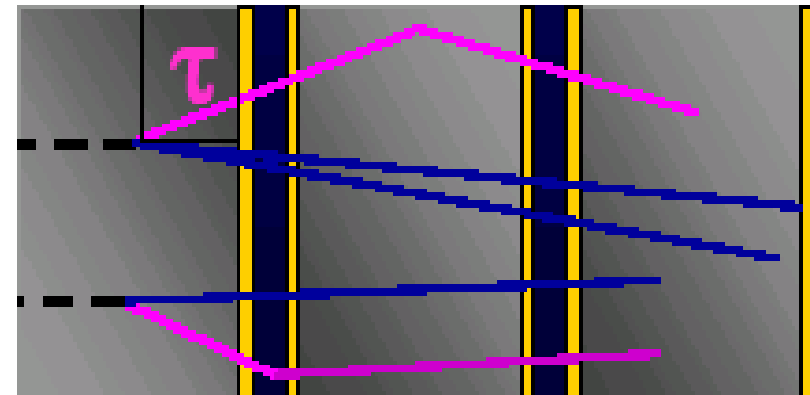


Dimension: radius 10 m, length 20 m
Mass: 40 kt iron, 500 t scintillator

Opzioni per il rivelatore (2)

Argon Liquido Emulsioni nucleari

- Permettono la ricostruzione dei vertici di decadimento del τ , quindi l'identificazione del canale di oscillazione $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ ("silver channel")

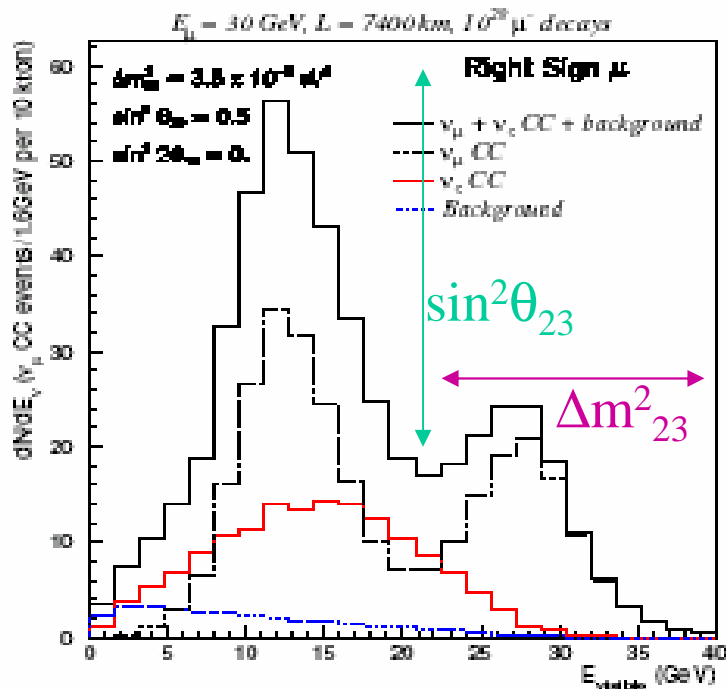


Misure dei parametri di oscillazione

1) Parametri dell'oscillazione "leading" (atmosfera) $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \cong 1 - \sin^2\theta_{23}(\Delta m^2_{23} L/E)$$

dalla sparizione di muoni di "segno giusto"

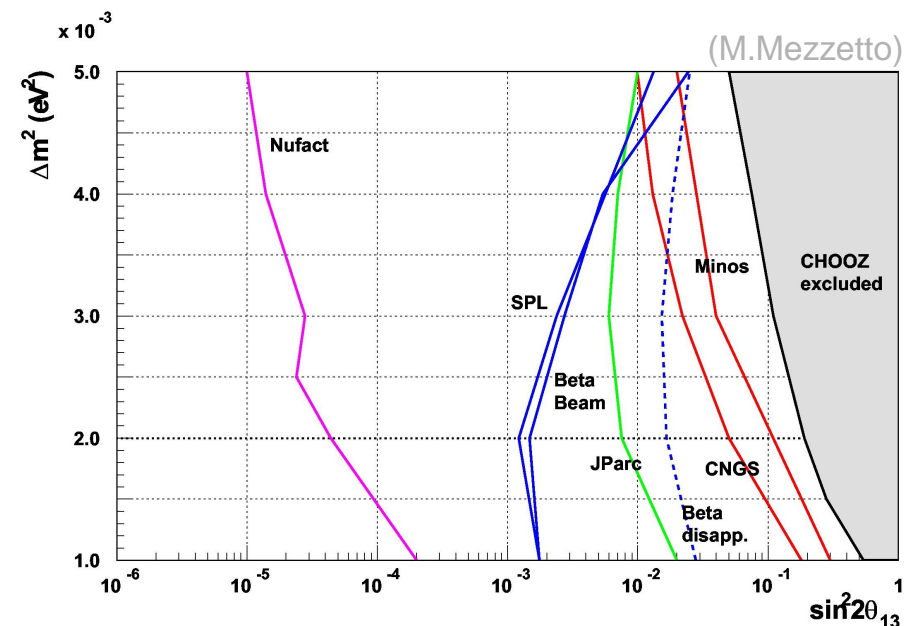


Precisione
<1%

2) θ_{13} (cfr M.Apollonio)

$\nu_e \rightarrow \nu_\mu$
muoni di "segno sbagliato"

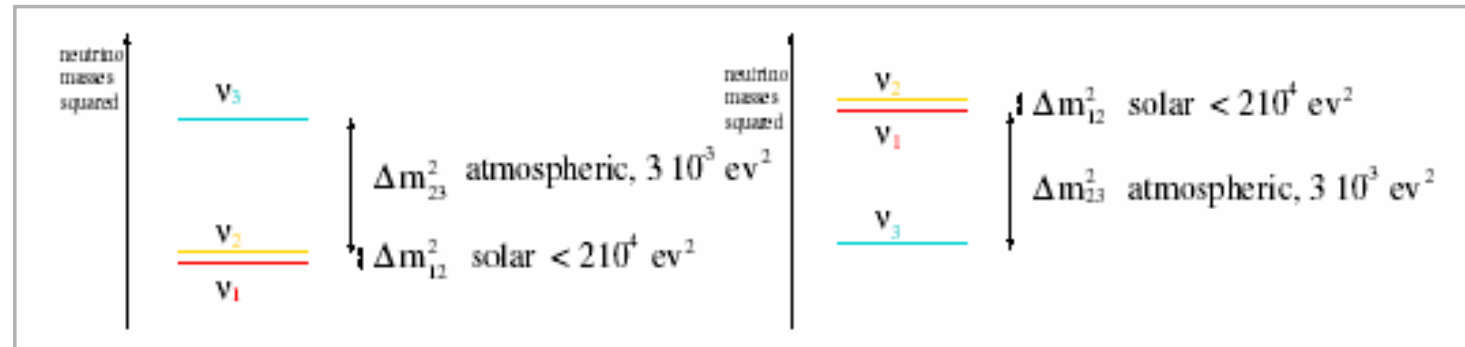
Sensibilit  limitata dal fondo
(μ di segno sbagliato anche da
D, K, $\pi \dots$)



Misure dei parametri di oscillazione

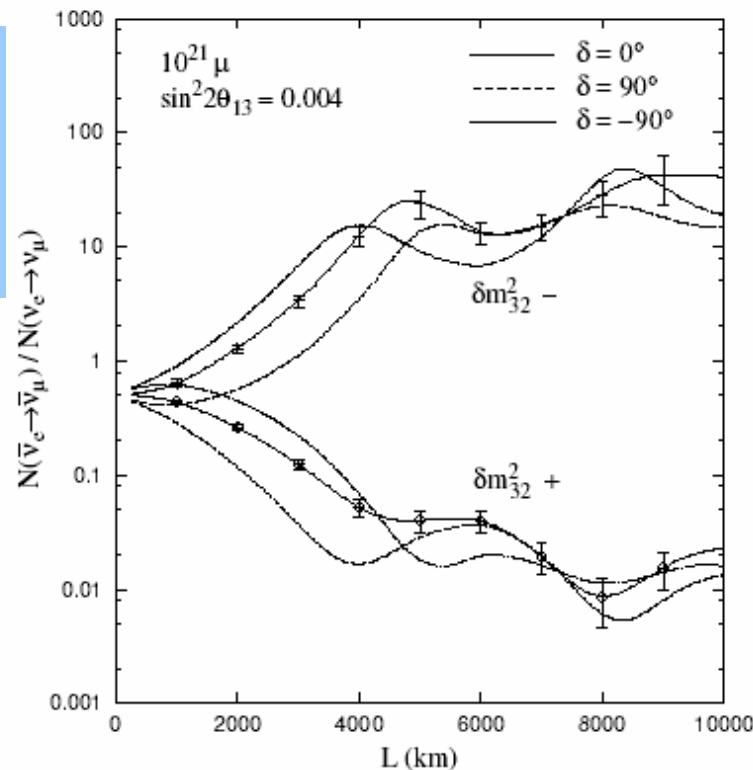
3) Effetti di materia: segno di Δm_{23}^2

Le oscillazioni $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ nel vuoto sono sensibili solo a $|\Delta m_{23}^2|$



Gli effetti di materia modificano i parametri efficaci dell'oscillazione in modo asimmetrico per ν_e e $\bar{\nu}_e$

Confronto di $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ e $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ (μ "segno sbagliato") in run alternati con $\mu+$ e $\mu-$



Occorre $L > 2000 \text{ km}$ per distinguere gli effetti da quelli di δ_{CP}

Misura della fase di violazione di CP leptonica

È l'argomento più forte per la realizzazione di una Neutrino Factory

Metodi per la misura di δ

- Confronto della probabilità di oscillazione $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ con una previsione teorica

$$A_\delta = \left[P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \delta = +\pi/2) - P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \delta = 0) \right] / \left[P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \delta = +\pi/2) + P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \delta = 0) \right]$$

- dipendenza dal modello e dagli altri parametri delle oscillazioni

- Confronto, in funzione di E_ν , di appearance di $\bar{\nu}_\mu$ da fascio di μ^- con appearance di ν_μ da fascio di μ^+

$$A_{CP}(\delta) = \left[P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \delta) - P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu, \delta) \right] / \left[P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \delta) + P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu, \delta) \right]$$

- sovrapposizione con effetti di materia
- tempo di misura più che raddoppiato ($\sigma_{\nu\text{bar}} < \sigma_\nu$)

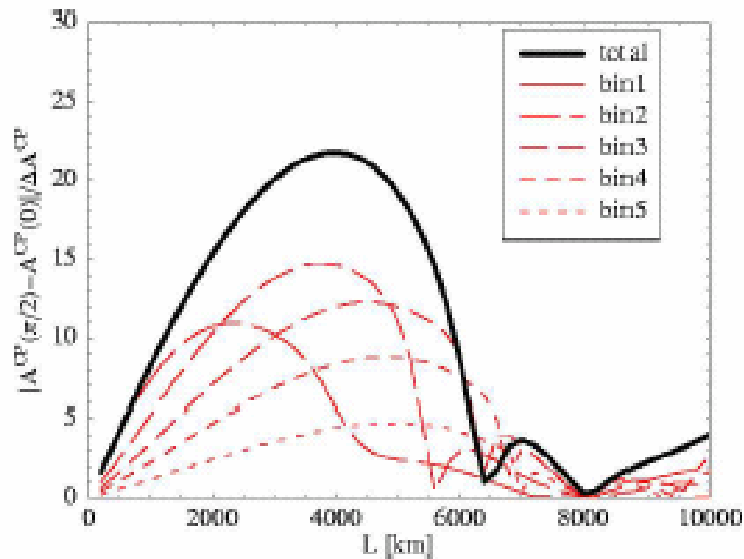
- Confronto, in funzione di E_ν , di appearance di ν_e da ν_μ e di ν_μ da ν_e

$$A_T(\delta) = \left[P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \delta) - P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e, \delta) \right] / \left[P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \delta) + P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e, \delta) \right]$$

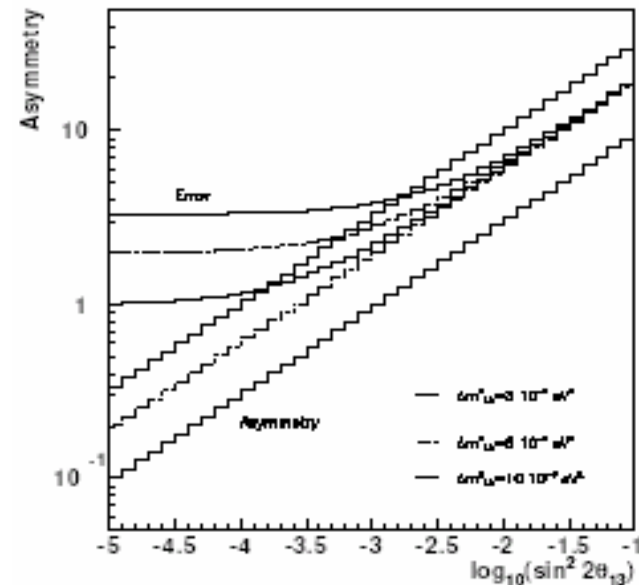
- serve la misura della carica dell'elettrone e un accurato controllo delle sistematiche

Misura della fase di violazione di CP leptonica

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) - P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = c_{13}^2 \sin\delta \sin 2\theta_{12} s_{13} \sin 2\theta_{23} [\sin 2\Delta_{12} - \sin 2\Delta_{13} + \sin 2\Delta_{23}]$$



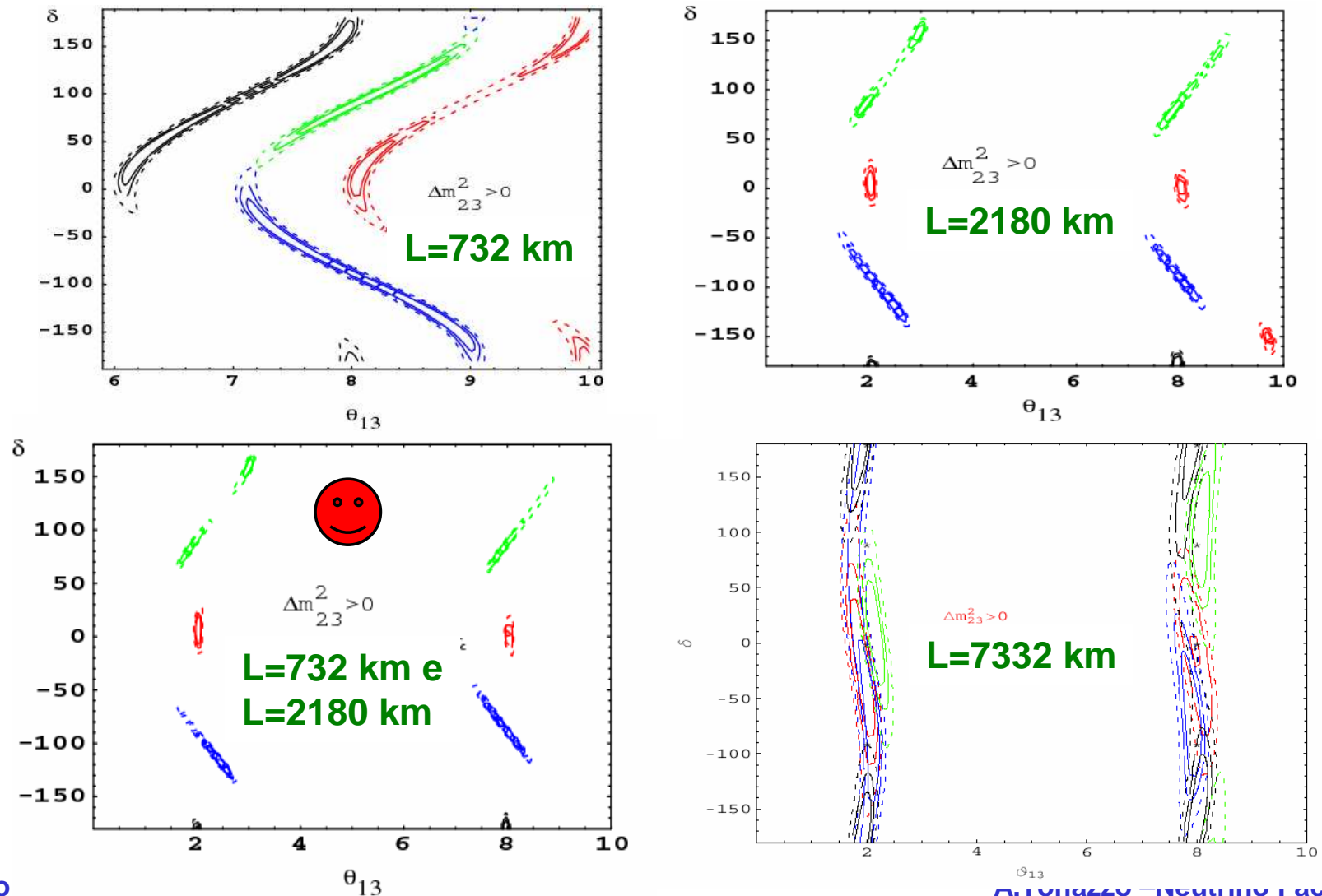
Per $E_\mu = 30-50$ GeV e tenendo conto degli effetti di materia, la significatività della misura è massima per $L \sim 3000$ km



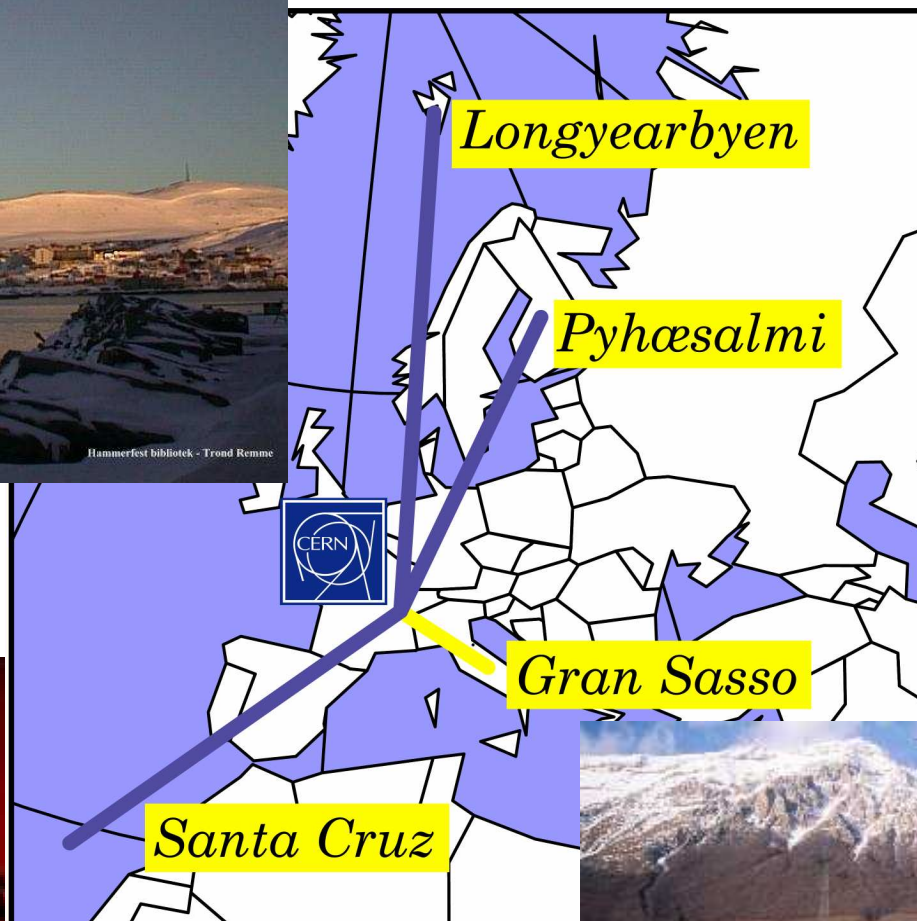
L'asimmetria è misurabile solo se i termini che la moltiplicano sono abbastanza grandi: dipendenza dagli altri parametri delle oscillazioni ($\theta_{13} > 0.5^\circ$)

Fit simultaneo di θ_{13} e δ

- Ad E_ν ed L fissate, le equazioni per le probabilità di oscillazione calcolate per dati valori di (θ_{13}, δ) definiscono curve di equiprobabilità nel piano (θ_{13}, δ)
- Fit simultaneo a diverse baseline (Nucl.Phys.B 608 (2001) 301)



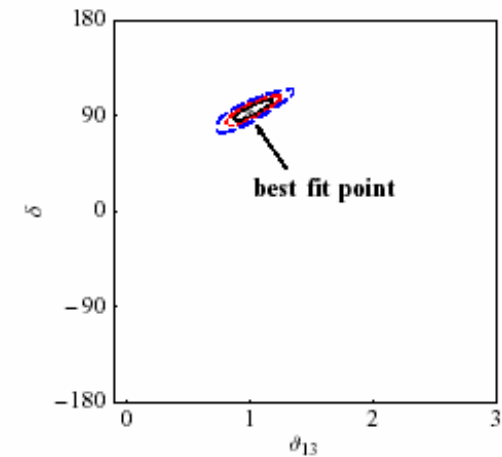
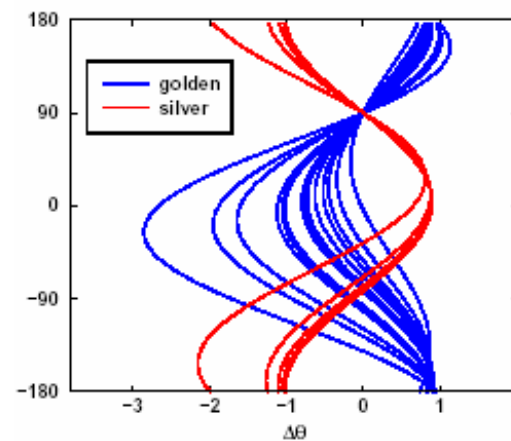
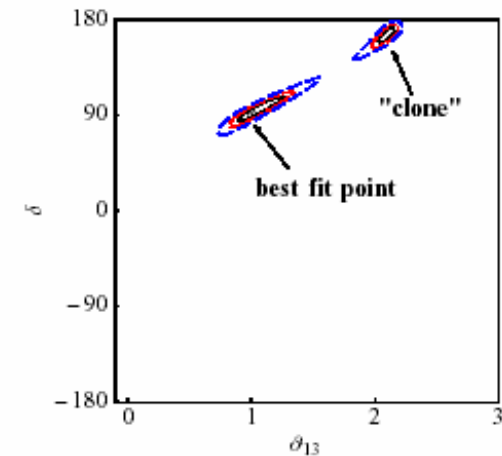
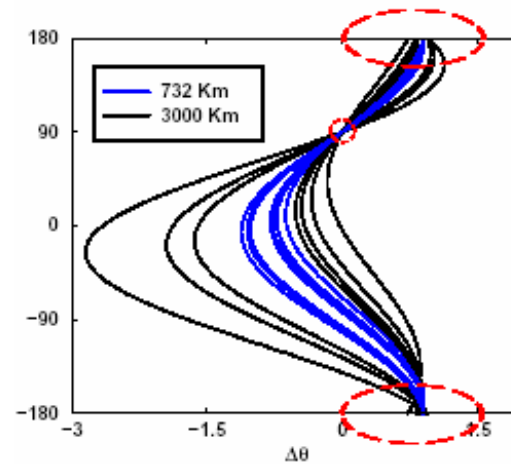
Dove è meglio fare turni ?



Fit simultaneo di θ_{13} e δ

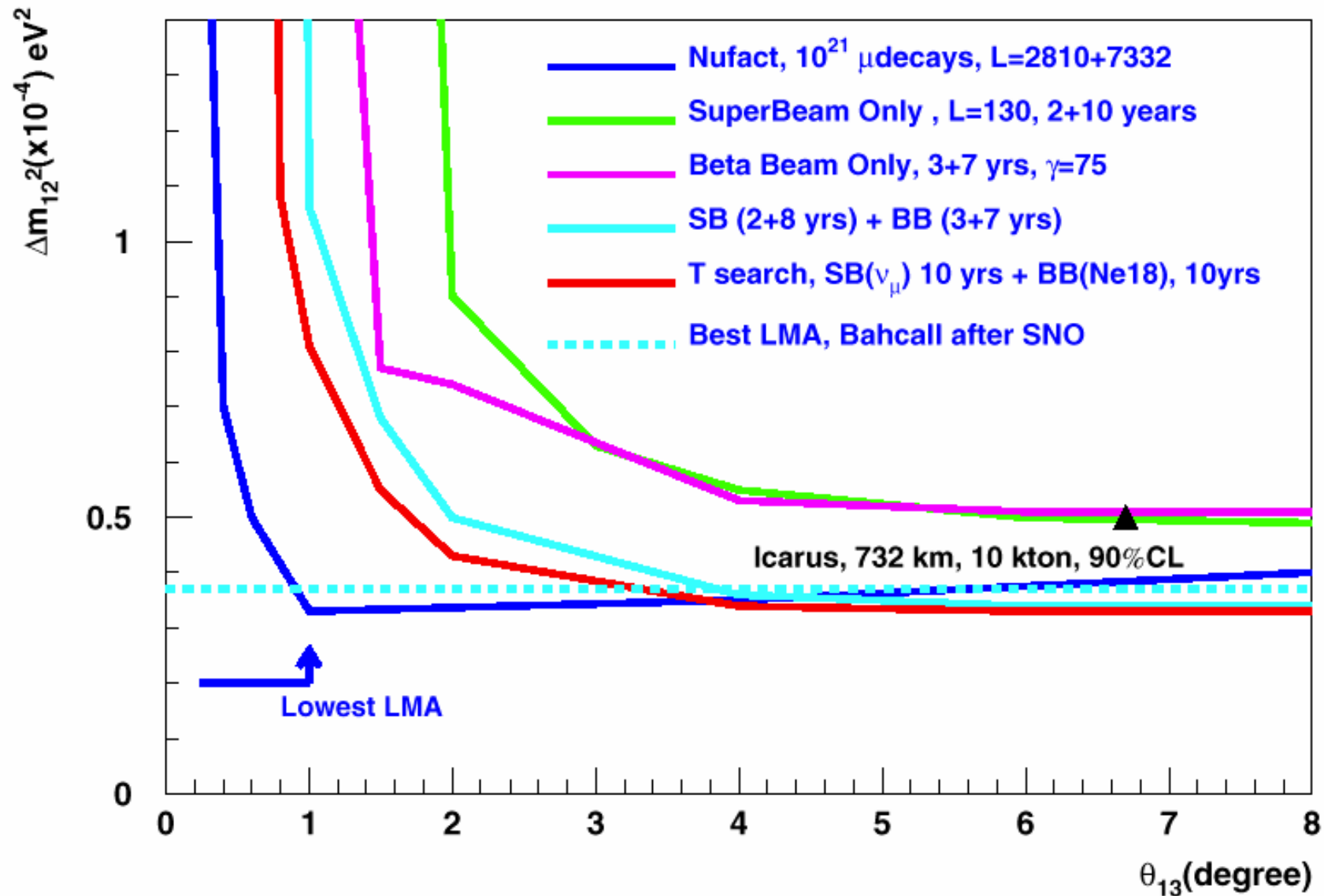
- Le probabilità per $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ e $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ hanno dipendenza da δ con segno opposto, che può essere usato per risolvere le ambiguità

→ Riconoscere $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ (“silver channel”) con un rivelatore in grado di identificare i vertici di decadimento del τ (Icarus, Opera)



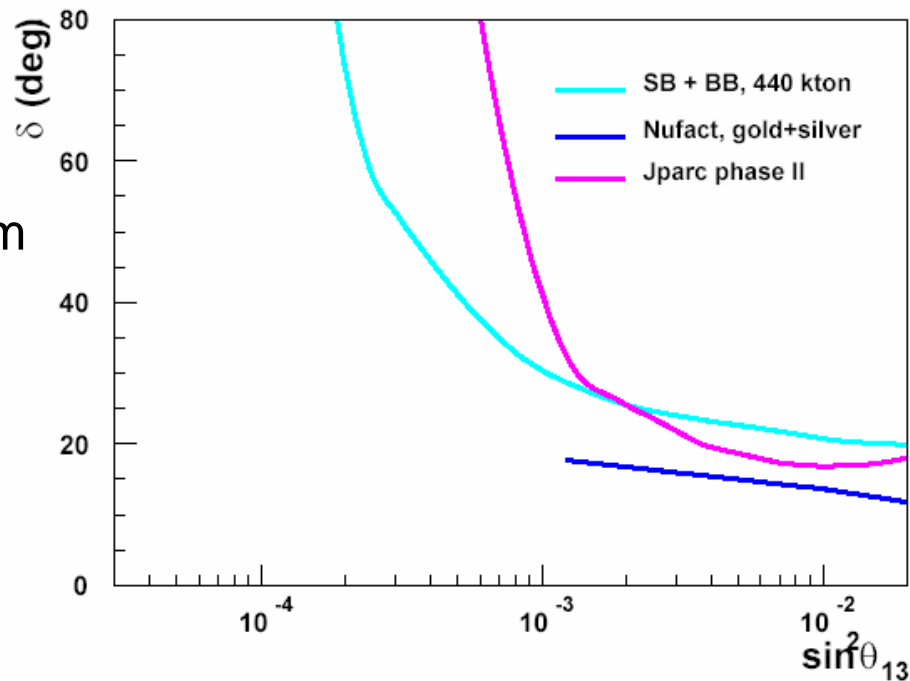
Esempio: 2xOpera (4kt) a $L=732$ km
+ 40 kt Fe magnetizzato a $L=3000$ km
(Nucl.Phys.B646:321-349,2002)
(Eur.Phys.J.C33:243-260,2004)

Sensibilità di NuFact

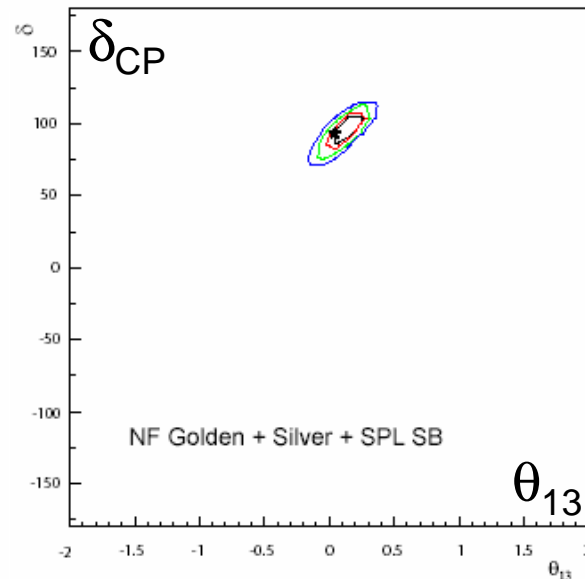
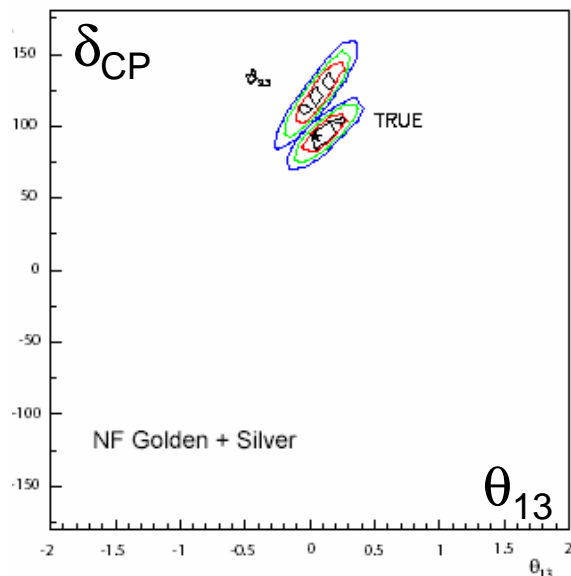


Fit simultaneo di θ_{13} e δ

NuFact vs
Super Beam + BetaBeam



NuFact



Sinergia di NuFact
e Super Beam

Altre possibilità di Fisica a una N.F.

- Beta-Beam (P.Zucchelli, Phys.Lett.B 532 (2002) 166)
 - La N.F. del CERN offre la possibilità dell'opzione "Beta-Beam": facendo circolare nell'anello di accumulazione un fascio accelerato di ioni radioattivi che decadono β^+ o β^- , p.es. ^{16}He o ^{18}Ne , si produce un fascio di soli ν_e o $\bar{\nu}_e$
 - Può essere ottimizzato per la misura di Δm_{23}^2 , dà accesso diretto a θ_{13} , e a δ_{CP} se combinato con il fascio del SPL
- Fisica non legata alle oscillazioni dei neutrini
 - DIS
 - Misura delle sezioni d'urto di interazione dei neutrini
 - Funzioni di struttura polarizzate
 - Produzione di singoli barioni con charm e beauty
- Verso la realizzazione di un collisore $\mu\mu\dots$

- La Neutrino Factory sarebbe la fase più avanzata sulla strada verso la conoscenza delle oscillazioni dei neutrini
 - Fase di violazione di CP nel settore leptonic
 - Gerarchia di massa
 - Misura di precisione di tutti i parametri delle oscillazioni
- ... e potrebbe essere il primo passo verso la realizzazione di un collisore $\mu\mu$
- Molti programmi di R&D sono in corso, sponsorizzati dall'ECFA e dal nuovo Network EU BENE
- L.Foà, presentazione plenaria IFAE 14/04/04: "la fisica leptonica procede lenta ma sicura"
- La comunità prosegue con entusiasmo il lavoro, ma...

