

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Frascati

Studio della produzione di un fascio di muoni a bassa emittanza per il progetto LEMMA

A. Ciarma

The LEMMA collaboration

Special thanks to M. Boscolo, M. Antonelli and O. Blanco

Collisori di muoni

I collider $\mu^+\mu^-$ sono lo strumento ideale per estendere il limite energetico per i leptoni nella regione del **multi-TeV**:



× Tempo di vita media del muone ~2,2µs (a riposo)

Come produrre i muoni?

Tramite **PROTONI**

p + target $\rightarrow \pi/K \rightarrow \mu$

Pioni prodotti a $P_{\pi} \sim 100 \text{ MeV/c}$, con elevato momentum spread

× Muoni prodotti con grande emittanza

- × Cooling necessario
- × Muoni prodotti a bassa energia

Tramite **POSITRONI**

 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

Muoni prodotti per **annichilazione** a valori di $\sqrt{s} \sim 0,212 \text{GeV/c}^2$ (soglia) in collisioni asimmetriche

- Muoni prodotti a bassa emittanza
 Nessun bisogno di cooling
- × Bassa sezione d'urto

$$L \propto \frac{N^2}{\epsilon}$$

A parità di luminosità al collider, una minore emittanza permette di avere un **numero minore di muoni per bunch**

Come produrre i muoni?



$$L \propto \frac{N^2}{\epsilon}$$

A parità di luminosità al collider, una minore emittanza permette di avere un **numero minore di muoni per bunch**

Produzione diretta di **coppie μ⁺μ⁻** ad √s ~ 0,212GeV/c², usando un **fascio di positroni di 45GeV** su bersaglio di **elettroni atomici**



$$\begin{split} E(e^+) &= 45 GeV \\ E(\mu) &= 22,5 GeV \\ \gamma &\sim 200 \rightarrow \tau_{lab} \sim 500 \mu s \end{split}$$

- Fascio di muoni a bassa emittanza (NO cooling)
- Ridotto background
- Muoni prodotti ad alto γ
- × Bassa sezione d'urto di produzione ~ 1µb (vs ~ 1mb per sorgente di protoni)

<u>Novel proposal for a low emittance muon beam using positron beam on target</u> - Antonelli, M. *et al.* Nucl.Instrum.Meth. A807 (2016) 101-107

Un primo schema concettuale: *positron multi-pass*



- Anello di accumulazione di positroni @45GeV (design per 6.3km e 27km)
- Bersaglio integrato nell'anello dei positroni
- Anelli di accumulazione per i muoni (design preliminare 120m)

Un'altro schema: *positron single-pass*



Un'altro schema: positron single-pass



Accumulazione dei muoni



Accumulazione dei muoni



I muoni all'interno degli anelli di accumulazione vengono **reiniettati in sincrono** con un nuovo bunch di positroni, quindi i nuovi muoni vengono **prodotti nello stesso spazio delle fasi** dei precedenti

Aumento di emittanza dovuto solo al multiplo scattering

Scelta del bersaglio

$$n(\mu^{+}\mu^{-}) = n^{e+} \cdot N_{A} / A \rho Z \cdot I \cdot \sigma(\mu^{+}\mu^{-})$$

- Materiali densi e ad alto Z
- Bersagli spessi

Degradazione del fascio di positroni ($\sigma_{\rm Brem} \propto 1/X_0$) Multiplo scattering ($\theta \propto I/X_0$) Muoni prodotti lungo tutto il bersaglio

- Materiali leggeri e a basso Z
- Bersagli sottili (I < X₀)

Simulazioni MC : bersagli sottili e materiali leggeri

- Berillio miglior risultato complessivo
- Carbonio di interesse per bersagli cristallini (channeling)
- Idrogeno liquido

Efficienza vs spessore del bersaglio



3e11 e+ @45GeV 10 x 0.1X₀ di Be

Il fascio di positroni viene **degradato in energia**, dopo 0.4X0 di Be quasi tutti gli e+ sono **sotto soglia** di produzione (E<43.7GeV)

Scelta dello spessore del bersaglio: 0.3X0 di Be (10,6cm) ~4.0e5 μ /e+ bunch \rightarrow efficienza di produzione ~1.3e-6

Il fascio di muoni

Fascio **puntiforme** di positroni @45GeV: **contributo della produzione** all'emittanza dei μ





Il fascio di muoni

Usando un fascio di positroni più realistico:





- Le dimensioni dipendono dalla larghezza del fascio di positroni
- La divergenza dipende dalla cinematica di produzione
- Correlazione energia-divergenza

Scelta del bersaglio

$$n(\mu^+\mu^-) = n^{e_+} \cdot N_A / A \rho Z \cdot I \cdot \sigma(\mu^+\mu^-)$$

Elevato rate di positroni sul bersaglio (\sim 240mA) \rightarrow problemi di **stress termomeccanico**

- Bersaglio solido rotante (ILC-like)
- Bersagli di idrogeno liquido (pellet → "spaghetti")
- Linea di produzione a multi-target per dividere la potenza su più bersagli
- Multipli IP
- Linee di trasporto tra gli IP
- Anelli di accumulazione



 Ogni IP può essere composto da diversi bersagli separati da drift



Possibili configurazioni della linea di produzione

Software per lo sviluppo delle ottiche:

- Interazione con la materia
- Trasporto delle particelle

Sviluppo di un **tool** in grado di fornire una **risposta rapida** per alleggerire lo studio di nuove ottiche: **MU**on **FA**st **S**imulation **A**lgorithm (**MUFASA**)

- Semplice MC per la produzione dei muoni e l'interazione delle particelle con i bersagli → Benchmark con Geant4 e FLUKA
- Interfaccia con MADX_PTC per il trasporto delle particelle
- Simulazione start-to-end per la produzione, trasporto e accumulazione dei muoni

Divisione del bersaglio nel singolo IP

Positroni @45GeV, σ_x =20 μ m, ϵ_x =70e-12 m*rad

0,3X0 Be spessore totale del bersaglio



Contributo del fascio di positroni



A.Ciarma - IFAE19 - 8 Aprile 2019

Bersagli di idrogeno liquido



Very Preliminary results

e⁺ @45GeV, ϵ_x =70pm, σ_x =20µm 10 bersagli da 0,03X0 (0,3X0 tot) Separati da 2cm drift

- Efficienza di produzione x2
- Nessun peggioramento dell'emittanza
- X L'idrogeno vaporizzato rovina il vuoto nella beamline



Conclusioni

LEMMA è una soluzione elegante per la produzione di fasci di muoni a bassa emittanza. Tuttavia questo progetto presenta **numerose sfide** da superare, tra le quali:

- Sviluppo di ottiche compatte e con grande momentum acceptance (anello di positroni, anelli di accumulazione di muoni, linee di trasporto...)
- Alta frequenza di produzione dei positroni
- Deposito di energia sul bersaglio

Studi preliminari svolti dal gruppo INFN-LNF sono promettenti, e si sta continuando il lavoro di progettazione, in particolare:

- Ottimizzazione del **design complessivo**
- Linea di produzione
- **Primo design** per l'accumulatore di muoni
- Sorgente embedded di positroni

Backup

Bibliografia

- 1. The future prospects of muon colliders and neutrino factories Boscolo, Manuela et al. arXiv:1808.01858
- 2. Novel proposal for a low emittance muon beam using positron beam on target Antonelli, M. *et al.* Nucl.Instrum.Meth. A807 (2016) 101-107
- 3. Low Emittance Muon Accelerator Studies with production from positrons on target M. Boscolo. et. al. Physics. Rev. Accel. Beams, 21-6, 2018
- 4. Snowmass Report: Ideas for Muon Production from Positron Beam Interaction on a Plasma Target M. Antonelli, P. Raimondi, (2013)
- 5. Upgrading FCC into a muon collider F.Zimmerman, ARIES APEC workshop on Muon CollidersPadova, 2-3 July 2018

Collisori di muoni

La forza di un muon collider sta nella **varietà** di campi della fisica che ci permette di esplorare

Multi-TeV

• Fisica del neutrino

• Higgs factory

• Processi rari muonici

Molte **potenzialità**, molte **sfide**:

studi di fattibilità

The future prospects of muon colliders and neutrino factories - Boscolo, Manuela et al. arXiv:1808.01858

Produzione tramite fotoni

[V. Yakimenko (SLAC)]

γ Nuclei $\rightarrow \mu^+ \mu^-$ Nuclei : **GeV-scale Compton** γ **s**

	Physical process	Rate µ/s	normalized emittance e _N [μm-rad]
e+ on target	e+e- → μ+μ-	0.9x10 ¹¹	0.04
Protons on target	р N \rightarrow π X, kX \rightarrow μ X'	1013	25
Compton γ on target	$\gamma \ N \rightarrow \mu + \mu - N$	5x10 ¹⁰	2

Figure of merit: Luminosity per wall plug power



J.P.Delahaye

NUON Accele,

ARIES wokshop (July 03, 2018)



Tempo sufficiente per **accumulare muoni** prodotti da più bunch di positroni $1 \tau_{\mu}^{lab} \approx 2500$ giri negli **anelli di accumulazione** dei muoni



Efficienza vs spessore del bersaglio



Scelta dello spessore del bersaglio: 0,3X0 di Be (35mm) ~4,0e5 μ /e+ bunch \rightarrow efficienza di produzione ~1,3e-6





Scelta del punto di lavoro:

Massimizzare la sezione d'urto
Minimizzare divergenza e energy spread



Possibili configurazioni della linea di produzione

- Un solo punto di interazione (IP)
- Anelli di accumulazione

- Multipli IP
- Linee di trasporto tra gli IP
- Anelli di accumulazione
- Ogni IP può essere composto da diversi bersagli separati da drift





Starting from the ILC geometry



We can discriminate 20 µm spots



Gianmario Cesarini

Single Bunch – Energy density deposition Beryllium (3 mm)



LEMMA Meeting