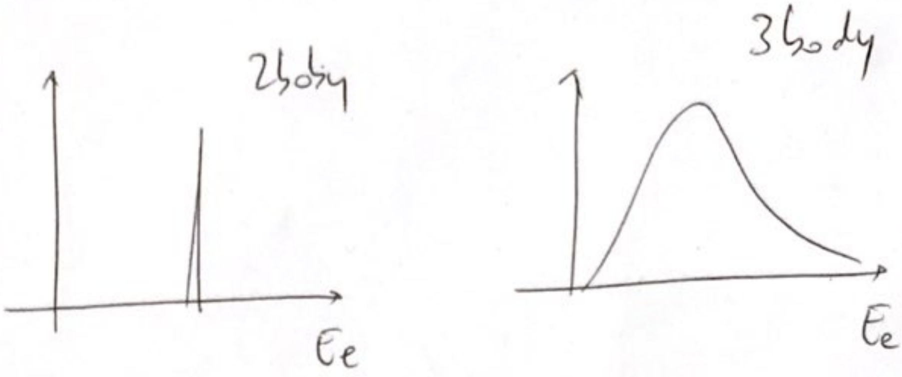
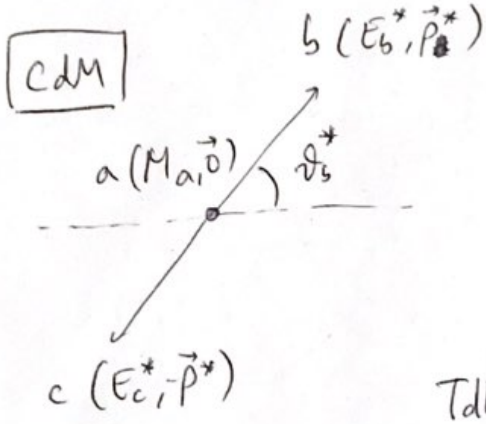
PAULI E SCOPERTA NEUTRINO

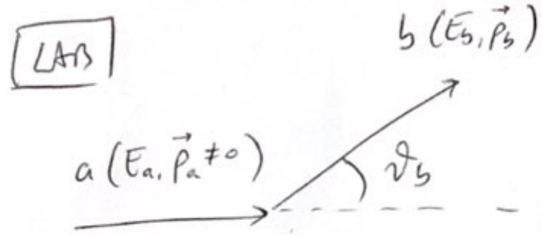
$n \to p e^- \bar{\nu}_e$



VEDIAMO ADESSO COME PASSARE NEL LAB



$\Rightarrow$



TdL con $\begin{cases} \beta_{cm} = \beta_a \\ \gamma_{cm} = \gamma_a \end{cases}$ ← lungo le z

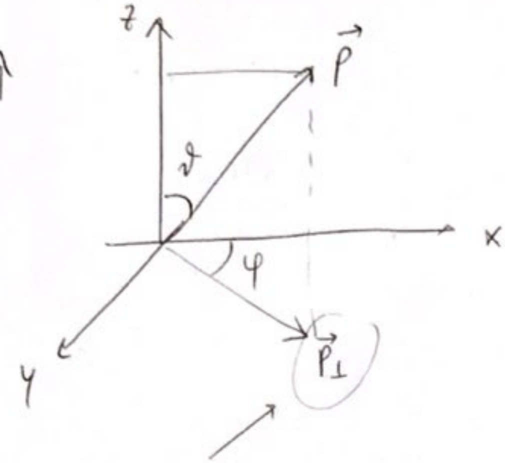
tutto riferito a b in luogo

↙ ↓ ↓ pedice sarà superfluo

LAB

$$(*) \quad \begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E \\ |\vec{p}| \sin\vartheta \cos\varphi \\ |\vec{p}| \sin\vartheta \sin\varphi \\ |\vec{p}| \cos\vartheta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & 0 & 0 & \beta\gamma \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \beta\gamma & 0 & 0 & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E^* \\ |\vec{p}^*| \sin\vartheta^* \cos\varphi^* \\ |\vec{p}^*| \sin\vartheta^* \sin\varphi^* \\ |\vec{p}^*| \cos\vartheta^* \end{pmatrix}$$

$\beta_{cm} \Uparrow$



ora, sappiamo che $P_\perp$ è invariante sotto TdL

$$\Rightarrow \quad P_\perp = P_\perp^*$$

$$\sqrt{P_x^2 + P_y^2} = \sqrt{(P_x^*)^2 + (P_y^*)^2}$$

$$\Leftrightarrow \sqrt{p^2 \sin^2\vartheta \cos^2\varphi + p^2 \sin^2\vartheta \sin^2\varphi} = \sqrt{p^{*2} \sin^2\vartheta^* \cos^2\varphi^* + p^{*2} \sin^2\vartheta^* \sin^2\varphi^*}$$

$$\Leftrightarrow \sqrt{p^2 \sin^2\vartheta \left(\underbrace{\cos^2\varphi + \sin^2\varphi}_{=1} \right)} = \sqrt{p^{*2} \sin^2\vartheta^*}$$

$$\Leftrightarrow \quad p^* \sin\vartheta = p^* \sin\vartheta^*$$

sostituendo in (*) ottengo

$$p \sin\vartheta \cos\varphi = p^* \sin\vartheta^* \cos\varphi^*$$

$$\left.\begin{array}{ll} \Leftrightarrow & \cos\varphi = \cos\varphi^* \\ e & \sin\varphi = \sin\varphi^* \end{array}\right\} \forall \varphi, \varphi^* \Rightarrow \boxed{\varphi = \varphi^*}$$

Invece per ϑ in (*) divido (y) per (z)

$$\frac{p_y}{p_z} = \frac{p\sin\vartheta\sin\varphi}{p\cos\vartheta} = \frac{p^*\sin\vartheta^*\sin\varphi^*}{\beta_{cm}\gamma_{cm}E^* + \gamma_{cm}p^*\cos\vartheta^*}$$

$$\Rightarrow \tan\vartheta = \frac{\sin\vartheta^*}{\gamma_{cm}\left(\beta_{cm}\frac{E^*}{p^*} + \cos\vartheta^*\right)}$$

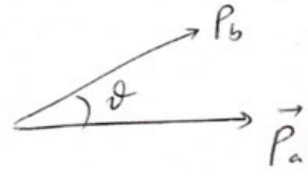
ma $\frac{p^*}{E^*} = \beta^*$ velocità di b in CdM

$$\Rightarrow \boxed{\tan\vartheta = \frac{\sin\vartheta^*}{\gamma_{cm}\left(\beta_{cm}/\beta^* + \cos\vartheta^*\right)}} \quad (1)$$

$\boxed{\text{CASI}}$

$\beta_{cm} > \beta^* \Rightarrow$ denominatore sempre > 0 $(\forall\vartheta^*)$

$\Rightarrow 0 \le \vartheta \le \frac{\pi}{2}$



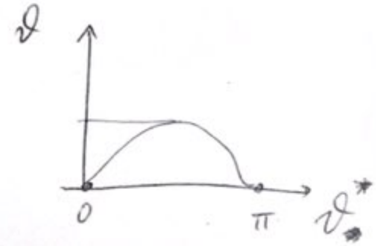
$\vec{p}_b$ ϑ $\vec{p}_a$

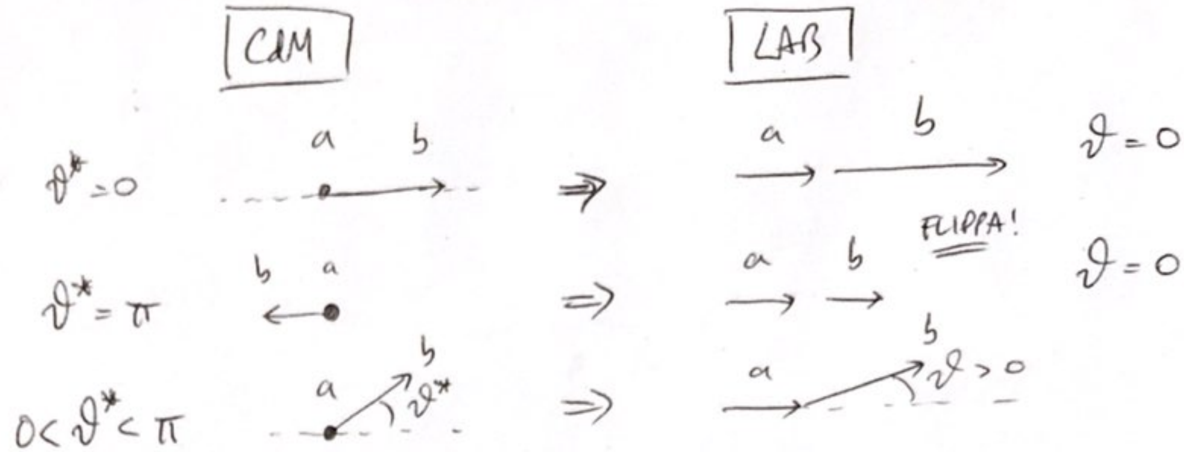
$\Rightarrow$ b è emesso in avanti nel lab sempre $(\forall\vartheta^*)$

ORA noto che $\vartheta^* = 0 \Rightarrow \vartheta = 0$ (min)

e $\vartheta^* = \pi \Rightarrow \vartheta = 0$ (max)

$\Rightarrow \exists\vartheta^*$ t.c. ϑ è max





vogliamo trovare angolo di apertura MAX → ϑ_{MAX}

quindi trovo punto in cui si annulla derivata di (1)

$$0 = \frac{d}{d\vartheta^*}\left(\tan\vartheta\right) = \frac{1+\cos\vartheta^*\left(\beta_{cm}/\beta^*\right)}{\gamma_{cm}\left(\beta_{cm}/\beta^* + \cos\vartheta^*\right)}$$

EX

si annulla in corrispondenza di

$$\cos\vartheta^* = -\frac{\beta^*}{\beta_{cm}}$$

$$\Leftrightarrow \quad \sin\vartheta^* = \sqrt{1-\cos^2\vartheta^*} = \sqrt{1-\beta^{*2}/\beta_{cm}^2} = \frac{1}{\beta_{cm}}\sqrt{\beta_{cm}^2-\beta^{*2}}$$

il corrispondente angolo ϑ_{MAX} è dato da

$$\tan(\vartheta_{max}) = \frac{\frac{1}{\beta_{cm}}\sqrt{\beta_{cm}^2 - \beta^{*2}}}{\gamma_{cm}\left(\frac{\beta_{cm}}{\beta^*} - \frac{\beta^*}{\beta_{cm}}\right)} =$$

$$= \frac{\sqrt{\beta_{cm}^2 - \beta^{*2}}}{\cancel{\beta_{cm}}\gamma_{cm}\left(\frac{\beta_{cm}^2 - \beta^{*2}}{\beta^*\cancel{\beta_{cm}}}\right)}$$

$$\Rightarrow \tan(\vartheta_{max}) = \frac{\beta^*}{\gamma_{cm}\sqrt{\beta_{cm}^2 - \beta^{*2}}}$$

OK in corrispondenza di quest angolo abbiamo

$$E(\vartheta_{max}) = \gamma_{cm}\left(E^* + \beta_{cm}\, p^* \underbrace{\cos\vartheta^*}_{= -\beta^*/\beta_{cm}}\right) =$$

$$= \gamma_{cm}\left(E^* + \beta_{cm}\, p^*\left(-\frac{\beta^*}{\beta_{cm}}\right)\right) =$$

$$= \gamma_{cm}\left(E^* - \beta^* p^*\right) = \qquad \beta^* = \frac{p^*}{E^*}$$

$$= \gamma_{cm}\left(E^* - \frac{p^{*2}}{E^*}\right) =$$

$$= \gamma_{cm}\left(\frac{E^{*2} - p^{*2}}{E^*}\right) = \gamma_{cm}\frac{m^2}{E^*} \qquad \gamma^* = \frac{E^*}{m}$$

$$= m\frac{\gamma_{cm}}{\gamma^*} = E(\vartheta_{max}) \neq E_{max}\,!$$

per che angolo si ottiene E_{max}?

ok quello era il caso $\beta_{cm} > \beta^*$
e abbiamo visto che "vince" boost
(flippa velocità di b)

$\boxed{\text{CASO}: \beta_{cm} < \beta^*}$

$\Rightarrow \ \exists\, \vartheta^*$ t.c. $\vartheta_{LAB} > \frac{\pi}{2}$

$\vartheta = \frac{\pi}{2}$ quando $\cos\vartheta^* = -\beta_{cm}/\beta^*$

NON esiste ϑ_{MAX} (ovvero $\vartheta_{MAX} = \pi$)

derivata di (1) non si annulla mai

$\boxed{\text{CASO}: \beta_{cm} = \beta^*}$

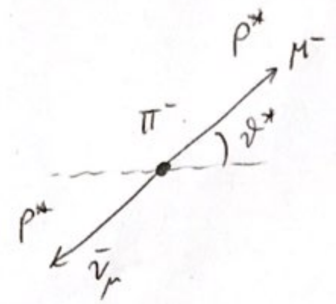
il boost annulla esattamente β^*

$\boxed{\text{Ex}}$ $\pi^- \to \mu^- \bar{\nu}_\mu$

per che impulso del π i muoni sono sempre emessi in avanti ?

$m(\pi^-) = 140$ MeV $\quad m(\mu^-) = 106$ MeV $\quad m(\nu) = 0$

$\boxed{\text{CdM}}$



stato iniziale : $\begin{pmatrix} m_\pi \\ \vec{0} \end{pmatrix}$

stato finale : $\begin{pmatrix} E_\mu^* \\ p^* \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E_\nu^* \\ -p^* \end{pmatrix}$

ma $m_\nu = 0 \Rightarrow E_\nu^* = p^*$

$\Rightarrow m_\pi = E_\mu^* + p^*$

$m_\pi - p^* = E_\mu^*$ e quadro

$m_\pi^2 + \cancel{p^{*2}} - 2 m_\pi p^* = E_\mu^{*2} = m_\mu^2 + \cancel{p^{*2}}$

$\Rightarrow p^* = \dfrac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2 m_\pi} = \dfrac{140^2 - 106^2}{2 \cdot 140} = 30$ MeV

$\Rightarrow E_\mu^* = \sqrt{p^{*2} + m_\mu^2} = \sqrt{30^2 + 106^2} = 110$ MeV

MONOCROMATICO !

$$\rightarrow \beta_\mu^* = \frac{p^*}{E_\mu^*} = \frac{30}{110} = 0.27$$

μ sempre in avanti se $\beta_{cm} > \beta^*$

$$\beta_{cm} = \beta_\pi = \frac{p_\pi}{E_\pi}$$ ← nel LAB

$\Rightarrow$ serve $\beta_\pi > 0.27$

$$\Leftrightarrow \quad \gamma_\pi > \frac{1}{\sqrt{1-\beta_\pi^2}} = 1.04 = \frac{E_\pi}{m_\pi}$$

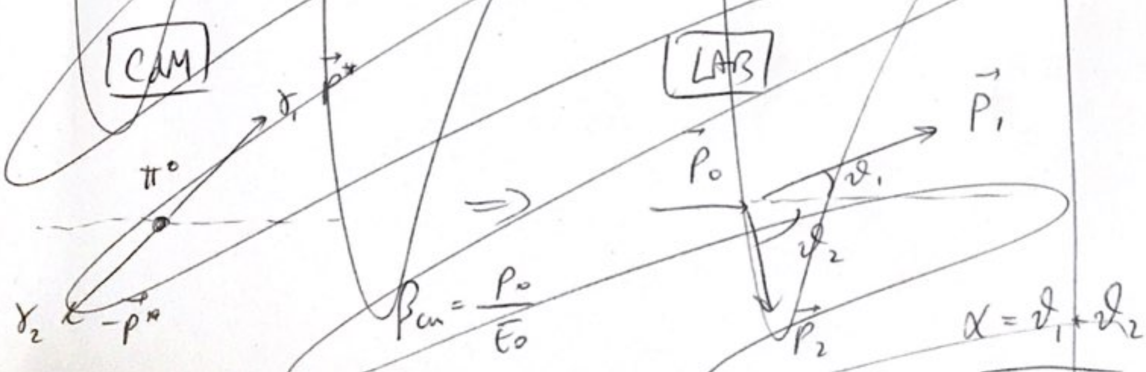
$$\rightarrow E_\pi > 1.04\, m_\pi = 1.04 \cdot 140 \text{ MeV} = 145 \text{ MeV}$$

$$\Leftrightarrow \quad p_\pi = \sqrt{E_\pi^2 - m_\pi^2} = \sqrt{145^2 - 140^2} = 38 \text{ MeV}$$

~~DECADIMENTO DEL π^0~~

$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ $\quad m(\pi^0) \sim 135$ MeV $\quad m(\gamma) = 0$

$\tau(\pi^0) = 8.4 \cdot 10^{-17}$ s



ENERGIA NEL CENTRO DI MASSA

abbiamo visto che 4vettore Energia-impulso TOTALE si conserva

$$P_{TOT} = \sum_i \begin{pmatrix} E_i \\ \vec{p}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{TOT} \\ \vec{p}_{TOT} \end{pmatrix}$$

componente per componente

$$\Rightarrow \quad P_{TOT}\Big|_{s.i.} = P_{TOT}\Big|_{s.f.}$$

nello stesso SdR

ma in generale NON è invariante

cambia con boost di Lorentz!

$$\begin{array}{lcccc} & s.i. & & s.f. & \\ SdR_1 & (P_{TOT})_i & = & (P_{TOT})_i & \\ & \neq & & \neq & \text{es. LAB e CdM} \\ SdR_2 & (P_{TOT})_i & = & (P_{TOT})_i & \end{array}$$

Però come per TUTTI i 4vettori la sua norma è invariante

$$\Rightarrow \quad |P_{TOT}| = \sqrt{\left(\sum_i E_i\right)^2 - \left|\sum_i \vec{p}_i\right|^2} \equiv \sqrt{s}$$

visto che è invariante la posso calcolare nel SdR che preferisco

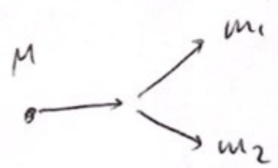
$\Rightarrow$ la calcolo nel CdM

$$|P_{TOT}| = |P^*_{TOT}| = \sqrt{\left(\sum_i E_i^*\right)^2 - \underbrace{\left|\sum_i \vec{p}_i^{\,*}\right|^2}_{=0\ (\text{cdm})}} = \sum_i E_i^*$$

$\Rightarrow \sqrt{s} = \sum_i E_i^*$ ENERGIA NEL CENTRO DI MASSA

$$\begin{array}{c|c|c|c} & \text{s.i.} & & \text{s.f.} \\ SdR_1 & \sqrt{s} & = & \sqrt{s} \\ & \parallel & & \parallel \\ SdR_2 & \sqrt{s} & = & \sqrt{s} \end{array}$$

TORNIAMO AL DECADIMENTO IN DUE CORPI



s.i. c'è solo M $\quad P_{TOT} = \begin{pmatrix} E_M \\ \vec{p}_M \end{pmatrix}$

$$\Rightarrow \sqrt{s} = |P_{TOT}| = \sqrt{E_M^2 - \vec{p}_M^{\,2}} = M$$

$\sqrt{s} = M$ vale anche per s.f. !

(s.f.) $m_1 : \begin{pmatrix} E_1 \\ \vec{p}_1 \end{pmatrix} \quad m_2 : \begin{pmatrix} E_2 \\ \vec{p}_2 \end{pmatrix}$

$$\Rightarrow \quad P_{TOT} = \begin{pmatrix} E_1 + E_2 \\ \vec{p}_1 + \vec{p}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{TOT} \\ \vec{p}_{TOT} \end{pmatrix}$$

$$\sqrt{s} = \sqrt{(E_1+E_2)^2 - |\vec{p}_1+\vec{p}_2|^2} \equiv M$$

le p.lle dello stato finale si ricordano di M

($\forall$ SdR)

UNO DEI PRINCIPALI MODI CON CUI SI SCOPRONO PARTICELLE INSTABILI IN FISICA DELLE PARTICELLE

$\boxed{\text{ES : HIGGS}}$ $\quad m_H = 125$ GeV

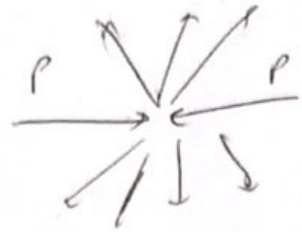
$H \to \gamma\gamma \quad m_\gamma = 0$

vita media cortissima (si vedono solo i fotoni)

come capisco che sono due fotoni prodotti da H e non due fotoni a caso?

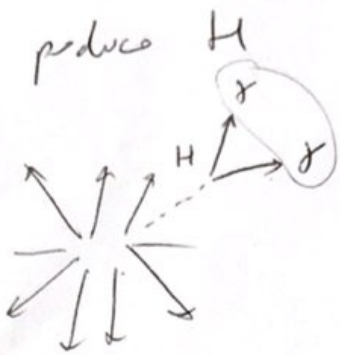
~~vedi~~ vediamo LHC :

LHC: due fasci di protoni che si scontrano

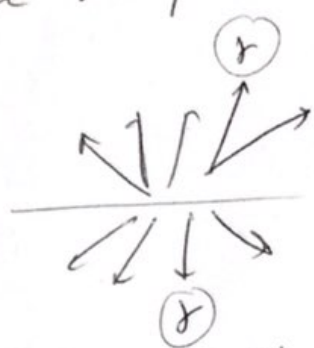


ed escono tutte p.lle

se produco H



se non produco H



ignoro tutto il resto e considero solo i due fotoni

di due fotoni misuro ENERGIA e DIREZIONE

$$P_{\gamma_1} = \begin{pmatrix} E_{\gamma_1} \\ \vec{p}_{\gamma_1} \end{pmatrix} \qquad |\vec{p}_1| = E_1 \quad (m_\gamma = 0)$$

$$P_{\gamma_2} = \begin{pmatrix} E_{\gamma_2} \\ \vec{p}_{\gamma_2} \end{pmatrix}$$

calcolo la <u>MASSA INVARIANTE</u> del sistema di due γ

$$M_{inv} = \sqrt{(E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2})^2 - |\vec{p}_{\gamma_1} + \vec{p}_{\gamma_2}|^2}$$

<u>QUANTITA' SPERIMENTALE</u>

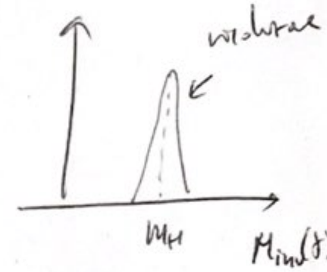
Se i due γ vengono da H allora

$$\text{s.i.} \qquad\qquad \text{s.f.}$$

$$H = \begin{pmatrix} E_H \\ \vec{p}_H \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} E_{\gamma_1} \\ \vec{p}_{\gamma_1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E_{\gamma_2} \\ \vec{p}_{\gamma_2} \end{pmatrix}$$

~~Se invece NON vengono~~

$$\Rightarrow M_{inv}(\gamma\gamma) \overset{!}{=} \sqrt{s}\Big|_{s.i.} \equiv M_H$$



se invece NON vengono da H

s.i.

NON DEFINITO

$$\Rightarrow \sqrt{s}\Big|_{s.i.} \text{ variabile}$$