PARTIKEL FYSIK
(v. Hedberg)

Inledning

- Ordförråd
- Relativitetsteori
- Kvantmekanik
- Enheter
- Feynman diagram
- Lagrange formulism
- Grupp teori

Hjälpmedel

- Symmetrier
- Hadroner
- Leptoner
- Fältteorier

⋮

- Experimentella metoder

Ordförråd

Elementarpartiklar → se boken 1.1 2.1 2.2

Kvarker → se boken 1.1

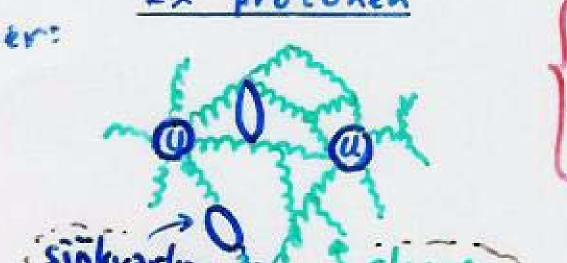
Acceleratorer → se boken 3.1

Nya begrepp

Kvarkar
Gluoner
Leptoner
Partoner
Gauge bosoner
Svaga bosoner
Graviton
Hadroner
Baryoner
Mesoner
Kvantfältteori
QED
QCD
Electroweak teory
Fixed target
CERN
DESY
Fermilab
SLAC
LEP
HERA
SSC
LHC
Lorentztransformation
4-vektorer
Mandelstam variabler

"Center of mass system"
"Center of mass energy"
"Momentum"
Klein-Gordon ekvationen
Dirac ekvationen
Spinor
Lagrangefunktionen
"The principle of least action"
Feynman diagram
Virtuella fotoner
Symmetrier
Grupptoeri
U(1)
SU(2)
SU(3)
Pauli matriser
Gell-Mann matriser
Colour
Flavour

Vad består materian av och hur hålls den samman?

	Ex Vätgas	Observerbara krafter
Molekyler:		Gravitationen påverkar all typ av materia men är mycket svag och det krävs stor mängder av materia för att den ska kunna observeras. Den elektromagnetiska kraften håller samman molekylerna.
Atomer:	Ex Väteatomen 	Det är den elektromagnetiska kraften som håller samman atomerna och som orsakar olika atomfysikaliska fenomen.
Atomkärnor:	Ex β-sönderfall  $T \rightarrow He + e^- + \nu_e$	β-sönderfallet orsakas av den svaga kraften. Nukleonerna i en atomkärna hålls samman av den starka kraften trots att protonerna repellerar varandra p.g.a. den elektromagnetiska kraften.
Nukleoner:	Ex protonen 	Protonen består av kvarkar och gluoner. Dessa kan växelverka med hjälp av den starka, svaga och elektromagnetiska kraften. Partoner (gemensamt namn för nukleonens beståndsdelar)
Leptoner:	Ex elektronen och elektronneutrinon e^-	Elektronerna kan växelverka med hjälp av den svaga och elektromagnetiska kraften.
	ν_e	Neutrinerna kan bara växelverka svagt.

Elementarpartiklar

Fermioner (spin = 1/2)

Leptoner

$$\begin{pmatrix}\nu_e\\ e^-\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\nu_\mu\\ \mu^-\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\nu_\tau\\ \tau^-\end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix}\bar\nu_e\\ e^+\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\bar\nu_\mu\\ \mu^+\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\bar\nu_\tau\\ \tau^+\end{pmatrix}$$

Kvarkar

$$\begin{pmatrix}u\\ d\end{pmatrix}\begin{pmatrix}c\\ s\end{pmatrix}\begin{pmatrix}t\\ b\end{pmatrix}$$

$$\underbrace{\begin{pmatrix}\bar u\\ \bar d\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\bar c\\ \bar s\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\bar t\\ \bar b\end{pmatrix}}_{\text{Hadroner}}$$

Bosoner (spin = 1, 2)

"Gauge" bosoner

Fotonen: γ

Gluoner: $g_1\ g_2\ g_3\ g_4\ g_5\ g_6\ g_7\ g_8$

Svaga bosoner: $W^+\ W^-\ Z^0$

(Gravitonen: G)

(Higgs boson: H^0)

Hadroner

Baryoner	Antibaryoner	Mesoner
tex p : uud	tex $\bar p$: $\bar u\bar u\bar d$	tex π^+ : $u\bar d$
n : udd	$\bar n$: $\bar u\bar d\bar d$	π^- : $\bar u d$
Λ : uds	$\bar\Lambda$: $\bar u\bar d\bar s$	K^+ : $u\bar s$
Δ^- : ddd	$\bar\Delta^-$: $\bar d\bar d\bar d$	ρ^- : $d\bar u$
⋮	⋮	K^0 : $d\bar s$
		$\bar K^0$: $\bar d s$
		⋮

Baryoner och antibaryoner: Fermioner (spin = $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}$)

Mesoner: Bosoner (spin = 0, 1)

Fält teori

Klassisk fältteori

Växelverkan mellan två partiklar beskrivs av en potential.

Denna fältteori fungerar bra i beskrivningar av växelverkan som sker på långa avstånd tex gravitation och elektromagnetism.

$$V(r) = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

Kvantfältteori

Växelverkan mellan två partiklar sker genom utbyte av andra partiklar s.k. "gauge" bosoner

Denna fältteori kan också beskriva växelverkan som sker på korta avstånd i den subatomära världen dvs svag och stark växelverkan

Exempel på kvantfältteorier:

1. QED "Quantum ElectroDynamics" (gauge bosoner = γ)
   Denna teori beskriver den <u>elektromagnetiska</u> kraften

2. QCD "Quantum ChromoDynamics" (gauge bosoner = $g_1\, g_2\, g_3\, g_4\, g_5\, g_6\, g_7\, g_8$)
   Denna teori beskriver den <u>starka</u> kraften

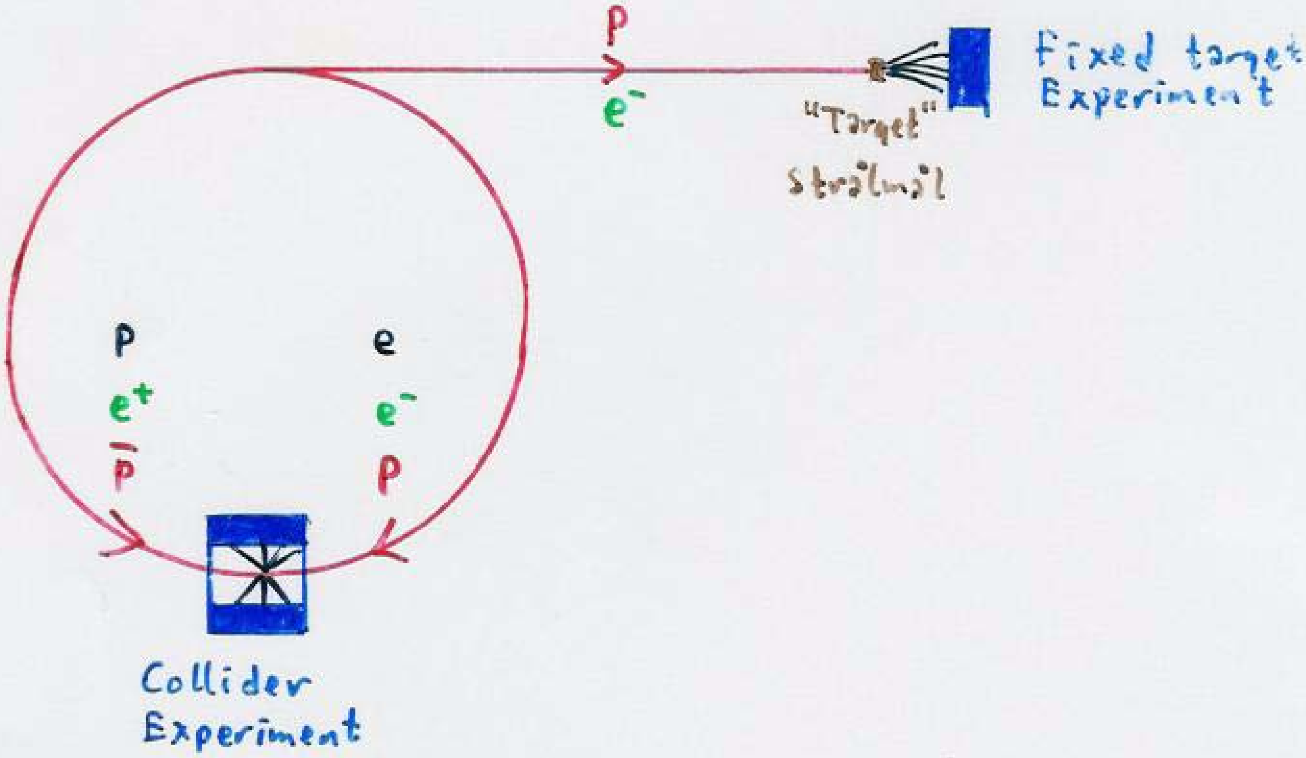
3. "Electroweak teory" (gauge bosoner = $\gamma\ Z^0\ W^+\ W^-$)
   Denna teori beskriver både den <u>svaga</u> och den elektromagnetiska kraften.

("General Relativity" är en klassisk fältteori som beskriver gravitationen. En kvantfältteori för gravitationen finns ej.)

Experimentell Partikel fysik

Acceleratorer: Synkrotroner — cirkulära acceleratorer
Linacs — linjära acceleratorer

Experiment: "Fixed target" — En partikelstråle skjuts på ett strålmål
"Collider" — Två partikelstrålar skjuts mot varandra



Partikel fysik laboratorier

Laboratorium	Accelerator	Experimenttyp	Partiklar	Partikelenergi (GeV)
CERN (Europa)	PS	fixed target	p	28
	SPS	fixed target	p	450
	S$\bar{p}$pS	collider	p, $\bar{p}$	450, 450
	LEP	collider	e^+, e^-	50, 50
	LEP II	collider	e^+, e^-	100, 100
	LHC	collider	p, p	8000, 8000
			e^-, p	50, 8000
DESY (Tyskland)	HERA	collider	e^-, p	26, 820
Fermilab (USA)	Tevatron	fixed target	p	1000
		collider	p, $\bar{p}$	1000, 1000
Stanford (USA)	SLAC	fixed target	e^-	25
	PEP	collider	e^+, e^-	15, 15
	SLC	collider	e^+, e^-	50, 50
Brookhaven (USA)	AGS	fixed target	p	32
KEK (Japan)	KEK	fixed target	p	12
	Tristan	collider	e^+, e^-	32, 32
Serpukhov (Ryssland)	–	fixed target	p	76
	UNK	collider	p, $\bar{p}$	3000, 3000
~~SSC~~	~~SSC~~	~~collider~~	~~p, p~~	~~20000, 20000~~

! Pris ca 50-70 miljarder kroner !

- <u>Relativitetsteori</u> → se stencil

Lorentz transformation → se boken A.1

$E^2 = p^2 + m^2$ → se boken A.2

- <u>Enhetsbyte</u> → se boken 1.5

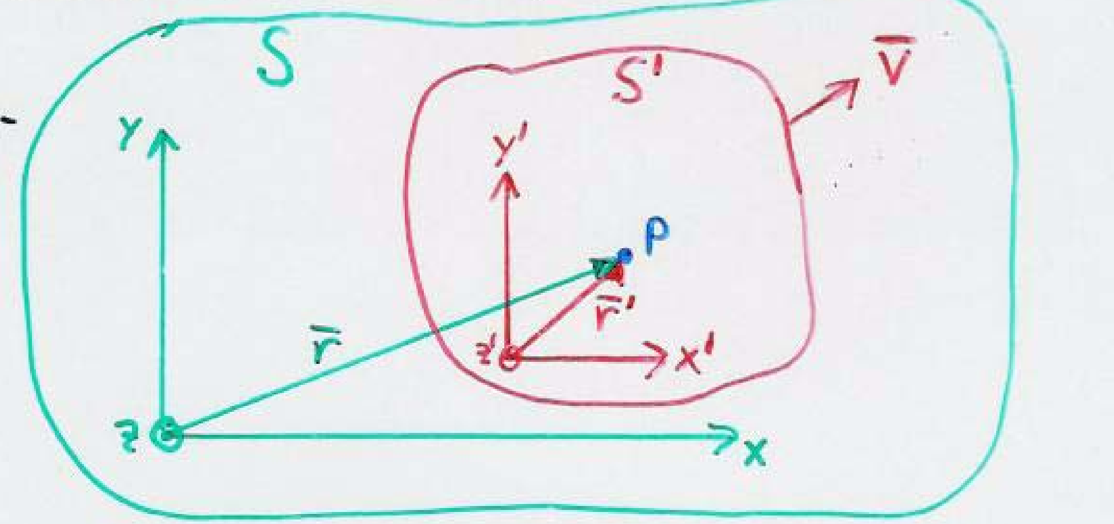
- <u>Relativitetsteori</u> (fortsättning)

4-vektorer → se boken A.1

Center-of-mass system → se boken A.2

Relativitetsteori

Anta två referensramar S och S' som rör sig med hastigheten $\bar{V}$ relativt varandra:



För klassisk Galileisk transformation gäller att

$$\begin{cases} \bar{r}' = \bar{r} - \bar{V}\cdot t \\ t' = t \end{cases}$$

vissa av fysikens lagar (tex Schrödinger ekvationen) är invarianta (ändras inte) om man gör denna transformation. Andra (tex Maxwells ekvationer) är inte invarianta under Galileisk transformation.

I relativitetsteori antar man två axiom:

1. Alla naturlagar är lika i alla referensramar.
2. Ljushastigheten är lika i alla referensramar.

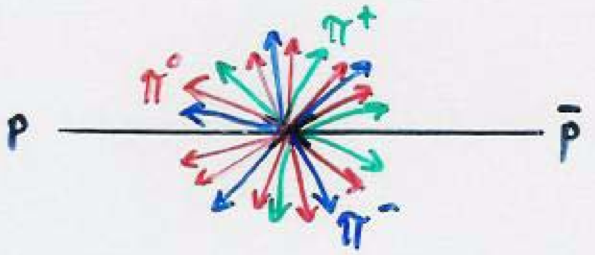
Detta ger upphov till Lorentz transformationen

$$\begin{cases} r_{\parallel}' = \dfrac{1}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}}(r_{\parallel} - v\cdot t) = \gamma(r_{\parallel} - v\cdot t) \\ r_{\perp}' = r_{\perp} \\ t' = \dfrac{1}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}}(t - \frac{v}{c^2} r_{\parallel}) = \gamma(t - \frac{v}{c^2} r_{\parallel}) \end{cases}$$

där $r_{\parallel}$ är komponenten av $\bar{r}$ i $\bar{V}$'s riktning och

$r_{\perp}$ är komponenten av $\bar{r}$ vinkelrät mot $\bar{V}$'s riktning

Exempel

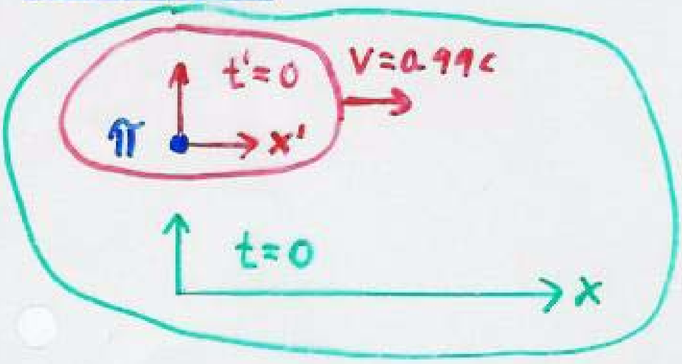


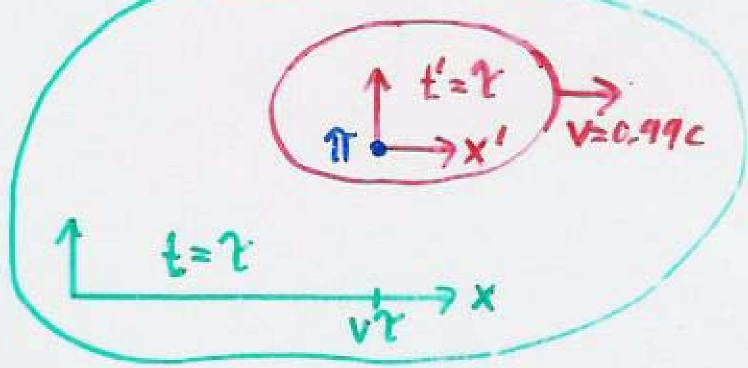
I en högenergetisk kollision mellan en proton och en antiproton bildas typiskt 10st π^0, 5st π^+ och 5st π^-

Den genomsnittliga livslängden för en π^0 är $\tau = 8 \cdot 10^{-17}$ s och för en π^+/π^- är den $\tau = 3 \cdot 10^{-8}$ s

Om pionernas hastighet $\beta = \frac{v}{c}$ är 0.99 hur långt färdas de i detektorn innan de sönderfaller?

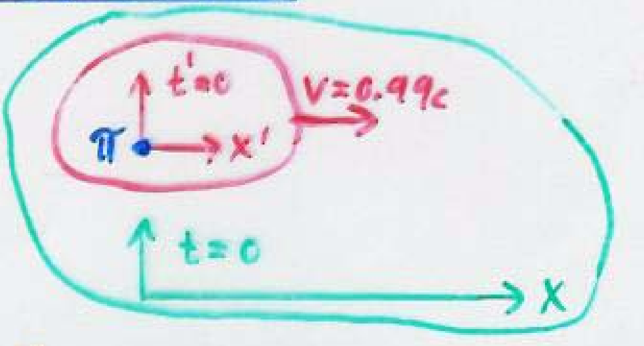
Klassiskt:

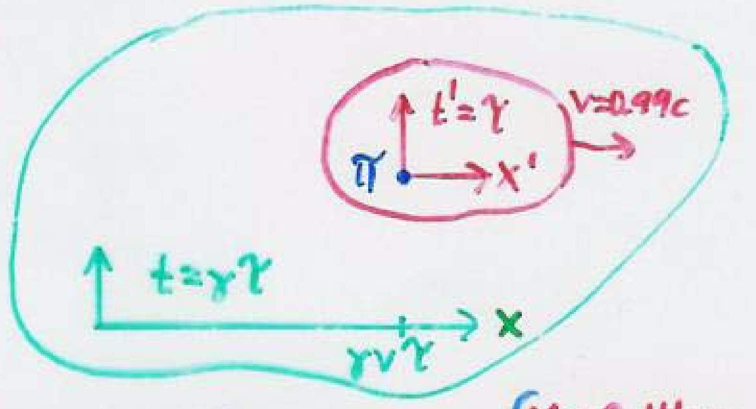




$$\begin{cases} x = v \cdot t + x' = 0.99 \cdot c \cdot \tau + 0 \\ t = t' = \tau \end{cases} \qquad \underset{\pi^0}{= 0.02\,\mu m} \qquad \underset{\pi^{+/-}}{= 9\,m}$$

Relativistiskt





$$\begin{cases} x = \gamma(x' + vt') = \gamma v \tau \\ t = \gamma(t' + \frac{v}{c^2}x') = \gamma\tau \end{cases} \quad \text{eftersom } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = 7 \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} x = 0.14\,\mu m & \pi^0 \\ x = 63\,m & \pi^{+/-} \end{cases}$$

Ljushastigheten är $= c$ i alla referensramar ger alltså:

$$x = \gamma x' = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\, x'$$

$$t = \gamma t' = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\, t'$$

"Lorentz contraction"

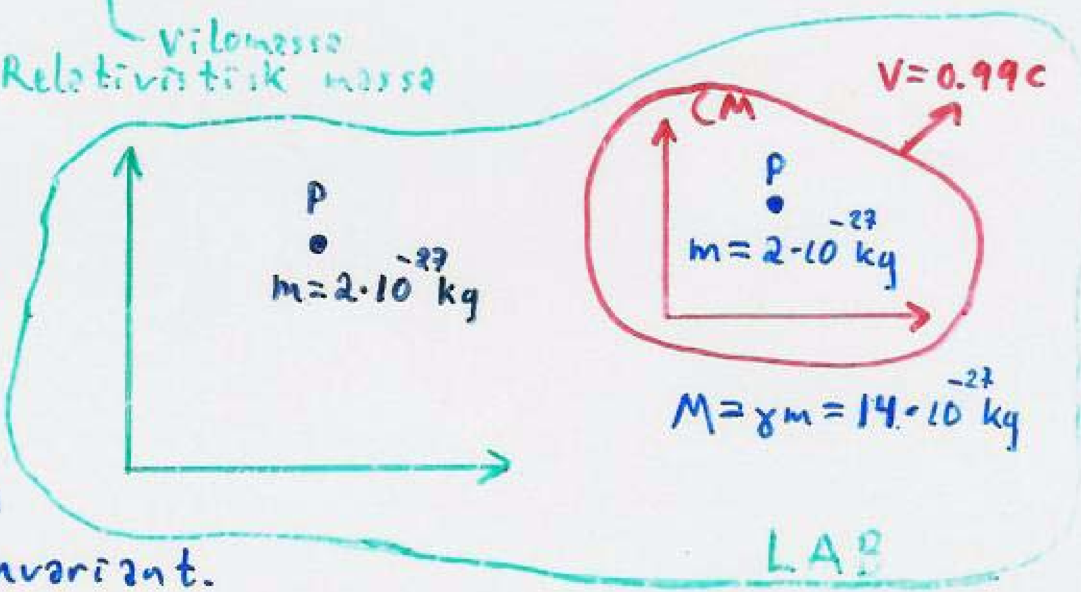
Konservering av massa och rörelsemängd är två lagar som är Lorentz invarianta $\Rightarrow$

$$M = \gamma m = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\, m$$

Vilomassa

Relativistisk massa

Vilomassan m för en partikel är den samma i alla referensramar. Dvs den är Lorentz Invariant.



Lorentz invarianta kvantiteter:	Icke-Lorentz invarianta kvantiteter
c: Ljushastigheten	t: tid
m: Vilomassan	x: Längd
	M: Massa
	E: Energi
	p: Rörelsemängd

A) Energi

$$E = Mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = mc^2 + \frac{mv^2}{2} + \ldots$$

kinetisk energi

energi från vilomassan

B) Rörelsemängd (eng. "Momentum")

$$\bar{p} = M\bar{v}$$

C) Relationen mellan E, p, m:

$$Mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow (Mc^2)^2\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right) = (mc^2)^2$$

Sätt in $v = \frac{p}{M}$ $\Rightarrow$ $M^2c^4\left(1-\frac{p^2}{M^2c^2}\right) = m^2c^4$

Sätt in $E = Mc^2$ $\Rightarrow$ $E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$ dvs

$$\boxed{E^2 = p^2c^2 + m^2c^4}$$

Dvs för masslösa partiklar som photonen gäller:

$$E_\gamma = p_\gamma c$$

Enhetsbyte

- Vi bestämmer oss för att mäta energi i elektronvolt
  $1\,eV = 1.602 \cdot 10^{-19}\,J$

- Vi inför följande:
  $1\,keV = 10^{3}\,eV$ $\quad$ $1\,GeV = 10^{9}\,eV$
  $1\,MeV = 10^{6}\,eV$ $\quad$ $1\,TeV = 10^{12}\,eV$

- Vi ändrar alla andra enheter så att $c=1$ och $\hbar=1$ i våra formler.

  Exempel: $E=Mc^2$ blir $E=M$ om $\begin{cases} E \text{ mäts i } GeV \\ M \text{ mäts i } GeV/c^2 \end{cases}$

- På detta sätt får vi följande enheter:

E	Energi	$1\,GeV$	$= 1.602 \cdot 10^{-10}$	J
m	Massa	$1\,GeV/c^2$	$= 1.783 \cdot 10^{-27}$	kg
p	Rörelsemängd	$1\,GeV/c$	$= 5.344 \cdot 10^{-19}$	$kg\cdot m/s$
L	Längd	$1\,\hbar c/GeV$	$= 1.973 \cdot 10^{-16}$	m
t	Tid	$1\,\hbar/GeV$	$= 6.582 \cdot 10^{-25}$	s
β	Hastighet	$1\,c$	$= 2.998 \cdot 10^{8}$	m/s

- Exempel på vilomassor:

Leptoner:
- ν: $m \approx 0$
- e: $m = 0.510\,MeV/c^2$
- μ: $m = 106\,MeV/c^2$
- τ: $m = 1784\,MeV/c^2$

Gauge bosoner:
- g, γ: $m = 0$
- W: $m = 80600\,MeV/c^2$
- Z: $m = 91000\,MeV/c^2$

KVARKAR:
- d: $m \approx 350\,MeV/c^2$
- u: $m \approx 350\,MeV/c^2$
- s: $m \approx 500\,MeV/c^2$
- c: $m \approx 1500\,MeV/c^2$
- b: $m \approx 4500\,MeV/c^2$
- t: $m \approx 200\,000\,MeV/c^2$?

Pb: $m \approx 194\,000\,MeV/c^2$

Beteckningar

$\vec{a}$: 4-vektor

$\bar{a}$: 3-vektor

tex $\vec{a} = (t, \bar{a})$

$\underline{a}$: matris tex $\underline{\gamma}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$

$\hat{a}$: operator tex $\hat{L}_z = -i\left(x\frac{\partial}{\partial y} - y\frac{\partial}{\partial x}\right)$

ψ : vågfunktion

$\underline{\psi}$: fler-dimentionell vågfunktion

tex $\underline{\psi}_e = \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \\ \psi_4 \end{pmatrix}$

Relativistisk kinematik

4-vektorer

"Space-time four vector": $\vec{r} = (t, \bar{r}) = (t, x, y, z)$ (4-vektor: $\vec{r}$; 3-vektor: $\bar{r}$)

"Energy-momentum four vector": $\vec{p} = (E, \bar{p}) = (E, p_x, p_y, p_z)$

Skalärprodukten av två 4-vektorer är Lorentz invariant:

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = (A_0, \bar{A}) \cdot (B_0, \bar{B}) = A_0 \cdot B_0 - \bar{A} \cdot \bar{B}$$

"vanlig" skalärprodukt

Addition och subtraktion av 4-vektorer:

$$\vec{A} + \vec{B} = (A_0, A_x, A_y, A_z) + (B_0, B_x, B_y, B_z) = (A_0 + B_0, A_x + B_x, A_y + B_y, A_z + B_z)$$
$$\vec{A} - \vec{B} = (A_0, A_x, A_y, A_z) - (B_0, B_x, B_y, B_z) = (A_0 - B_0, A_x - B_x, A_y - B_y, A_z - B_z)$$

Massa

Den Lorentzinvarianta massan av en partikel ges av

$$\vec{p} \cdot \vec{p} = (E, \bar{p}) \cdot (E, \bar{p}) = \underline{E^2 - \bar{p}^2 = m^2}$$

Massan i kvadrat av två partiklar ges av

$$S = (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\bar{p}_1 + \bar{p}_2)^2$$

Massan i kvadrat av n partiklar ges av

$$W^2 = (\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \ldots + \vec{p}_n)^2 = (E_1 + E_2 + \ldots E_n)^2 - (\bar{p}_1 + \bar{p}_2 + \ldots \bar{p}_n)^2$$

Energi → Hastighet → Rörelsemängd

För en partikel med 4-vektor $\vec{p} = (E, \bar{p})$ och massan m gäller:

$$\begin{cases} E = \gamma m \\ \bar{p} = \gamma m \bar{\beta} \end{cases} \quad \text{där} \quad \begin{cases} \bar{\beta} = \frac{\bar{v}}{c} \\ \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \end{cases}$$

Kollision mellan två partiklar

$$a + b \longrightarrow c + d$$

Mandelstam variabler

Dessa definieras på följande sätt

$$\begin{cases} s = (\vec{p}_a + \vec{p}_b)^2 = (\vec{p}_c + \vec{p}_d)^2 \\ t = (\vec{p}_a - \vec{p}_c)^2 = (\vec{p}_b - \vec{p}_d)^2 \\ u = (\vec{p}_a - \vec{p}_d)^2 = (\vec{p}_b - \vec{p}_c)^2 \end{cases}$$

då gäller att

$$s + t + u = m_a^2 + m_b^2 + m_c^2 + m_d^2$$

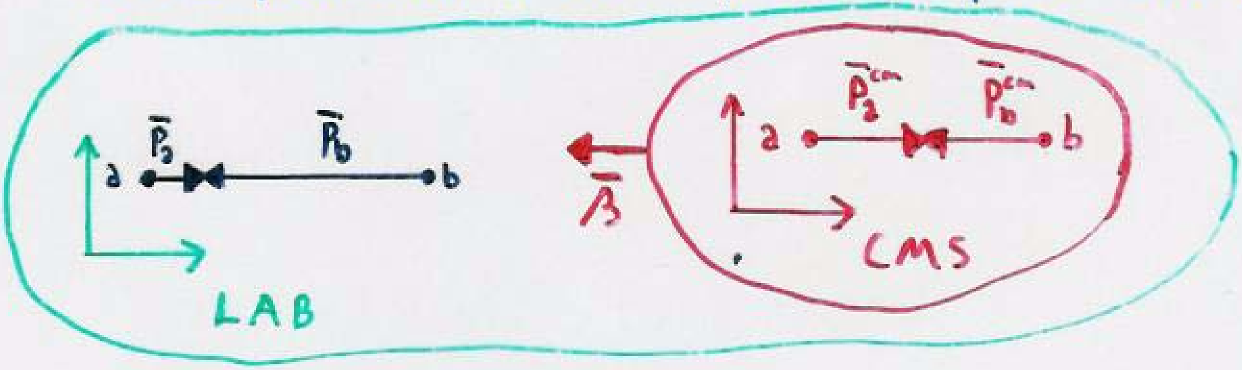
Konservering av energi och rörelsemängd

Vi vet empiriskt att

$$\vec{p}_a + \vec{p}_b = \vec{p}_c + \vec{p}_d \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} E_a + E_b = E_c + E_d \\ \bar{p}_a + \bar{p}_b = \bar{p}_c + \bar{p}_d \end{cases}$$

"Center of mass system" CMS

CMS av partiklarna a och b, är det system där $\bar{p}_a = -\bar{p}_b$:



$$\bar{\beta} = \frac{\bar{p}_a + \bar{p}_b}{E_a + E_b}$$

Lorentz transformation från LAB till CMS:

$$\begin{cases} p_{\parallel}^{cm} = \gamma(p_{\parallel}^{lab} - \beta E^{lab}) \\ p_{\perp}^{cm} = p_{\perp}^{lab} \\ E^{cm} = \gamma(E^{lab} - \beta p_{\parallel}^{lab}) \end{cases}$$

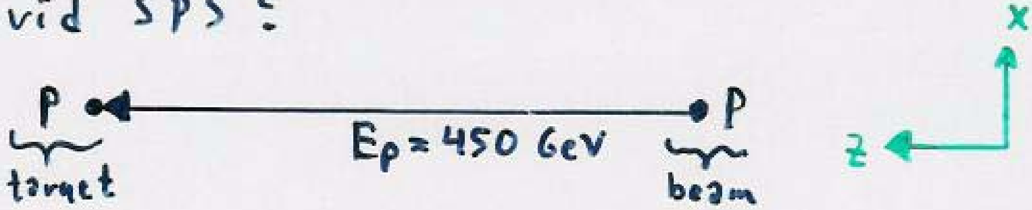
"Center of mass energy" $\sqrt{s}$

$\sqrt{s}$ kallas för "center of mass energy" eller "invariant mass" av de kolliderande partiklarna.

$$\sqrt{s} = \sqrt{(\vec{p}_a + \vec{p}_b)^2}$$

Detta är energin som är tillgänglig för att skapa nya partiklar.

$\sqrt{s}$ vid SPS?



P_T, P_B:

$$P_T = \sqrt{E_T^2 - m_p^2} = 0 \quad \Rightarrow \quad E_T = m_p$$

$$P_B = \sqrt{E_p^2 - m_p^2} \approx E_p$$

$\vec{P}_T, \vec{P}_B$:

$$\left.\begin{array}{l} \vec{P}_T = (m_p, 0, 0, 0) \\ \vec{P}_B = (E_p, 0, 0, E_p) \end{array}\right\} \quad \bar{P}_T + \bar{P}_B = (0, 0, E_p)$$

S:

$$s = (\vec{P}_T + \vec{P}_B)^2 = (m_p + E_p)^2 - (\bar{P}_T + \bar{P}_B)^2 = (m_p^2 + E_p^2 + 2 m_p E_p) - E_p^2$$

$$s \approx 2 m_p E_p$$

$$\underline{\sqrt{s} \approx \sqrt{2 m_p E_p}} = 29 \text{ GeV}$$

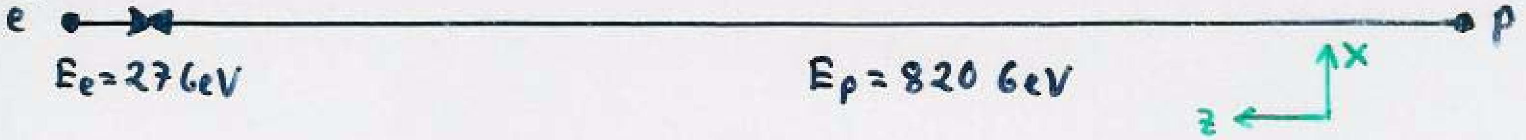
"Fixed target": $\sqrt{s} = \sqrt{2 m_a \cdot E_b}$

Kolliderare: $\sqrt{s} = \sqrt{4 E_a \cdot E_b} = 2E$

om $E_a = E_b$

Exempel

$\sqrt{s}$ vid Hera?



p_e, p_p:

$$E_e^2 = m_e^2 + p_e^2 \Rightarrow p_e = \sqrt{E_e^2 - m_e^2} = \sqrt{27^2 - 0.0005^2} \approx E_e$$
$$E_p^2 = m_p^2 + p_p^2 \Rightarrow p_p = \sqrt{E_p^2 - m_p^2} = \sqrt{820^2 - 0.938^2} \approx E_p$$

$\vec{P}_e, \vec{P}_p$:

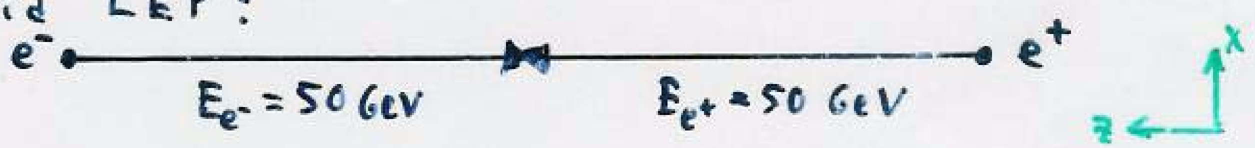
$$\left.\begin{aligned} \vec{P}_e &= (E_e, 0, 0, -E_e) \\ \vec{P}_p &= (E_p, 0, 0, E_p) \end{aligned}\right\} \Rightarrow \bar{p}_e + \bar{p}_p = (0, 0, E_p - E_e)$$

s:

$$s = (\vec{P}_e + \vec{P}_p)^2 = (E_e + E_p)^2 - (\bar{p}_e + \bar{p}_p)^2 = [E_e^2 + E_p^2 + 2E_eE_p] - [E_e^2 + E_p^2 - 2E_eE_p]$$

$$\underline{\sqrt{s} = \sqrt{4E_eE_p}} \approx 300 \text{ GeV}$$

$\sqrt{s}$ vid LEP?



p_{e^-}, p_{e^+}: $\quad p_{e^-} = p_{e^+} \approx E_{e^-} \approx E_{e^+} = E_e$

$\vec{P}_{e^-}, \vec{P}_{e^+}$:

$$\left.\begin{aligned} \vec{P}_{e^+} &= (E_e, 0, 0, E_e) \\ \vec{P}_{e^-} &= (E_e, 0, 0, -E_e) \end{aligned}\right\} \Rightarrow \bar{p}_{e^+} + \bar{p}_{e^-} = (0, 0, 0)$$

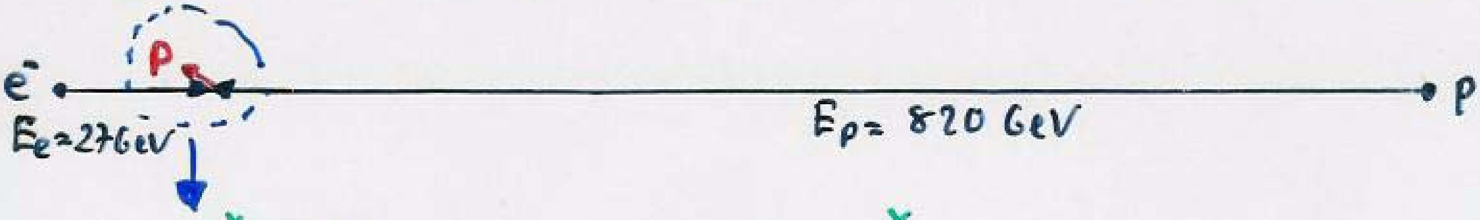
s:

$$s = (\vec{P}_{e^+} + \vec{P}_{e^-})^2 = (E_e + E_e)^2 - 0 = 4E_e^2$$

$$\underline{\sqrt{s} = 2E_e} = 100 \text{ GeV}$$

Exempel

Lorentztranformation från lab till cms vid Hera!



$$\bar{\beta} = \frac{\bar{p}_e + \bar{p}_p}{E_e + E_p} = \frac{(0,0,-E_e) + (0,0,E_p)}{E_e + E_p} = \frac{(0,0,E_p - E_e)}{E_e + E_p}$$

$$\beta = \frac{E_p - E_e}{E_p + E_e} = 0.936$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = 2.85$$

$$\bar{p}^{lab} = (1,0,2)\,\text{GeV} \Rightarrow p^{lab} = 2.24\ \text{GeV}$$

$$E^{lab} = \sqrt{m_p^2 + p^{lab\,2}} = 2.42\ \text{GeV}$$

Lorentz transformation

$$\begin{cases} p_x^{cm} = p_x^{lab} = 1\ \text{GeV} \\ p_z^{cm} = \gamma\,(p_z^{lab} - \beta E^{lab}) = -0.8\ \text{GeV} \\ E^{cm} = \gamma\,(E^{lab} - \beta p_z^{lab}) = 1.6\ \text{GeV} \end{cases}$$

$$\vec{P}_p = (1.6, 1, 0, -0.8)\ \text{GeV i CMS}$$

$$\vec{P}_p = (2.4, 1, 0, 2)\ \text{GeV i LAB}$$