

Første øvelse

Finde strange partikler i pp kollisioner

Christian Holm Christensen

Niels Bohr Institutet



Overblik

- ① ALICE
- ② Måling af ladet partikler
- ③ Almindeligt og „mærkeligt“ stof
- ④ Henfald af „mærkelige“ partikler
- ⑤ Invariant masse
- ⑥ Opgaven



Overblik

① ALICE

② Måling af ladet partikler

③ Almindeligt og „mærkeligt“ stof

④ Henfald af „mærkelige“ partikler

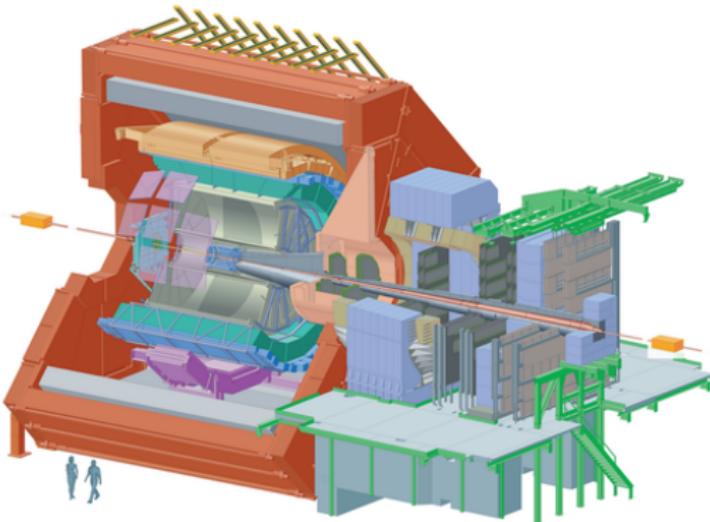
⑤ Invariant masse

⑥ Opgaven



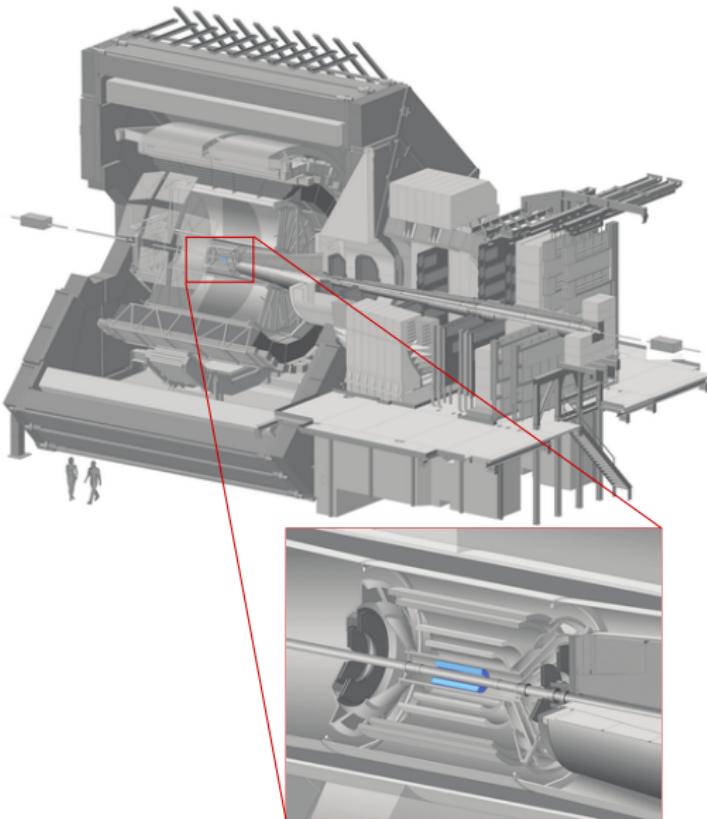
ALICE – de væsentlige dele for øvelsen

- SPD: ladet partikel spor
- SDD: ladet partikel spor
- SSD: ladet partikel spor
- TPC: ladet partikel spor
- TOF: ladet partikel flyvetid
- I magnetfelt



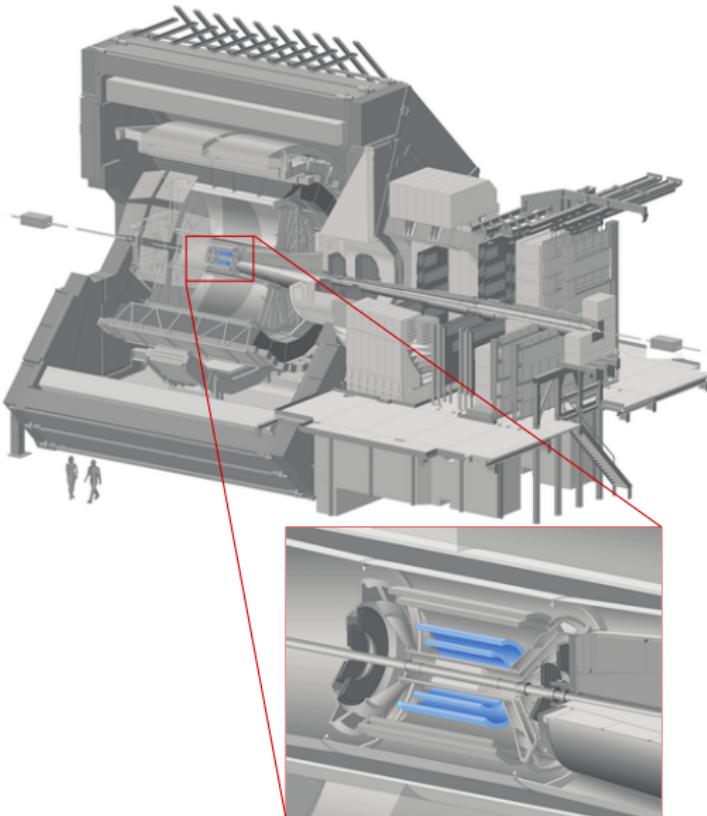
ALICE – de væsentlige dele for øvelsen

- SPD: ladet partikel spor
- SDD: ladet partikel spor
- SSD: ladet partikel spor
- TPC: ladet partikel spor
- TOF: ladet partikel flyvetid
- I magnetfelt



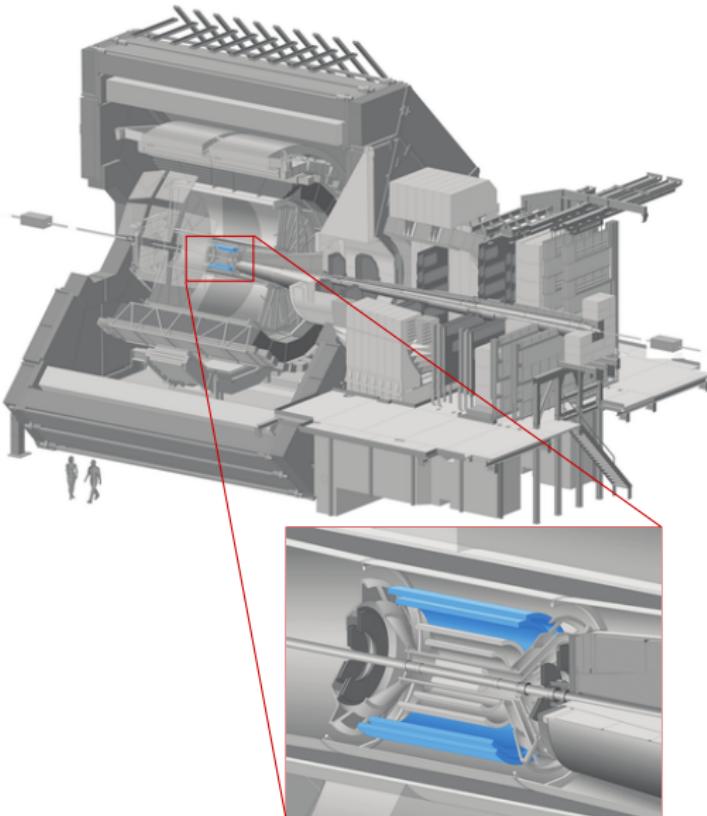
ALICE – de væsentlige dele for øvelsen

- SPD: ladet partikel spor
- SDD: ladet partikel spor
- SSD: ladet partikel spor
- TPC: ladet partikel spor
- TOF: ladet partikel flyvetid
- I magnetfelt



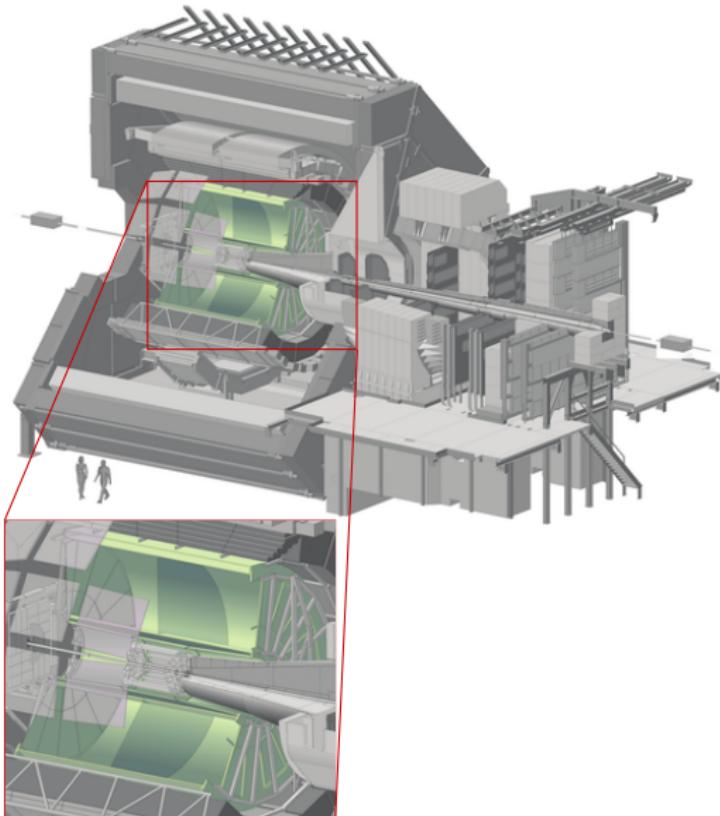
ALICE – de væsentlige dele for øvelsen

- SPD: ladet partikel spor
- SDD: ladet partikel spor
- **SSD: ladet partikel spor**
- TPC: ladet partikel spor
- TOF: ladet partikel flyvetid
- I magnetfelt



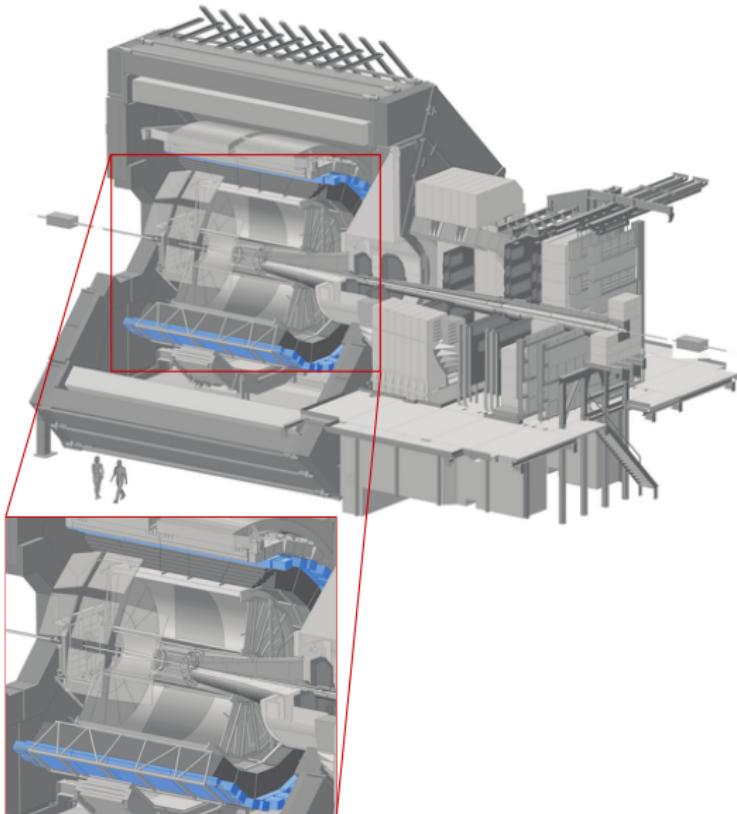
ALICE – de væsentlige dele for øvelsen

- SPD: ladet partikel spor
- SDD: ladet partikel spor
- SSD: ladet partikel spor
- TPC: ladet partikel spor
- TOF: ladet partikel flyvetid
- I magnetfelt



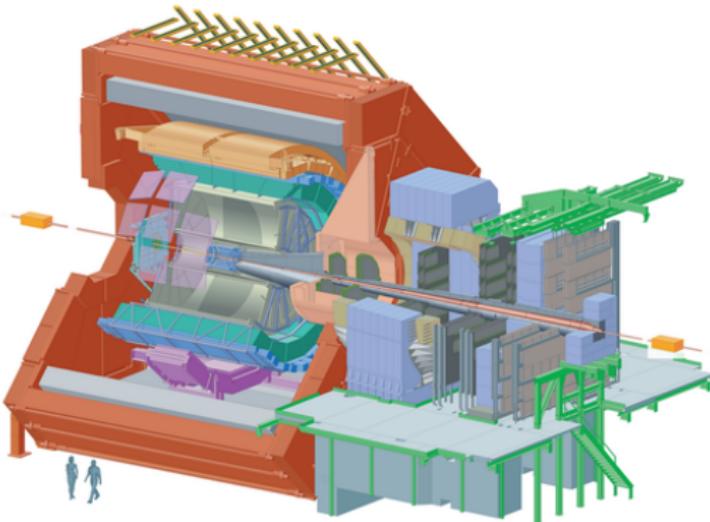
ALICE – de væsentlige dele for øvelsen

- SPD: ladet partikel spor
- SDD: ladet partikel spor
- SSD: ladet partikel spor
- TPC: ladet partikel spor
- TOF: ladet partikel flyvetid
- I magnetfelt



ALICE – de væsentlige dele for øvelsen

- SPD: ladet partikel spor
- SDD: ladet partikel spor
- SSD: ladet partikel spor
- TPC: ladet partikel spor
- TOF: ladet partikel flyvetid
- I magnetfelt



Overblik

① ALICE

② Måling af ladet partikler

③ Almindeligt og „mærkeligt“ stof

④ Henfald af „mærkelige“ partikler

⑤ Invariant masse

⑥ Opgaven



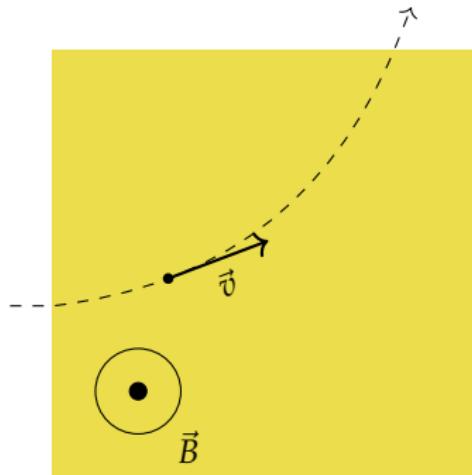
Ladet partikel i magnetfelt

- Ladet partikel afbøjes i magnetfelt

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} = m\vec{a}$$

q : ladning, \vec{v} : hastighed, \vec{a} : acceleration, m : masse, \vec{B} : magnet felt, \vec{F} :

kraften på partiklen



Ladet partikel i magnetfelt

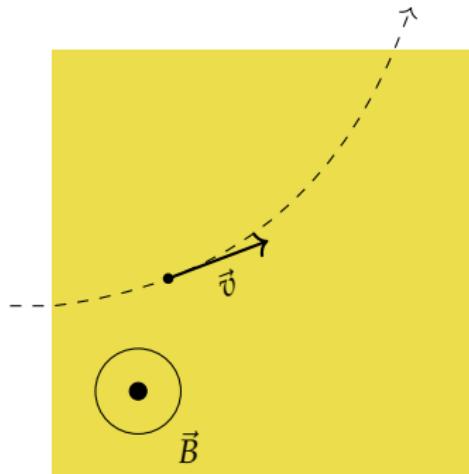
- Ladet partikel afbøjes i magnetfelt

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} = m\vec{a}$$

q : ladning, \vec{v} : hastighed, \vec{a} : acceleration, m : masse, \vec{B} : magnet felt, \vec{F} :

kraften på partiklen

- Afbøjes negativt og positivt ladet partikler samme vej?



Ladet partikel i magnetfelt

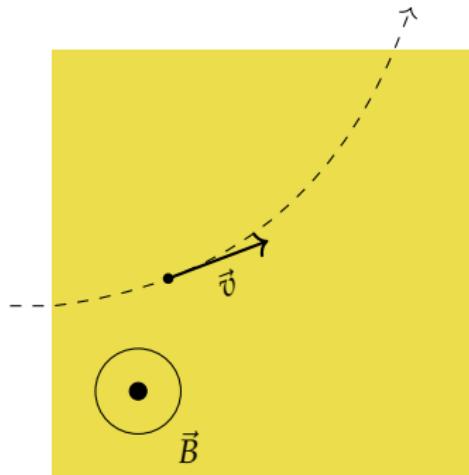
- Ladet partikel afbøjes i magnetfelt

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} = m\vec{a}$$

q: ladning, \vec{v} : hastighed, \vec{a} : acceleration, *m*: masse, \vec{B} : magnet felt, \vec{F} :

kraften på partiklen

- Afbøjes negativt og positivt ladet partikler samme vej?
nej, hver sin vej



Ladet partikel i magnetfelt

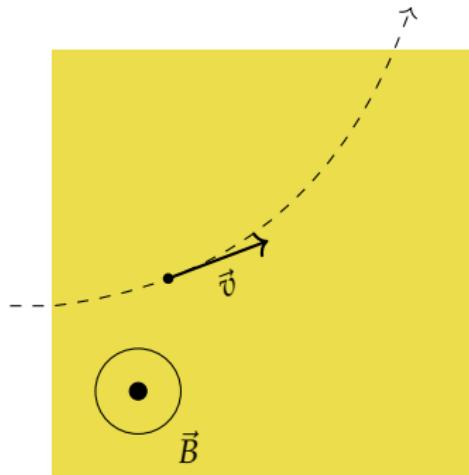
- Ladet partikel afbøjes i magnetfelt

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} = m\vec{a}$$

q: ladning, \vec{v} : hastighed, \vec{a} : acceleration, *m*: masse, \vec{B} : magnet felt, \vec{F} :

kraften på partiklen

- Afbøjes negativt og positivt ladet partikler samme vej?
nej, hver sin vej
- Hvad afhænger bøjningsradiusen af?



Ladet partikel i magnetfelt

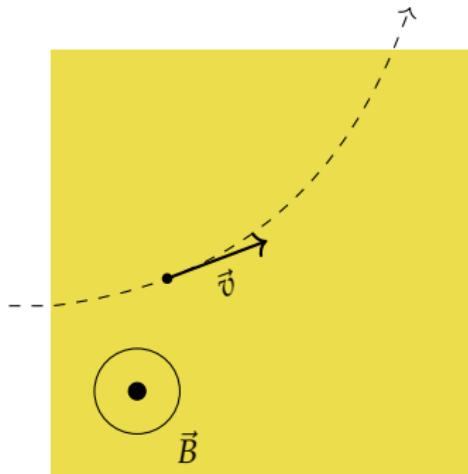
- Ladet partikel afbøjes i magnetfelt

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} = m\vec{a}$$

q: ladning, \vec{v} : hastighed, \vec{a} : acceleration, *m*: masse, \vec{B} : magnet felt, \vec{F} :

kraften på partiklen

- Afbøjes negativt og positivt ladet partikler samme vej?
nej, hver sin vej
- Hvad afhænger bøjningsradiusen af?
Partiklens impuls $\vec{v}m$



Ladet partikel i magnetfelt

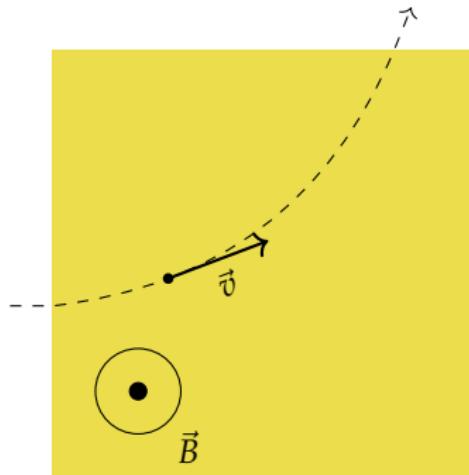
- Ladet partikel afbøjes i magnetfelt

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} = m\vec{a}$$

q : ladning, \vec{v} : hastighed, \vec{a} : acceleration, m : masse, \vec{B} : magnet felt, \vec{F} :

kraften på partiklen

- Afbøjes negativt og positivt ladet partikler samme vej?
nej, hver sin vej
- Hvad afhænger bøjningsradiusen af?
Partiklens impuls $\vec{p}m$



- Mål afbøjning og retning for at bestemme q, \vec{p}
- Mål flyvetid til TOF for at bestemme \vec{v}
- Så kender vi m og derved partikeltype
- **NB** kun ladet partikler



Overblik

- ① ALICE
- ② Måling af ladet partikler
- ③ Almindeligt og „mærkeligt“ stof
- ④ Henfald af „mærkelige“ partikler
- ⑤ Invariant masse
- ⑥ Opgaven



Partikel ZOO'et

Fermioner			Bosoner		
Kvarker	u c t	d s b	γ	Z	
Leptoner	ν_e	ν_μ	ν_τ	W	Kræft-formidler
	e^-	μ^-	τ^-	g	
			h		

- Kerne-stof består af *kvarker*



Stof

- Kvarker: forskellig ladning, masse

Kvark	Masse (MeV)	Ladning
u	2.2 ^{+0.6} _{-0.4}	+2/3
d	4.7 ^{+0.5} _{-0.4}	-1/3
c	1 270 ± 30	+2/3
s	96 ⁺⁸ ₋₄	-1/3
t	173 200 ± 900	+2/3
b	4 180 ⁺⁴⁰ ₋₃₀	-1/3



Stof

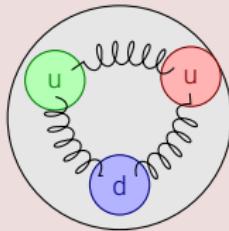
- Kvarker: forskellig ladning, masse
- Almindeligt kernestof: protoner og neutroner

Kvark	Masse (MeV)	Ladning
u	2.2 ± 0.6 -0.4	+2/3
d	4.7 ± 0.5 -0.4	-1/3
c	1 270 ± 30	+2/3
s	96 ± 8 -4	-1/3
t	173 200 ± 900	+2/3
b	4 180 ± 40 -30	-1/3

Proton p

udd: to up og én down kvark

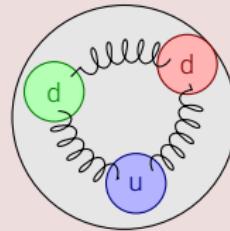
Ladning: $+1 = 2/3 + 2/3 - 1/3$



Neutron n

udd: én up og to down kvarker

Ladning: $0 = 2/3 - 1/3 - 1/3$



Strange stof

- Kollisioner frigør energi



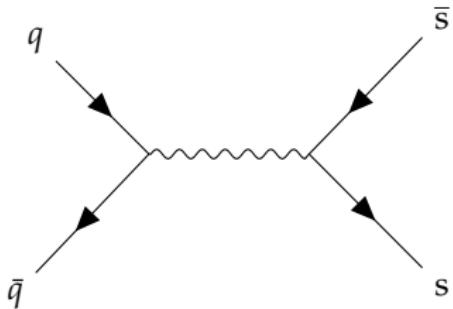
Strange stof

- Kollisioner frigør energi
- Masse og energi det samme
 $(E = mc^2)$



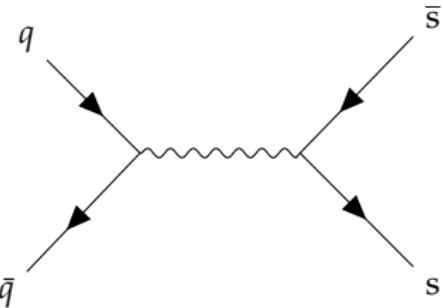
Strange stof

- Kollisioner frigør energi
- Masse og energi det samme
($E = mc^2$)
- Kan lave strange kvarker



Strange stof

- Kollisioner frigør energi
- Masse og energi det samme
($E = mc^2$)
- Kan lave strange kvarker

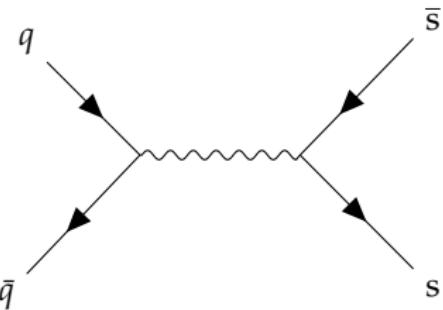


- Strange kvarker bindes i strange hadroner



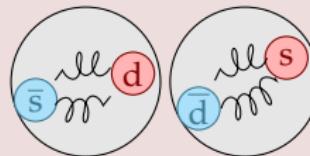
Strange stof

- Kollisioner frigør energi
- Masse og energi det samme ($E = mc^2$)
- Kan lave strange kvarker



K_S^0 Meson

Én down og en anti-strange eller
én strange og en anti-down
 $q = -\frac{1}{3} + \frac{1}{3} = 0$

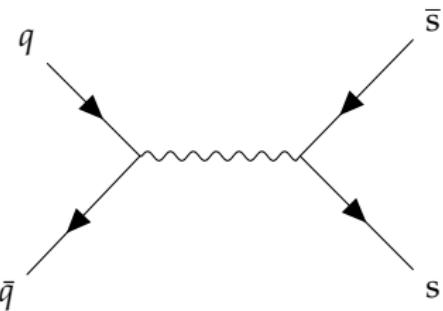


- Strange kvarker bindes i strange hadroner
 - Meson: Kvark og anti-kvark



Strange stof

- Kollisioner frigør energi
- Masse og energi det samme ($E = mc^2$)
- Kan lave strange kvarker

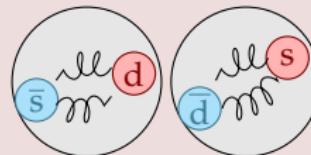


- Strange kvarker bindes i strange hadroner
 - Meson: Kvark og anti-kvark
 - Baryon: 3 kvarker (eller anti-kvarker)

K_S^0 Meson

Én down og en anti-strange eller én strange og en anti-down

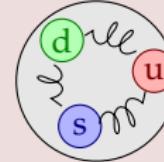
$$q = -\frac{1}{3} + \frac{1}{3} = 0$$



Λ Baryon

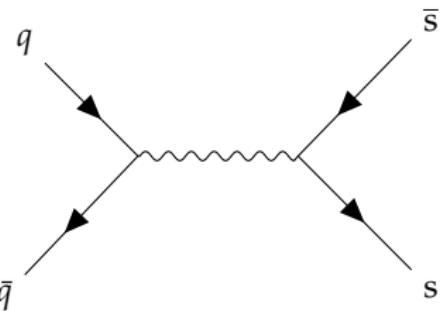
Én up, en down, og en strange

$$q = \frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$



Strange stof

- Kollisioner frigør energi
- Masse og energi det samme ($E = mc^2$)
- Kan lave strange kvarker

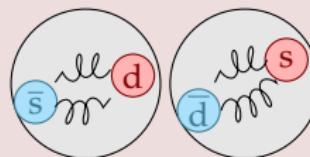


- Strange kvarker bindes i strange hadroner
 - Meson: Kvark og anti-kvark
 - Baryon: 3 kvarker (eller anti-kvarker)
- K_S^0 og Λ ikke elektrisk ladet
Kan ikke ses i eksperimentet

K_S^0 Meson

Én down og en anti-strange eller én strange og en anti-down

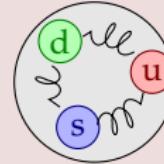
$$q = -\frac{1}{3} + \frac{1}{3} = 0$$



Λ Baryon

Én up, en down, og en strange

$$q = \frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$



Overblik

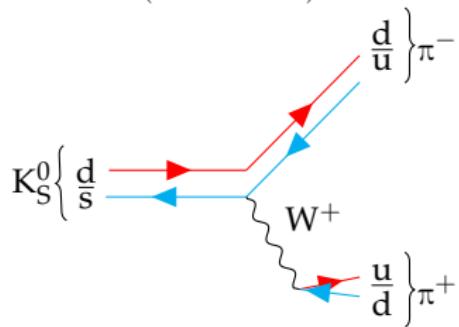
- ① ALICE
- ② Måling af ladet partikler
- ③ Almindeligt og „mærkeligt“ stof
- ④ Henfald af „mærkelige“ partikler
- ⑤ Invariant masse
- ⑥ Opgaven



Henfald af strange partikler

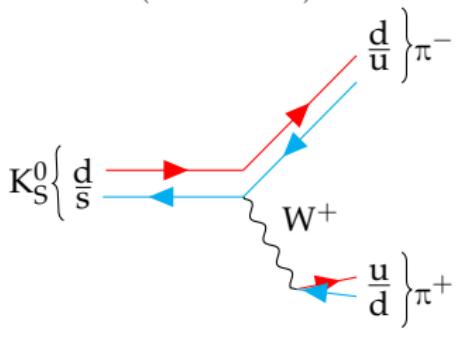
K_S^0 henfalder til π^\pm

via $\bar{s} \rightarrow \bar{u} + (W^+ \rightarrow u + \bar{d})$

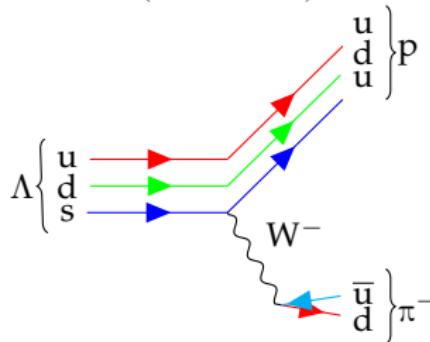


Henfald af strange partikler

K_S^0 henfalder til π^\pm
via $\bar{s} \rightarrow \bar{u} + (W^+ \rightarrow u + \bar{d})$



Λ henfalder til $\pi^- + p$
via $s \rightarrow u + (W^- \rightarrow \bar{u} + d)$



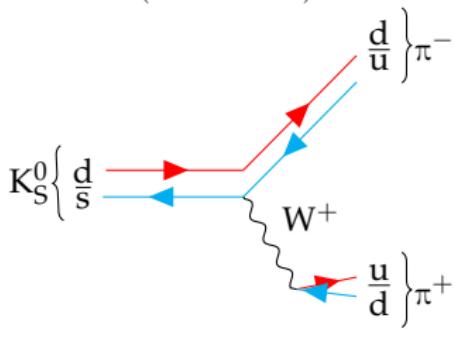
Vend fortegn (elektrisk ladning, farve)
for $\bar{\Lambda}$ henfald.



Henfald af strange partikler

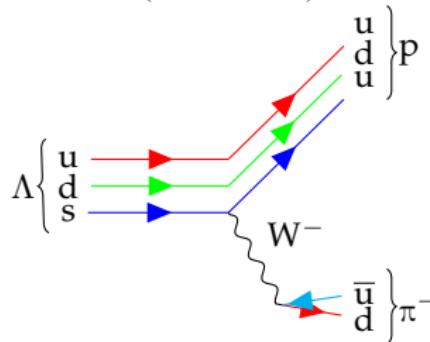
K_S^0 henfalder til π^\pm

via $\bar{s} \rightarrow \bar{u} + (W^+ \rightarrow u + \bar{d})$



Λ henfalder til $\pi^- + p$

via $s \rightarrow u + (W^- \rightarrow \bar{u} + d)$

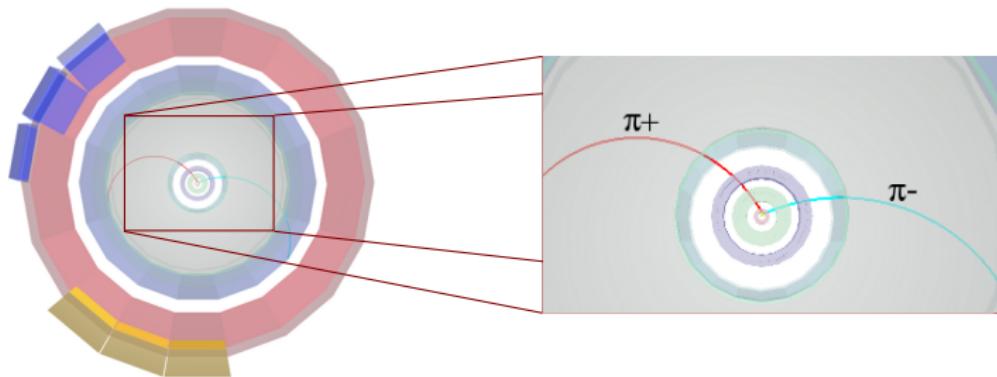


Vend fortegn (elektrisk ladning, farve) for $\bar{\Lambda}$ henfald.

Bemærk: p, \bar{p}, π^\pm elektrisk ladet. Kan ses i eksperimentet



Henfaldstopologier – K_S^0

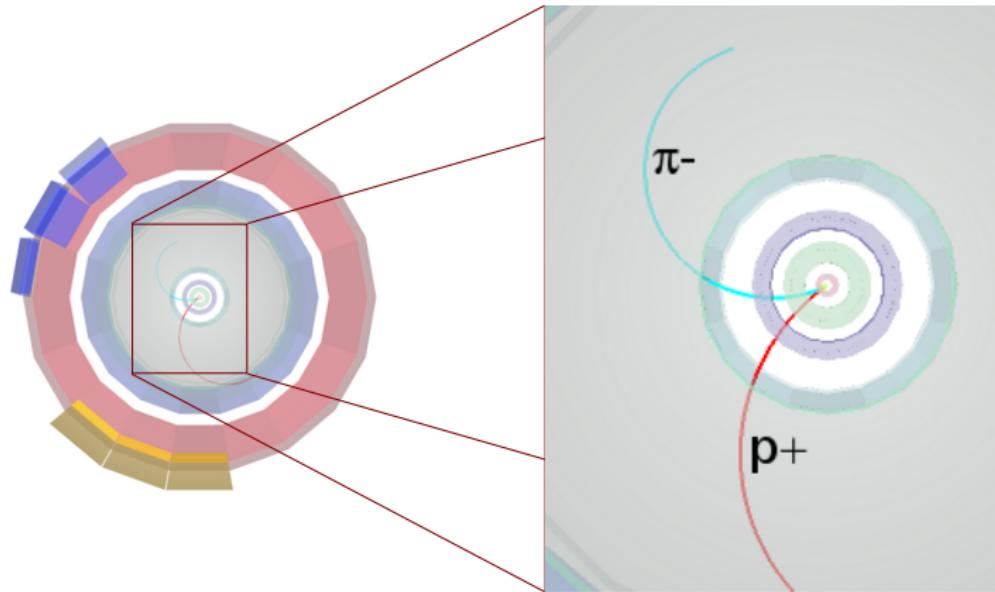


$$K_S^0 \rightarrow \pi^- + \pi^+$$

Bemærk: cirka samme afbøjning pga. ens masser



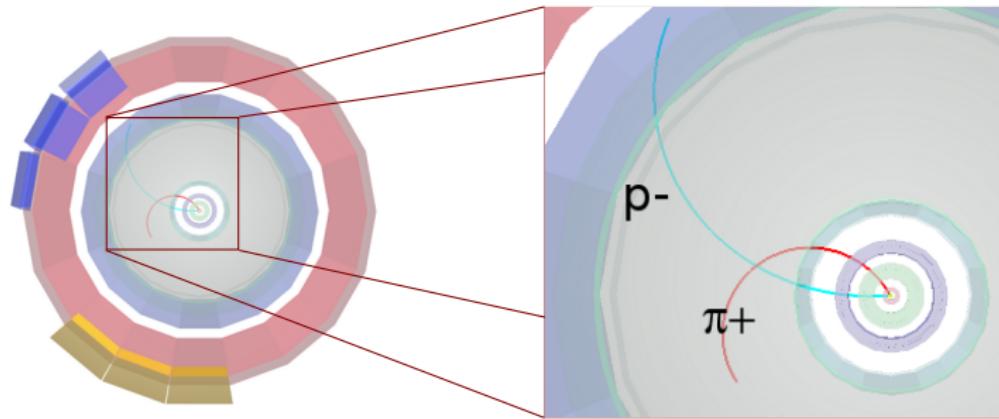
Henfaldstopologier – Λ



$$\Lambda \rightarrow \pi^- + p$$

Bemærk: p spor mindre krumpt da $p_p > p_{\pi^-}$



Henfaldstopologier – $\bar{\Lambda}$ 

$$\bar{\Lambda} \rightarrow \pi^+ + \bar{p}$$

Bemærk: \bar{p} spor mindre krumpt da $p_{\bar{p}} > p_{\pi^+}$



Overblik

- ① ALICE
- ② Måling af ladet partikler
- ③ Almindeligt og „mærkeligt“ stof
- ④ Henfald af „mærkelige“ partikler
- ⑤ Invariant masse
- ⑥ Opgaven

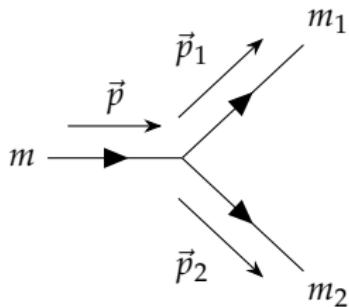


Invariant masse

Henfald af partikel m , $\vec{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$ til

- Hvad er bevaret?

$$m_1, \vec{p}_1 = \begin{bmatrix} p_{x,1} \\ p_{y,1} \\ p_{z,1} \end{bmatrix} \quad m_2, \vec{p}_2 = \begin{bmatrix} p_{x,2} \\ p_{y,2} \\ p_{z,2} \end{bmatrix}$$

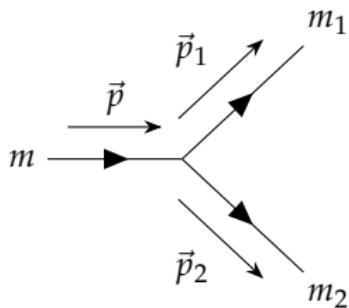


Invariant masse

Henfald af partikel m , $\vec{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$ til

- Hvad er bevaret? E og \vec{p}

$$m_1, \vec{p}_1 = \begin{bmatrix} p_{x,1} \\ p_{y,1} \\ p_{z,1} \end{bmatrix} \quad m_2, \vec{p}_2 = \begin{bmatrix} p_{x,2} \\ p_{y,2} \\ p_{z,2} \end{bmatrix}$$



Invariant masse

Henfald af partikel m , $\vec{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$ til

- Hvad er bevaret? E og \vec{p}
- så

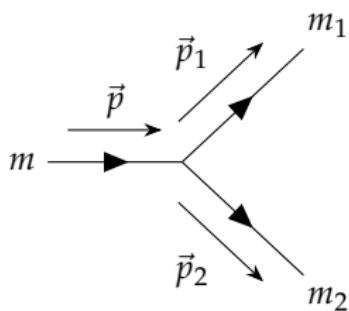
$$m_1, \vec{p}_1 = \begin{bmatrix} p_{x,1} \\ p_{y,1} \\ p_{z,1} \end{bmatrix} \quad m_2, \vec{p}_2 = \begin{bmatrix} p_{x,2} \\ p_{y,2} \\ p_{z,2} \end{bmatrix}$$

$$E = E_1 + E_2$$

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$

og (med $c = 1$)

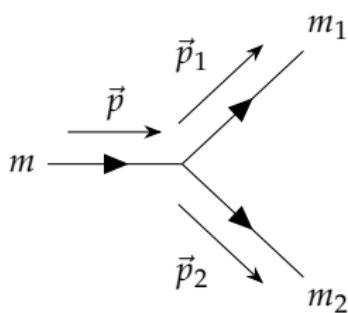
$$E = \sqrt{m^2 + p^2} = \sqrt{m^2 + p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}$$



Invariant masse

Henfald af partikel m , $\vec{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$ til

$$m_1, \vec{p}_1 = \begin{bmatrix} p_{x,1} \\ p_{y,1} \\ p_{z,1} \end{bmatrix} \quad m_2, \vec{p}_2 = \begin{bmatrix} p_{x,2} \\ p_{y,2} \\ p_{z,2} \end{bmatrix}$$



- Hvad er bevaret? E og \vec{p}
- så

$$E = E_1 + E_2$$

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$

og (med $c = 1$)

$$E = \sqrt{m^2 + p^2} = \sqrt{m^2 + p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}$$

- Det følger at

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

hvor E_1, E_2, \vec{p}_1 og \vec{p}_2 er målt



Invariant masse

Henfald af partikel m , $\vec{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$ til

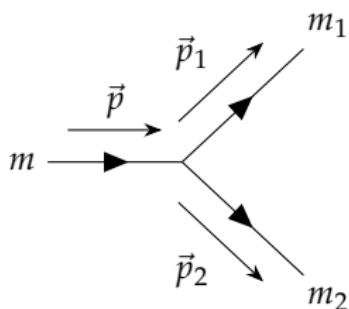
- Hvad er bevaret? E og \vec{p}
- så

$$m_1, \vec{p}_1 = \begin{bmatrix} p_{x,1} \\ p_{y,1} \\ p_{z,1} \end{bmatrix} \quad m_2, \vec{p}_2 = \begin{bmatrix} p_{x,2} \\ p_{y,2} \\ p_{z,2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 \\ \vec{p} &= \vec{p}_1 + \vec{p}_2 \end{aligned}$$

og (med $c = 1$)

$$E = \sqrt{m^2 + p^2} = \sqrt{m^2 + p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}$$



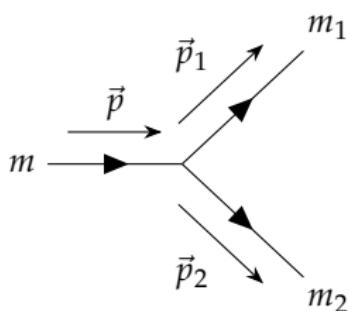
- Det følger at
- $$m^2 = E^2 - p^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$$
- hvor E_1, E_2, \vec{p}_1 og \vec{p}_2 er målt
- m kan bestemmes – invariant masse



Invariant masse

Henfald af partikel m , $\vec{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$ til

$$m_1, \vec{p}_1 = \begin{bmatrix} p_{x,1} \\ p_{y,1} \\ p_{z,1} \end{bmatrix} \quad m_2, \vec{p}_2 = \begin{bmatrix} p_{x,2} \\ p_{y,2} \\ p_{z,2} \end{bmatrix}$$



- Hvad er bevaret? E og \vec{p}
- så

$$E = E_1 + E_2$$

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$

og (med $c = 1$)

$$E = \sqrt{m^2 + p^2} = \sqrt{m^2 + p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}$$

- Det følger at
- $$m^2 = E^2 - p^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$$
- hvor E_1, E_2, \vec{p}_1 og \vec{p}_2 er målt
- m kan bestemmes – invariant masse
 - Check m mod kendte værdier for K_S^0, Λ og $\bar{\Lambda}$



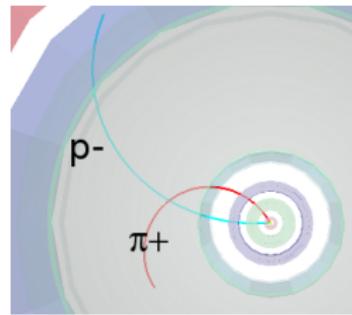
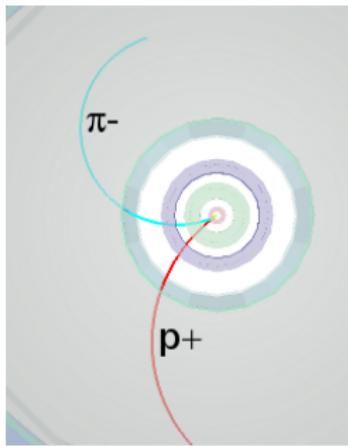
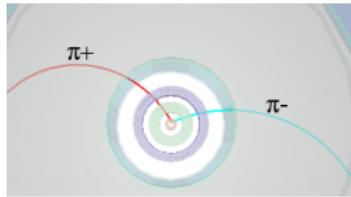
Overblik

- ① ALICE
- ② Måling af ladet partikler
- ③ Almindeligt og „mærkeligt“ stof
- ④ Henfald af „mærkelige“ partikler
- ⑤ Invariant masse
- ⑥ Opgaven



Opgaven

- Undersøg 15 pp kollisioner
- Find alle strange partikler i hver begivenhed
 - Genkend henfaldstopologier **røde spor** positive, **cyan spor** negative
 - Find henfaldsprodukter m_1, \vec{p}_1, m_2 og \vec{p}_2
 - Beregn invariant masse m
 - Bestem strange partikeltype fra tabel
- Bestem invariant masse m fordeling for $K_S^0, \Lambda, \bar{\Lambda}$
- Tilsidst samler vi dem alle sammen



Back-up



Invariant masse

Fra energi- $E = E_1 + E_2$ og impulsbevarelse $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$

$$\begin{aligned}
 m^2 &= E^2 - p^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 \\
 &= E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_1 - \vec{p}_2 \cdot \vec{p}_2 - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 \\
 &= E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2(p_{x,1}p_{x,2} + p_{y,1}p_{y,2} + p_{z,1}p_{z,2}) \\
 &= m_1^2 + p_1^2 + m_2^2 + p_2^2 + 2\sqrt{m_1^2 + p_1^2}\sqrt{m_2^2 + p_2^2} - p_1^2 - p_2^2 \\
 &\quad - 2(p_{x,1}p_{x,2} + p_{y,1}p_{y,2} + p_{z,1}p_{z,2}) \\
 &= m_1^2 + m_2^2 - 2\left(\sqrt{m_1^2 + p_1^2}\sqrt{m_2^2 + p_2^2} + p_{x,1}p_{x,2} + p_{y,1}p_{y,2} + p_{z,1}p_{z,2}\right) \\
 &= m_1^2 + m_2^2 - 2(E_1E_2 + \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2)
 \end{aligned}$$

$$\vec{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad E = \sqrt{m^2 + p^2} \quad \vec{v} \cdot \vec{u} = v_x u_x + v_y u_y + v_z u_z$$

$$p = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2} \quad \text{Bemærk } \vec{v} \cdot \vec{v} = v^2$$



Particles

