

Messgrößen in der Teilchenphysik

Kinematik für (Wieder) Einsteiger



NETZWERK
TEILCHENWELT

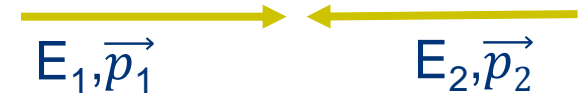
Erzeugung „neuer“ Teilchen

- ▶ Teilchenphysik versucht (bisher unbekannte, meist schwere) Teilchen zu erzeugen
- ▶ Annahme: 2 Teilchen kollidieren, annihilieren und ihre totale Energie $E_{\text{tot}} = E_{\text{kin}} + E_0$ steht zur Verfügung

- ▶ Proton + Antiproton mit je $E_{\text{kin}} = 50\text{GeV}$

- Energie im Schwerpunktsystem

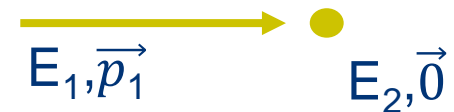
$$E_{cm} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2} = \sim 100\text{GeV}$$



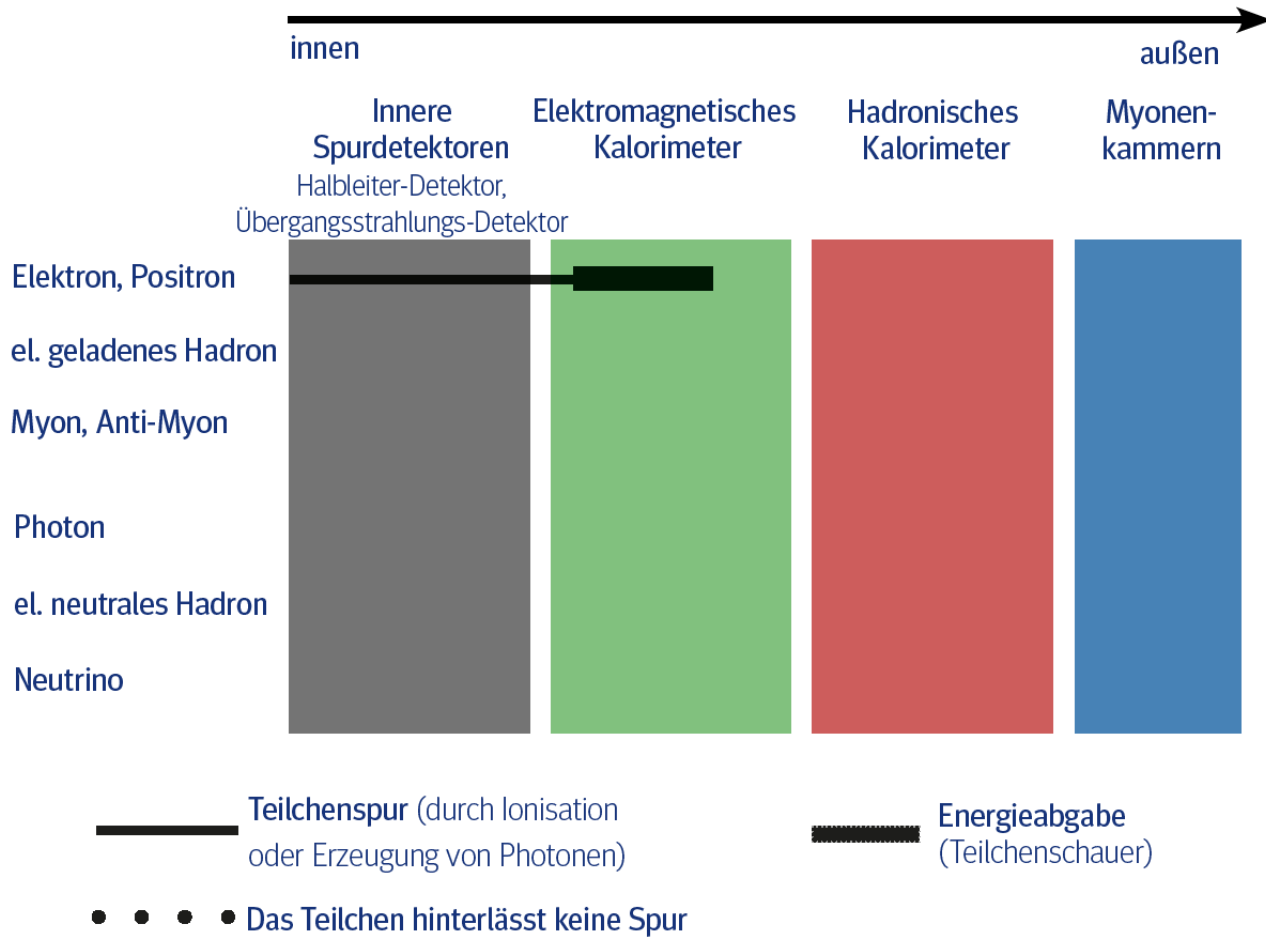
- ▶ Proton mit $E_{\text{kin}} = 50\text{GeV}$ trifft auf ruhendes Antiproton

- Energie im Schwerpunktsystem

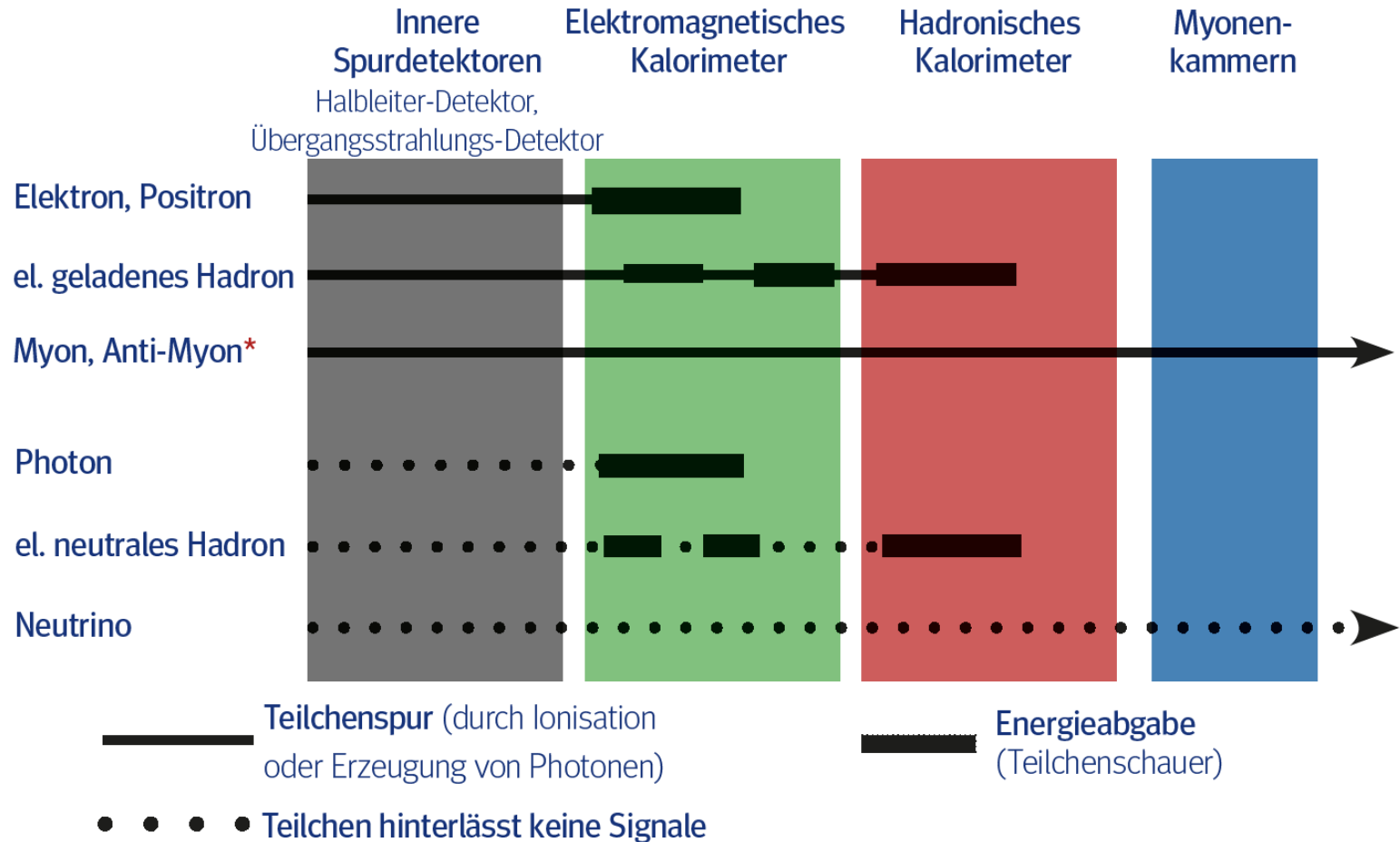
$$E_{cm} = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + 2E_{1lab}m_2} = \sim 7\text{GeV}$$



Reminder: Aufbau eines Detektors



Reminder: Aufbau eines Detektors



Was noch kann man noch Messen

► Impuls:

- Lorenzkraft: $F_L = q\vec{v} \times \vec{B} = v_{\perp} \cdot |\vec{B}|$

Mit v_{\perp} ist Komponente senkrecht zu \vec{B}

- Zentrifugalkraft: $F_Z = m \frac{\vec{v}^2}{r}$

- Annahme: Teilchen fliegt 90° zum Magnetfeld

Zeige: $p = 0,3 qrB$ mit $[p] = \frac{GeV}{c}$, $[B] = T$, $[r] = m$, $[q] = e$

Impuls von Teilchen in Magnetfeld

► Zeige: $p = 0,3 qrB$ mit

$$[p] = \frac{GeV}{c}, [B] = T, [r] = m, [q] = Z \cdot e$$

$$F_L = F_Z$$

$$qvB = m \frac{v^2}{r}$$

$$qrB = mv = p$$

$$qrBc = pc \text{ in } [J]$$

$$qrBc = pc \text{ in } [eV]$$

$$qrB 3 \cdot 10^8 = pc \text{ in } [eV]$$

$$qrBc 0.3 = pc \text{ in } [GeV]$$

$$qrB 0.3 = p \text{ in } [GeV/c]$$

$$1 J = C \cdot V = \frac{1}{1.6 \cdot 10^{19}} eV$$

$$[e] = 1.6 \cdot 10^{-19} C$$

Impuls von Teilchen in Magnetfeld

► Aufgabe:

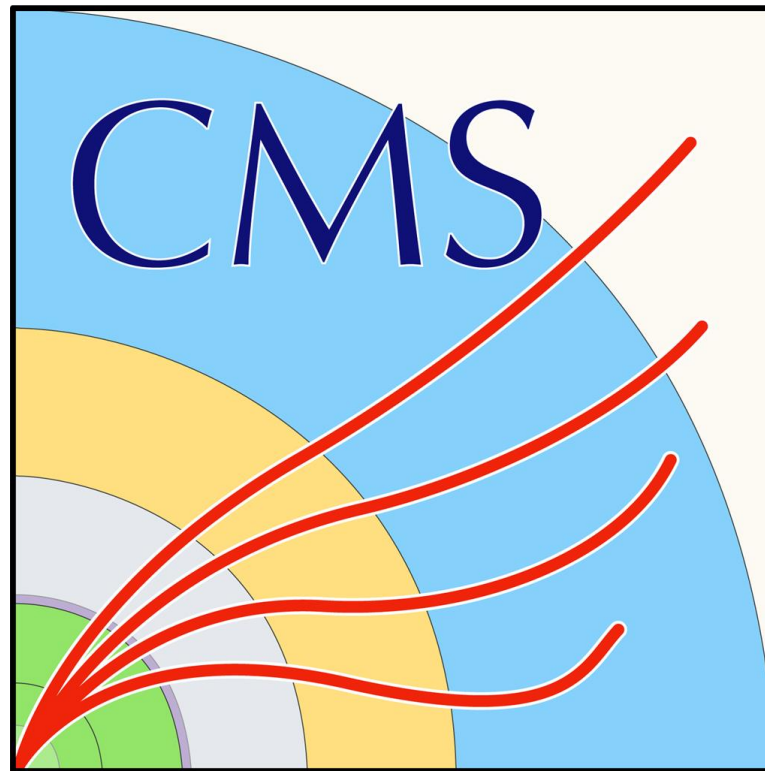
Ein Myon fliegt durch CMS

- Magnetfeld CMS Myon Arm: 2T
- Radius gemessene transversale (90°) zum Magnetfeld: 15m

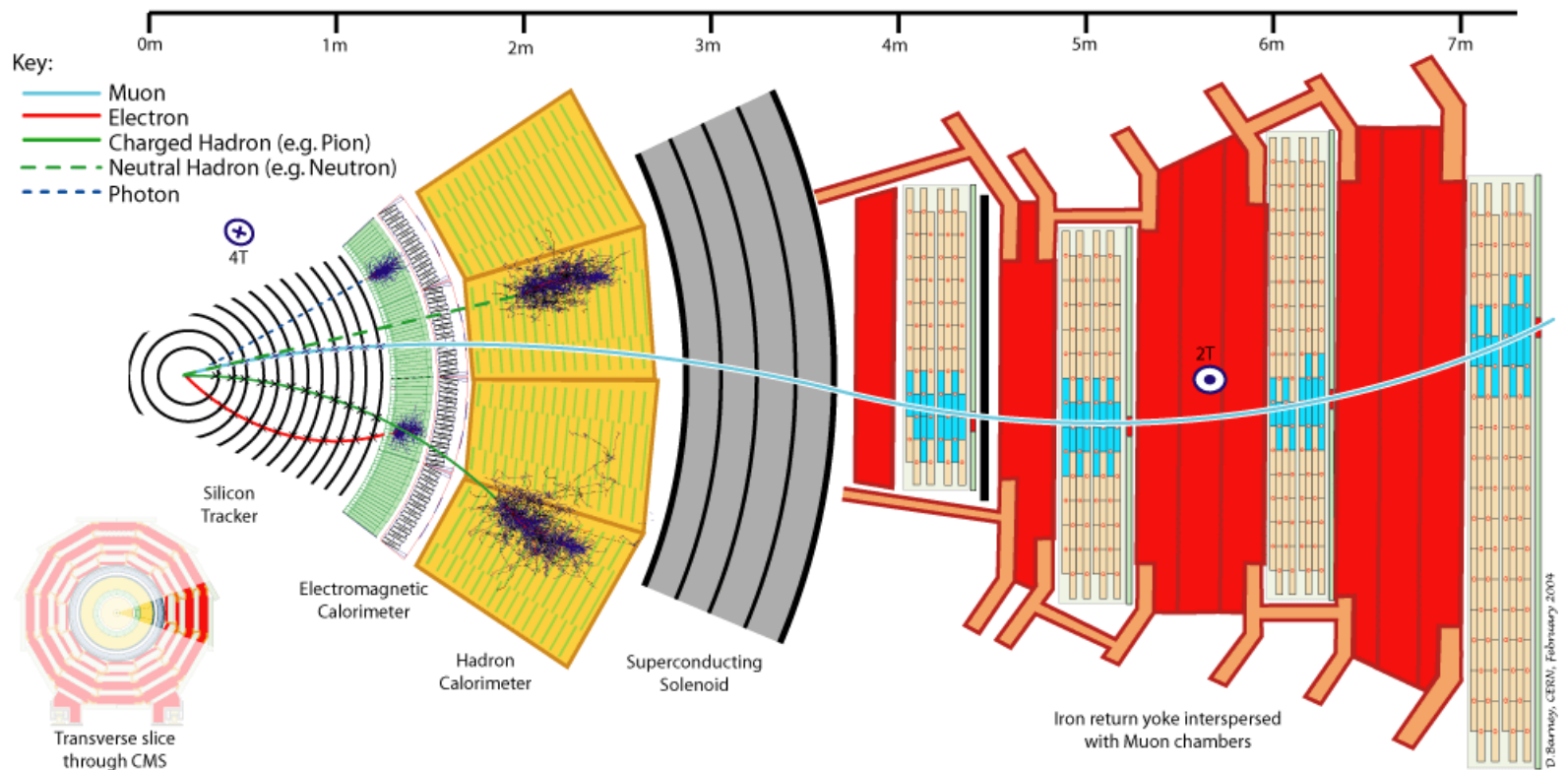
► Was ist das transversale Momentum p_{\perp} ?

$$15 \cdot 2 \cdot 0.3 = 9 \text{ GeV}/c$$

CMS



CMS



Aber...

► Impuls:

- Teilchen relativistisch: $\vec{p} = \gamma m \vec{v}$ mit $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$

$$E = \gamma m c^2$$

- Impuls $\vec{p} = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}$

Energie – Impuls Beziehung

- ▶ Die relativistische Energie und der Dreierimpuls bilden einen Vierervektor:

$$p^\mu = \begin{pmatrix} E/c \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma mc \\ \gamma m \vec{v} \end{pmatrix} \text{ bzw. } p_\mu = \begin{pmatrix} E/c \\ -p_x \\ -p_y \\ -p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma mc \\ -\gamma m \vec{v} \end{pmatrix}$$

- ▶ Das Skalarprodukt muss invariant unter Lorentztransformationen:

$$\begin{aligned} p^\mu p_\mu &= \frac{E^2}{c^2} - \vec{p}^2 \\ &= \frac{\gamma^2 m^2 c^4}{c^2} - \gamma^2 m^2 \vec{v}^2 \\ &= \gamma^2 m^2 c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \\ &= m^2 c^2 \end{aligned} \quad \rightarrow \quad E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}$$

Und der Rest?

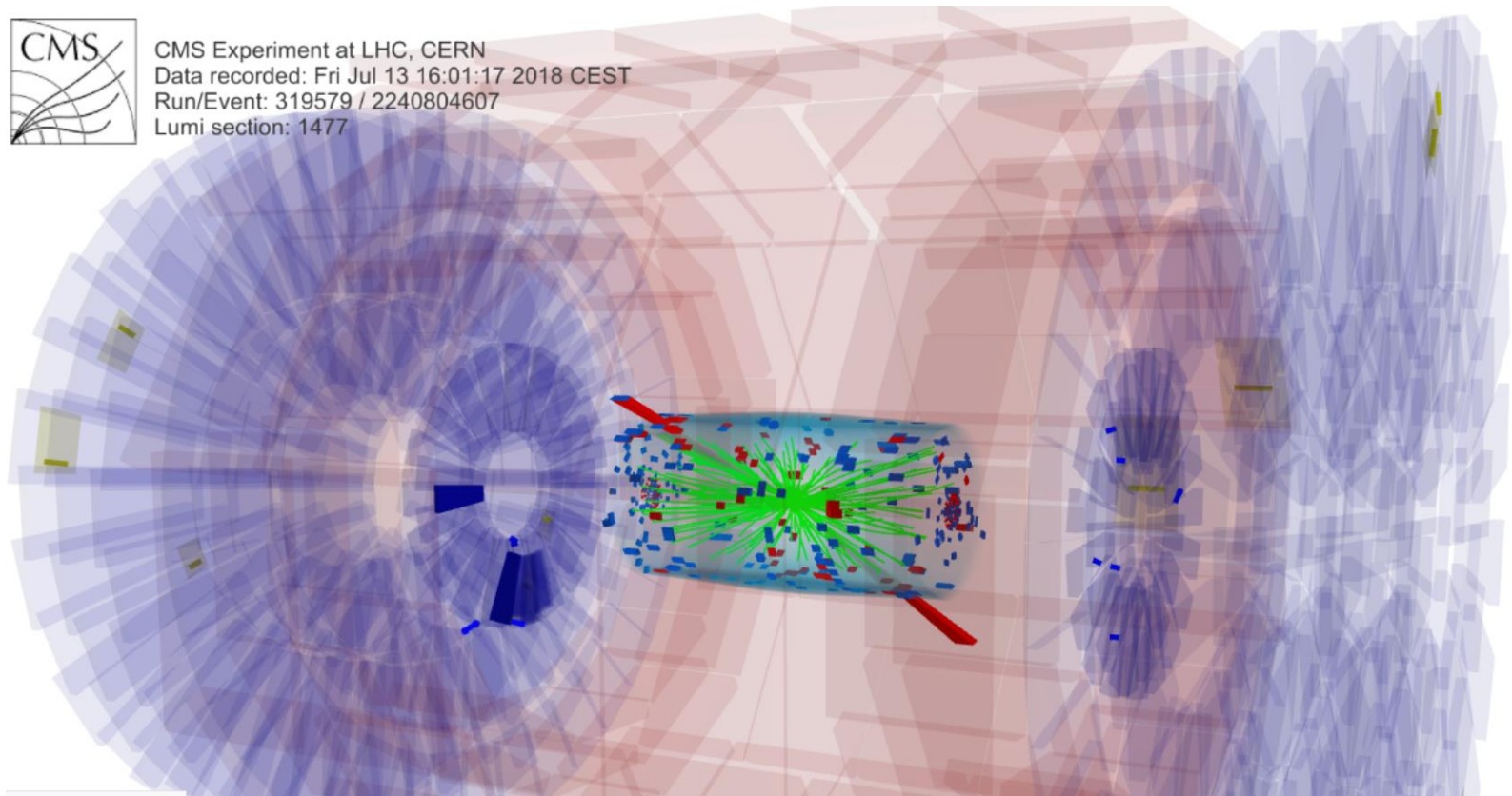
- ▶ Alle Teilchen die sich zu schnell umwandeln werden über ihre Zerfallsprodukte nachgewiesen
- ▶ Das Skalarprodukt muss invariant unter Lorenztransformationen
- ▶ Energie und Impuls müssen erhalten sein
 - Beispiel: Ein Z-Teilchen wandelt sich in ein Myon und ein Antimyon um
- ▶ Invariante Masse

$$M_{inv} = \sqrt{(E_Z)^2 - (\vec{p}_Z)^2} = \sqrt{(E_{\mu^1} + E_{\mu^2})^2 - (\vec{p}_{\mu^1} + \vec{p}_{\mu^2})^2}$$

Übrigens...



CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Fri Jul 13 16:01:17 2018 CEST
Run/Event: 319579 / 2240804607
Lumi section: 1477



Lasst uns loslegen...

The screenshot shows the CERN OpenData website interface. At the top left is the 'opendata CERN' logo. At the top right is an 'About' dropdown menu. The main content area features a large heading: 'Explore more than 1 petabyte of open data from particle physics!'. Below this is a search bar with the placeholder text 'Start typing...' and a blue 'Search' button. Under the search bar, there are search examples: 'collision datasets', 'keywords:education', and 'energy:7TeV'. To the left of the search bar is an 'Explore' section with links for 'datasets', 'software', 'environments', and 'documentation'. To the right is a 'Focus on' section with links for 'ATLAS', 'ALICE', 'CMS', 'LHCb', and 'OPERA'. The background of the interface features a stylized particle detector diagram with concentric circles and colored dots.

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = p_x p_x + p_y p_y + p_z p_z$$

Skalarprodukt!

Invariante Masse

$$\blacktriangleright M_{inv} = \sqrt{(E_{\mu^1} + E_{\mu^2})^2 - (\vec{p}_{\mu^1} + \vec{p}_{\mu^2})^2}$$

E1	px1	py1	pz1	Q1	E2	px2	py2	pz2	Q2	Minv
28,40	-23,63	-11,58	-10,70	-1	194,51	-111,80	7,92	158,98	1	
47,09	1,83	39,94	-24,88	-1	35,62	13,65	-17,43	27,90	1	

► Aufgabe 1: Berechne die Invariante Masse des Ersten Events auf deinem Blatt und trage es in die Minv spalte ein

► Alle Einheiten sind in GeV/c² bzw GeV/c

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = p_x p_x + p_y p_y + p_z p_z$$

Skalarprodukt!

Invariante Masse

$$\triangleright M_{inv} = \sqrt{(E_{\mu^1} + E_{\mu^2})^2 - (\vec{p}_{\mu^1} + \vec{p}_{\mu^2})^2}$$

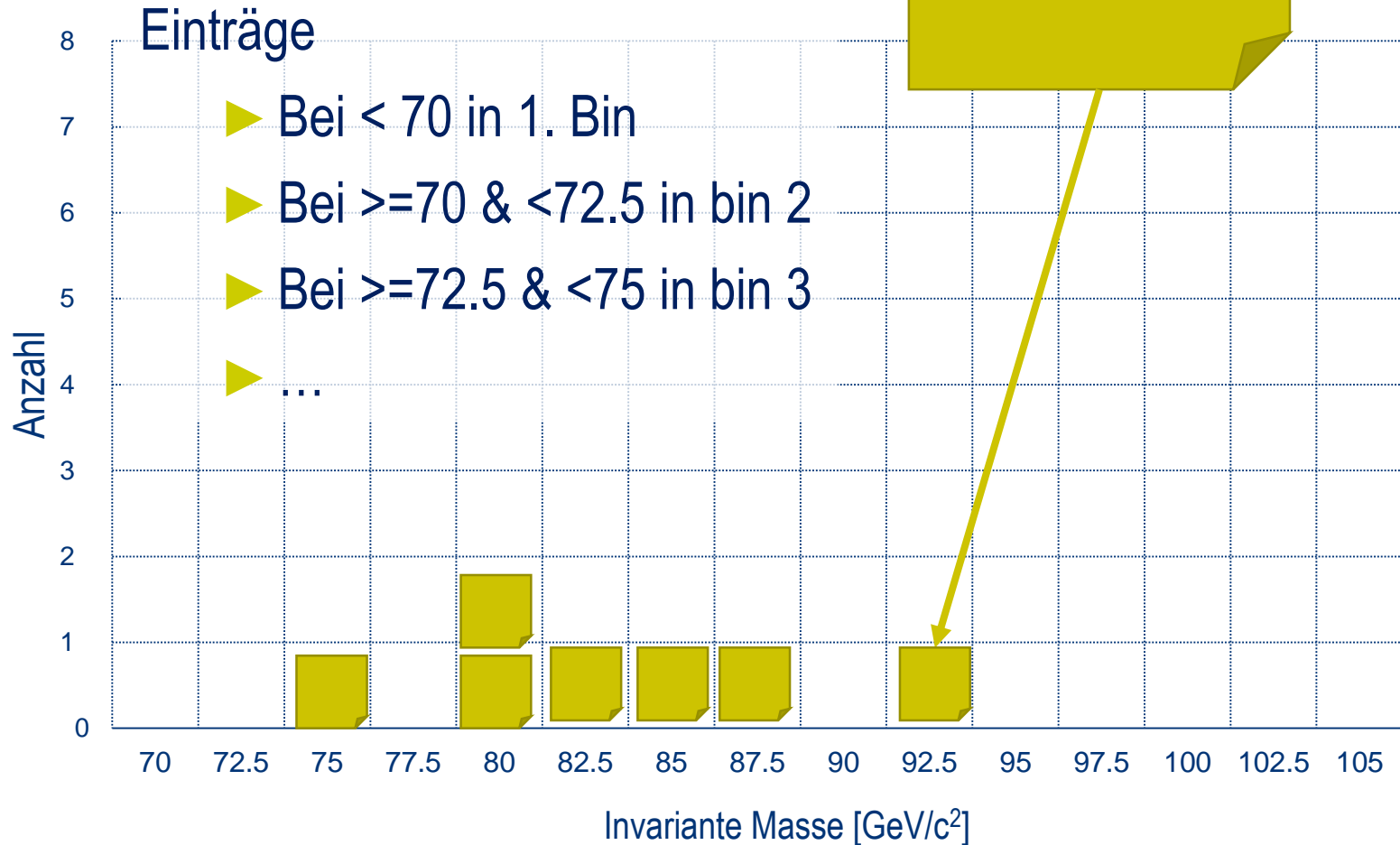
- ▶ Aufgabe 2: Berechne die Invariante Masse des aller Events auf deinem Blatt und trage es in die Minv Spalte ein
- ▶ Aufgabe 3: Trage die errechnete invariante Masse & die zugehörige fehlende transversale Energie (MET) auf einen Klebezettel ein

Run	Event	MET
146944	107557845	54,83
146944	108469900	47,23

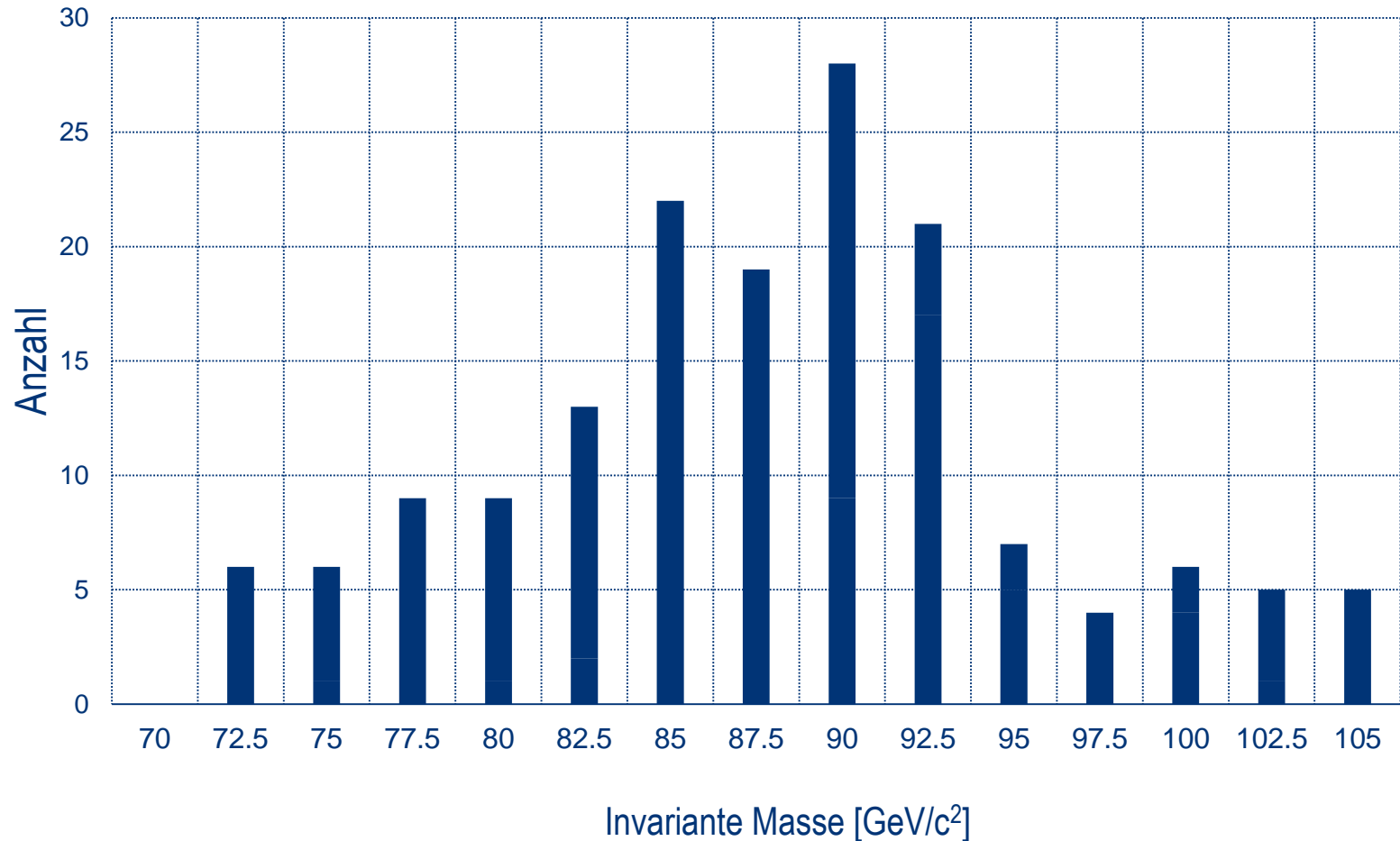
$$M_{inv} = 91,2 \text{ GeV}/c^2$$

$$\text{MET} = 8,61 \text{ GeV}/c^2$$

Aufkleben

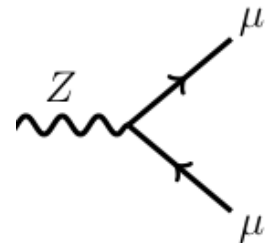


Invariante Masse

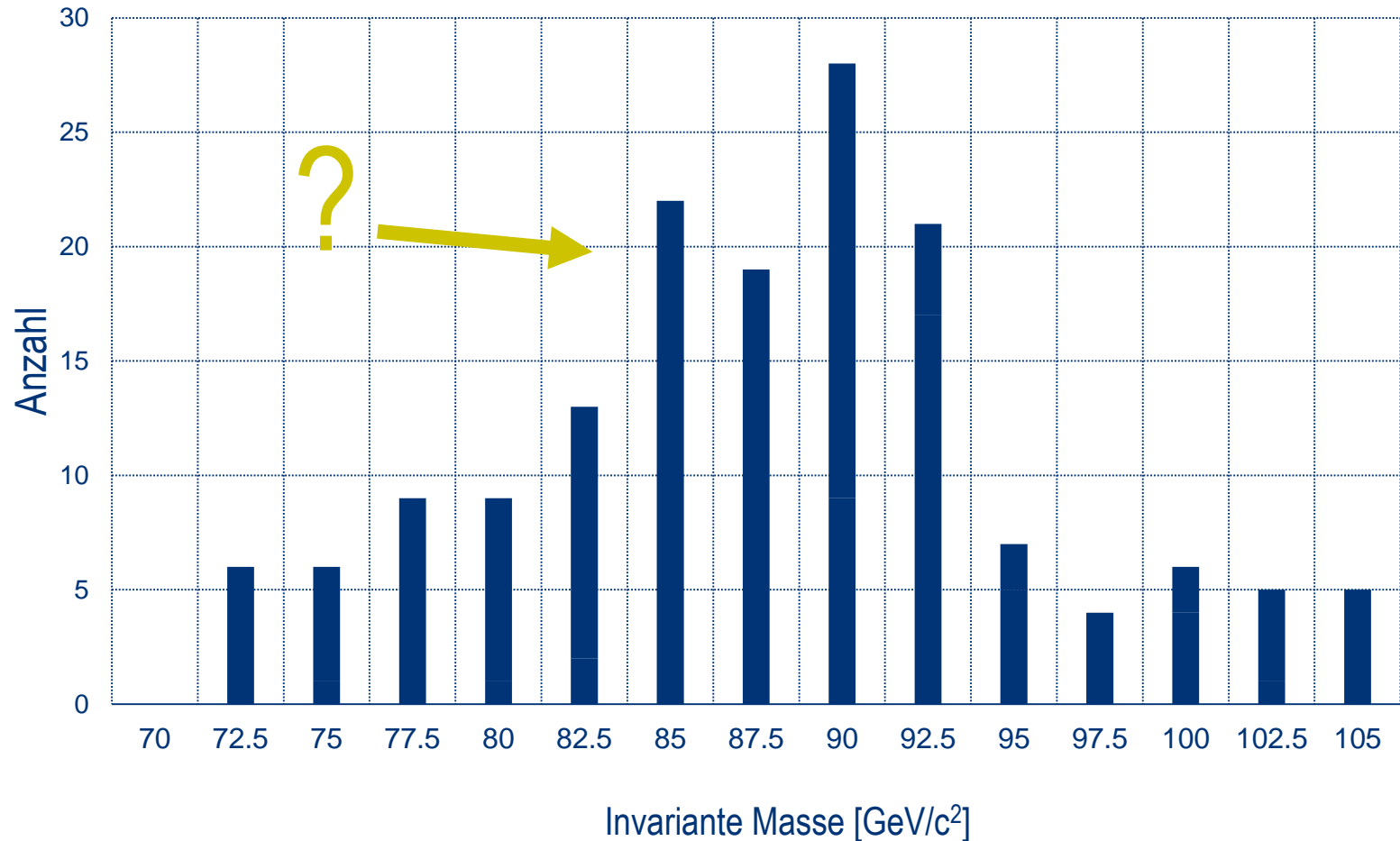


Was ist das jetzt?

- ▶ Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung
- ▶ Z- Teilchen
- ▶ Eigenschaften:
 - Masse $91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}/c^2$
 - Breite = $1/\text{Lebensdauer} = 2.4952 \pm 0.0023 \text{ GeV}/c^2$



Invariante Masse



Was ist das jetzt?

▶ Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung

▶ Z- Teilchen

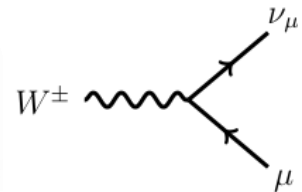
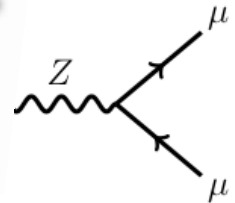
▶ Eigenschaften:

- Masse $91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}/c^2$
- Breite = $1/\text{Lebensdauer} = 2.4952 \pm 0.0023 \text{ GeV}/c^2$
- Umwandlung in $\mu^+ \mu^-$ Paar

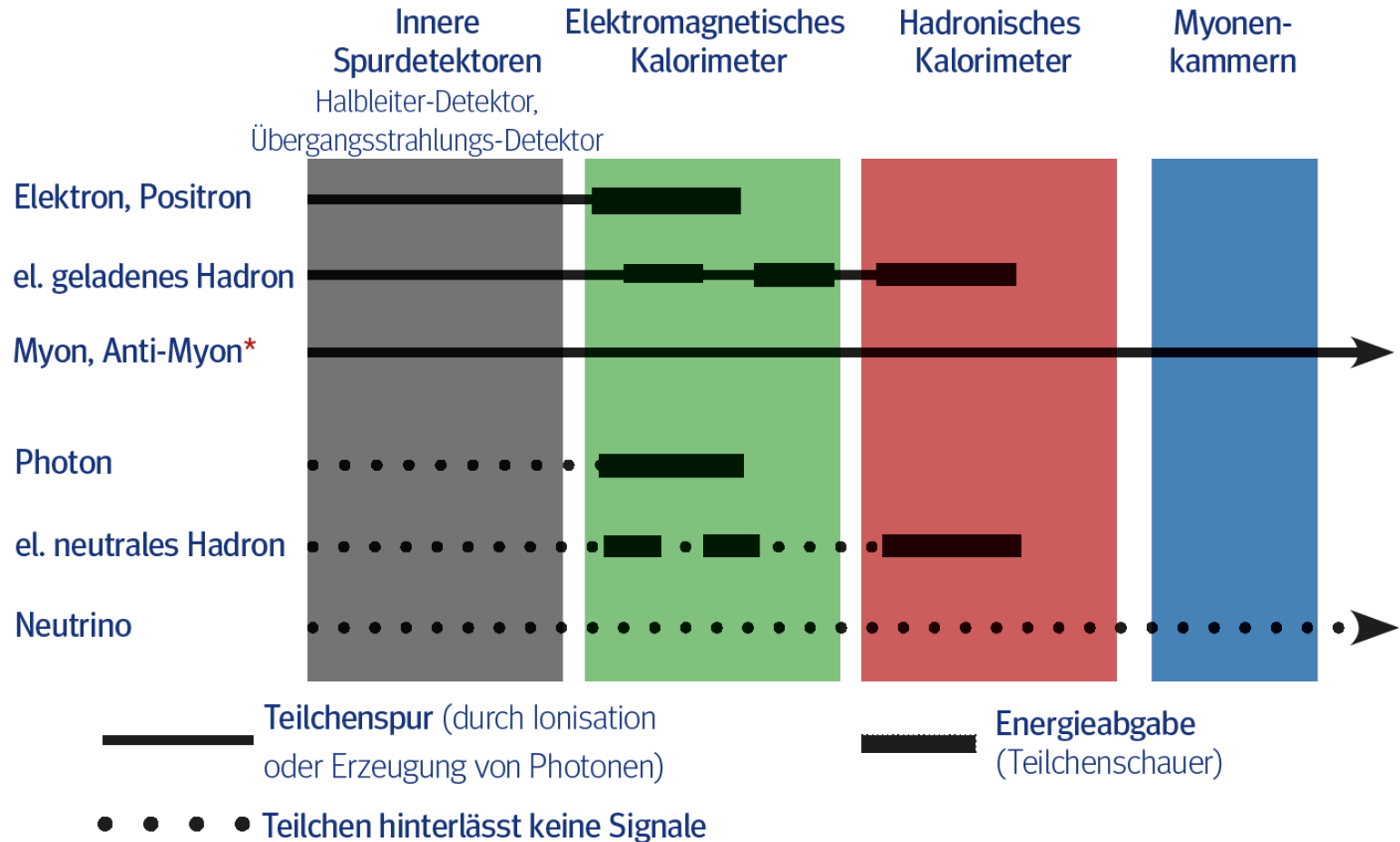
▶ W- Teilchen

▶ Eigenschaften:

- Masse $80.385 \pm 0.015 \text{ GeV}/c^2$
- Breite = $1/\text{Lebensdauer} = 2.085 \pm 0.042 \text{ GeV}/c^2$
- Umwandlung in $\mu \nu$ Paar



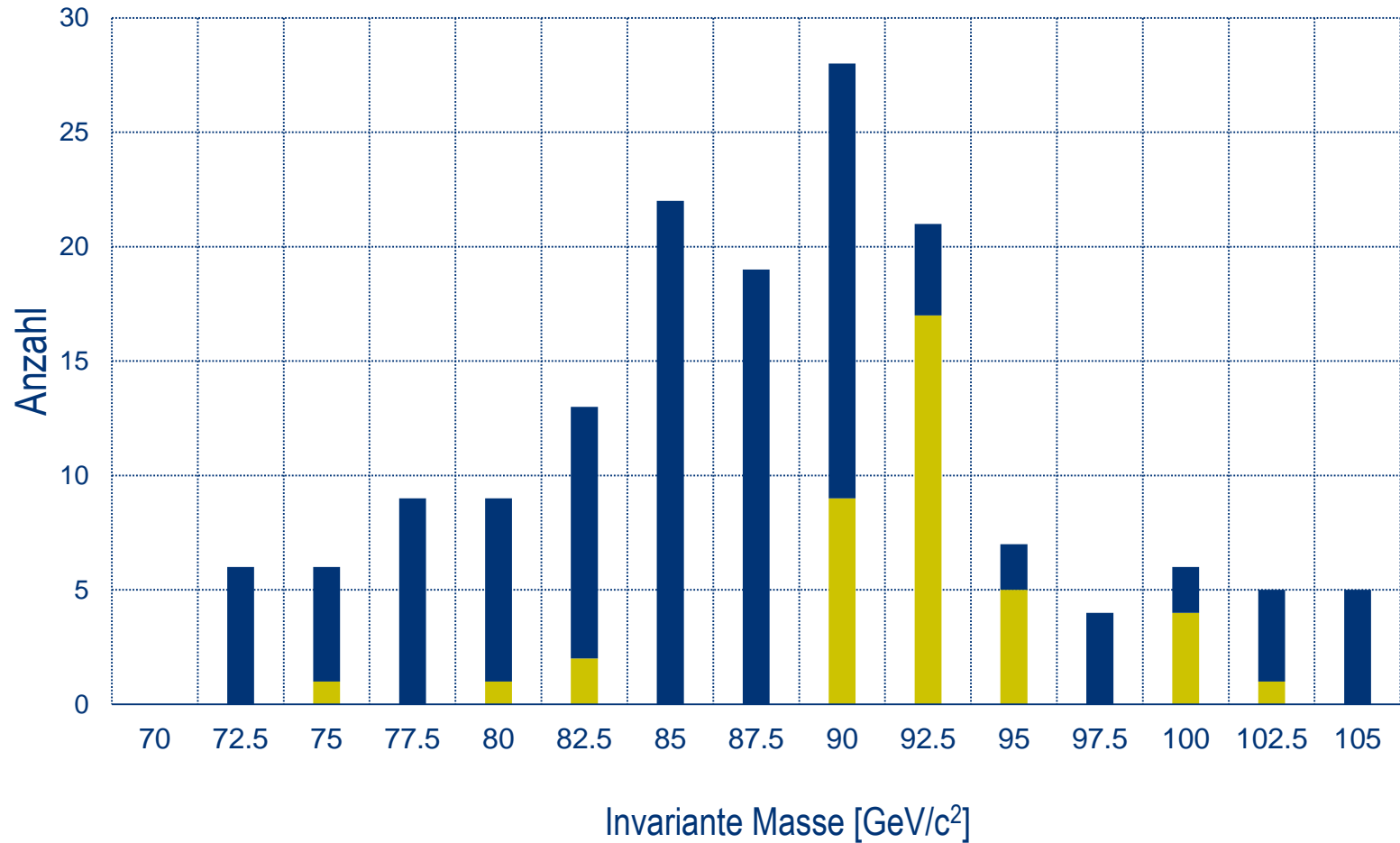
Neutrino Detektion



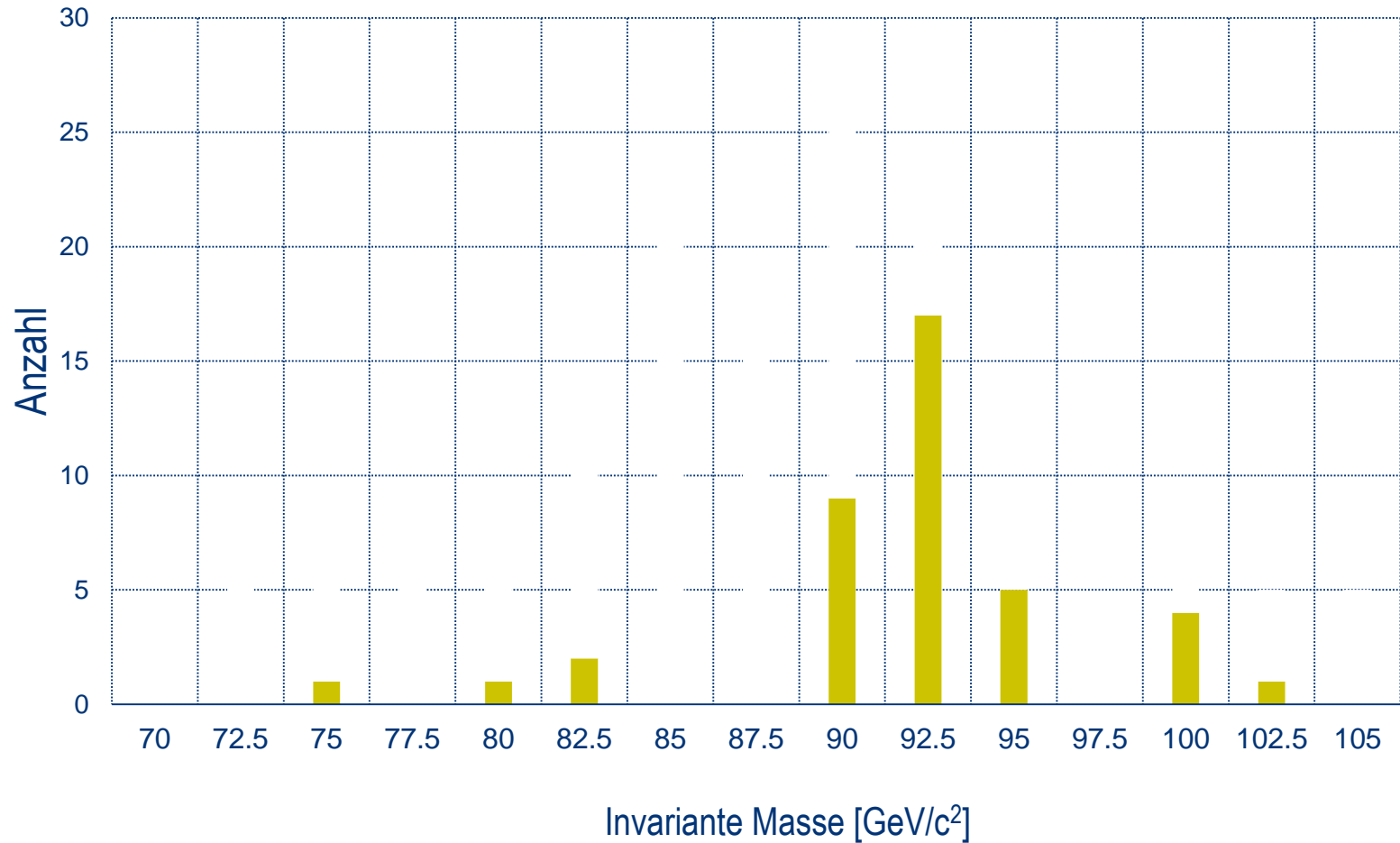
Neutrino Detektion

- ▶ Fehlende Energie im Event (in transversaler Richtung):
Missing Transversal Energie (MET)
- ▶ „Schnitt“ auf Events mit $\text{MET} > 20 \text{ GeV}/c^2$
- ▶ Alle Zettel mit $\text{MET} > 20 \text{ GeV}/c^2$ wieder runter ;-)

Signal & Hintergrund



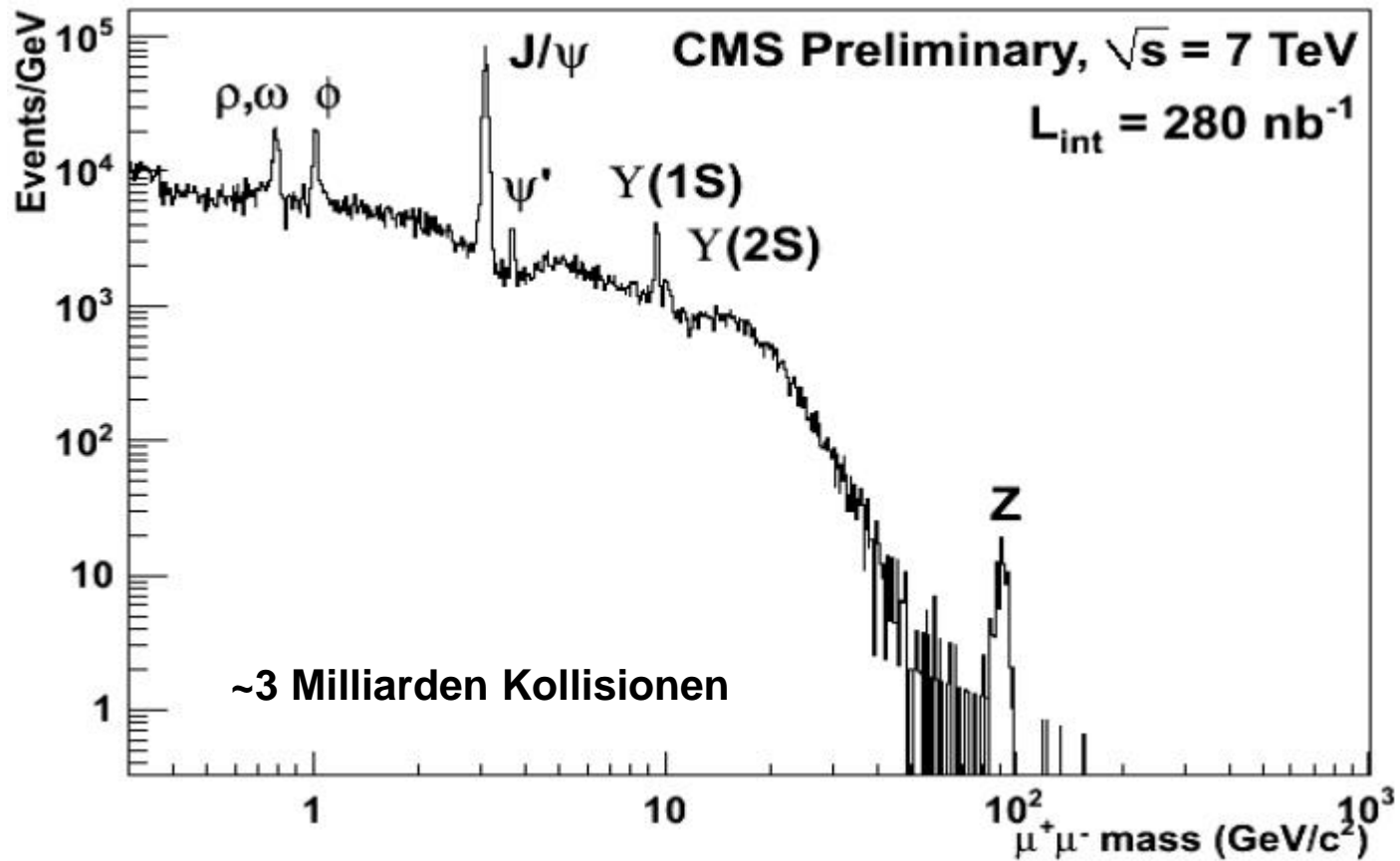
Signal



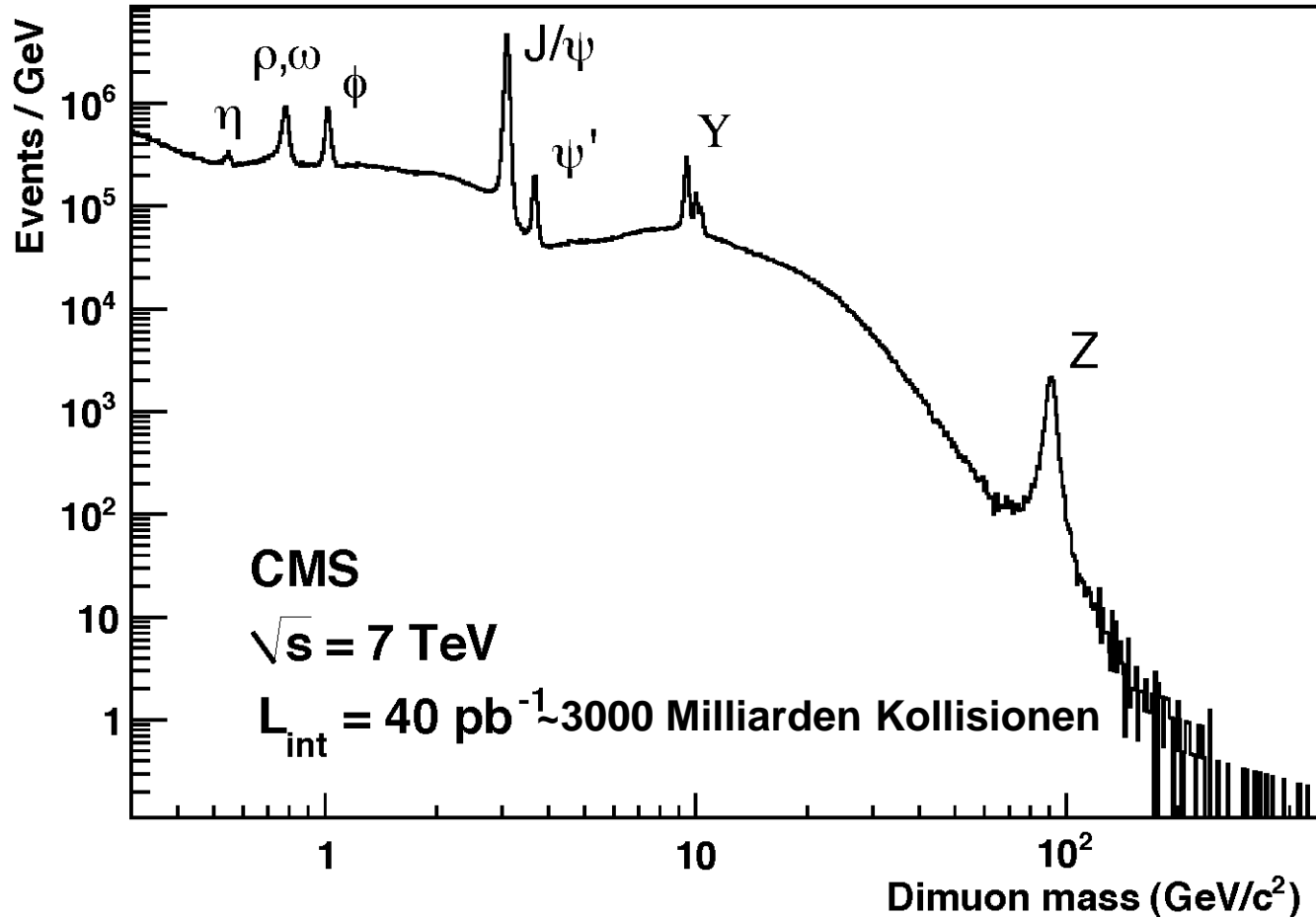
Wuhu !?

- ▶ Wie viel Signal ist wirklich echt?
- ▶ Wie korrigiere ich auf meinen Schnitt?
- ▶ Ist meine μ Messung genau?
- ▶ Gibt es andere Hintergrund Umwandlungen
- ▶ Wie gut ist meine Auflösung für MET?
- ▶

Invariante Masse



Invariante Masse





PROJEKTLEITUNG



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



FÖRDERER

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG



NETZWERK
TEILCHENWELT

Run	Event	MET	E1	px1	py1	pz1	Q1	E2	px2	py2	pz2	Q2	Minv
146944	107557845	54,83	28,40	-23,63	-11,58	-10,70	-1	194,51	-111,80	7,92	158,98	1	
146944	108469900	47,23	47,09	1,83	39,94	-24,88	-1	35,62	13,65	-17,43	27,90	1	
146944	110239978	31,03	35,26	12,01	33,00	-3,13	-1	77,57	10,40	-29,48	70,99	1	
146944	110425594	36,72	70,27	-2,09	25,66	65,38	-1	53,99	41,09	25,67	-23,82	1	
146944	111293264	23,70	53,17	-35,66	22,68	-32,26	-1	53,90	41,02	25,63	-23,78	1	
146944	112365884	41,60	34,95	32,02	-13,79	2,46	-1	92,99	-26,53	-2,30	-89,09	1	
146944	112800006	47,87	90,51	-35,67	-1,75	83,16	1	30,89	30,77	2,64	-0,51	-1	
146944	112800006	47,87	90,51	-35,67	-1,75	83,16	-1	52,49	40,90	-20,55	25,70	1	
148031	792020	11,86	55,76	46,87	-1,51	30,16	-1	39,58	-26,55	-7,30	-28,43	1	
148029	28424284	11,21	34,41	-5,28	-29,94	-16,11	1	95,85	-36,00	31,93	-82,89	-1	
148031	792020	11,86	39,58	-26,55	-7,30	-28,43	1	55,85	46,94	-1,51	30,22	-1	
148031	792020	11,86	55,76	46,87	-1,51	30,16	-1	39,73	-26,65	-7,32	-28,54	1	
148031	38598637	10,94	104,32	-28,58	-3,36	100,27	1	35,66	32,47	4,78	13,95	-1	
148031	20180192	9,71	82,48	-4,55	-38,89	72,59	-1	34,86	6,62	34,01	3,90	1	
148031	792020	11,86	55,85	46,94	-1,51	30,22	-1	39,73	-26,65	-7,32	-28,54	1	

Quelle: <http://opendata.cern.ch/>