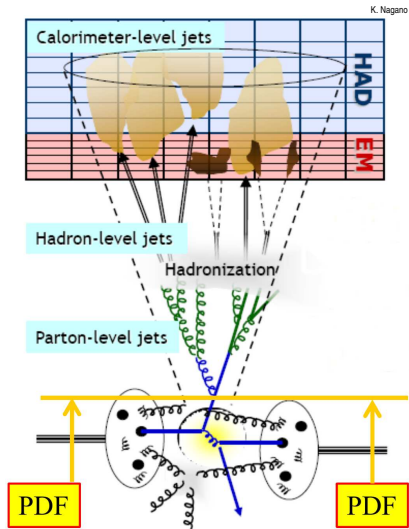


Konzepte für Experimente an zukünftigen Hadroncollidern II

PD Dr. Oliver Kortner

02.07.2021

Jetrekonstruktion



Quarks und Gluonen, die ursprünglich erzeugt werden, nicht direkt sichtbar, sondern die Bündel an Hadronen, die aus den ursprünglichen Quarks und Gluonen entstanden sind, die sogenannten **Jets**.

Jetrekonstruktion auf verschiedenen Ebenen

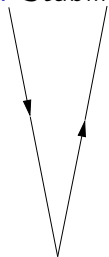
- Theorie (auf Generatorebene): **Partonenjets**.
- Simulation: Jets aus den erzeugten Hadronen, sogenannte **Teilchenjets**.
- Detektor, Experiment: Jets aus den Signalen, die von den Hadronen erzeugt werden; z.B. Energiedepositionen in den Kalorimetern oder die gemessenen Teilchenspuren.

Ziel: Zuordnung der Detektorjets zu Partonenjets. Zuordnung der Partonenjets zu den ursprünglichen

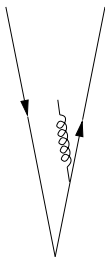
Wiederholung des Stoffs des letzten Vorlesung

Anforderungen an die Jetrekonstruktion

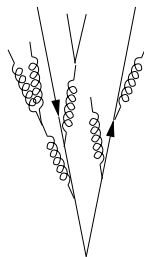
Ziel: Stabilität.



Partonen in führender
Ordnung Störungstheorie (LO)



Partonen in NLO

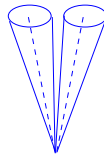
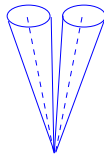
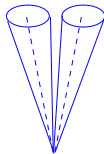
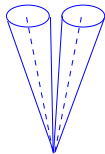


Partonenschauer



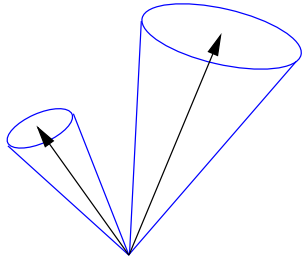
Hadronen

Jets

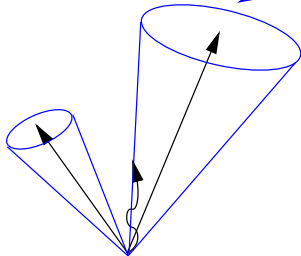


Die Definition eines Jets ist grundsätzlich mehrdeutig und hängt vom Jetalgorithmus ab. Wichtig ist, dass sich die Jetdefinition unter gewissen

Infrarotstabilität

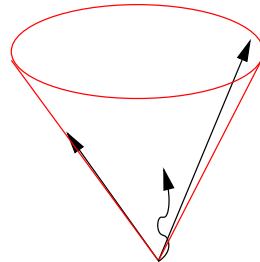


Infrarotstabilität



Konfiguration mit
einem abgestrahlten
niederenergetischen
Teilchen

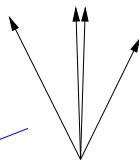
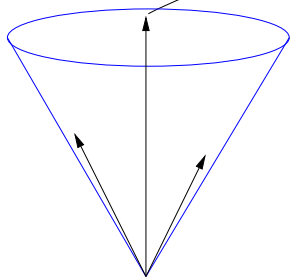
Infrarotinstabilität



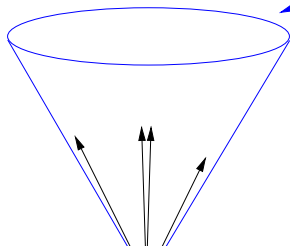
Wiederholung des Stoffs des letzten Vorlesung

Kollinearitätsstabilität

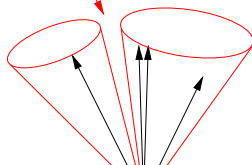
Ersetzen eines Teilchens durch
zwei kollineare Teilchen



Kollinearitätsstabilität



Kollinearitätsinstabilität



Richtlinien für Jetalgorithmen

Ziel: Unempfindlichkeit auf Detektoreigenschaften.

Konkret

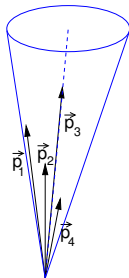
- Unabhängigkeit der Jetrekonstruktionseffizienz von der Detektortechnologie.
- Möglichst kleiner Einfluss der Orts- und Energieauflösung des Detektors auf die Jetkinematik.
- Geringe Empfindlichkeit auf Detektorrauschen, insbesondere die Energieskala eine Jets. Die Jetenergie soll sich nicht verschieben, wenn sich das Rauschniveau des Detektors ändert.
- Geringe Empfindlichkeit auf die Anzahl der inelastischen Kollisionen in einem Ereignis.
- Geringe Empfindlichkeit auf Beiträge vom Protonenrest in einer harten Partonenkollision. Man spricht auch oft vom Beitrag des zugrunde liegenden Ereignisses.

Weitere wichtige Eigenschaften: Leichte Eichung der Jetenergiemessung; hohe Jetrekonstruktionseffizienz; Fähigkeit, benachbarte Jets zu trennen.

Kategorien von Jetrekonstruktionsalgorithmen

Kegelalgorithmen

Suche nach Kegeln um einen Startpunkt, in dem sich die zu sammelnden Objekte befinden, z.B.



Ursprünglich weit verbreitet, da experimentell einfach umzusetzen.
Schwierig, Infrarot- und Kollinearitätsstabilität zu erreichen.

Clusterbildung durch sukzessive Rekombination

Idee, die Fragmentierung und Hadronisierung rückgängig zu machen.
Verwendung sogenannter Protojets, die durch sukzessive Paarung zu einem Jet kombiniert werden.

Rekursive Jetrekonstruktion

- Definition eines Maßes d_{ab} für den Abstand zweier „Teilchen“ a und b .
- Kombinationsalgorithmus
 - Berechnung von d_{ab} für alle Teilchenpaare zur Bestimmung des minimalen Abstands d_{min} .
 - Wenn d_{min} unter einem gewählten Schwellenwert d_S fällt, Kombination von a und b zu einem Teilchen.
 - Wenn $d_{min} > d_S$ ist, ist a ein Jet und wird aus der Liste der zu paarenden Teilchen entfernt.
 - Wiederholung des Verfahrens, bis $d_{ab} > d_S$ für alle Paare (a, b) ist.

Das Abstandsmaß bestimmt die geometrische Gestalt des Jets.

Der Anti- k_T -Algorithmus

Am LHC verwendeter Algorithmus: **Anti- k_T -Algorithmus**.

$p_{T,a}$: Transversalimpuls des Teilchens a .

d_{ab}

$$d_{ab} := \min \left(\frac{1}{p_{T,a}}, \frac{1}{p_{T,b}} \right) \cdot \frac{\Delta_{ab}^2}{R^2}. \quad \Delta_{ab}^2 := (y_a - y_b)^2 + (\phi_a - \phi_b)^2.$$

R : gewählter Radiusparameter. y : Rapidity. ϕ : Azimut.

$d_{a,B} := \frac{1}{p_{T,a}}$: Maß für den Abstand zum Protonenstrahl, wird als d_S verwendet.

Eigenschaften

- Zuerst Paarung hochenergetischer Teilchen, danach Paarung hochenergetischer Teilchen mit niederenergetischen Teilchen. Paarung zweier niederenergetischer Teilchen unterdrückt.
- Jets enthalten wenigstens ein hochenergetisches Teilchen.
- Jets ähneln Kegeljets.
- Algorithmus gewährleistet Infrarot- und Kollinearitätsstabilität und ist unempfindlich auf das zugrunde liegende Ereignis und die Anzahl der inelastischen pp -Kollisionen in einem Ereignis.

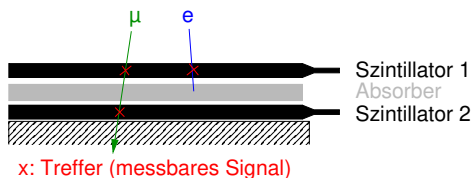
b-Jet-Identifikation

- Jets, die aus b – *Quarks* entstehen, enthalten wenigstens ein b -Hadron.
- b -Hadronen sind langlebig. Sie zerfallen in einem gewissen Abstand vom Primärvertex innerhalb des Jets.
- Durch Rekonstruktion dieses Zerfallsvertex, des sogenannten Sekundärvertex, kann man b -Jets identifizieren.

Triggersysteme für Experimente an Hadroncollidern

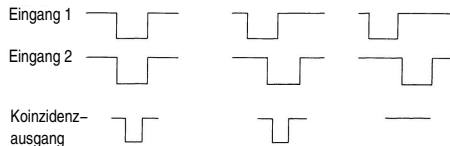
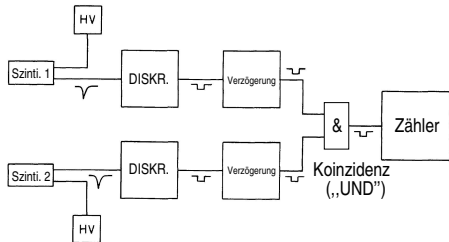
Messung der Raten von Myonen aus der Höhenstrahlung

• Einfacher Aufbau



- Absorber zwischen zwei Szintillationszählern, um die niederenergetische Komponente aus der Höhenstrahlung zu verwerfen.
- Treffer in beiden Szintillatoren nur für hochenergetische Myonen ($E_\mu \sim 300 \text{ MeV}$).

Koinzidenzverfahren



Auswahl derjenigen pp -Kollisionen, die für die spätere Datenanalyse aufgezeichnet werden sollen.

Erläuterung der Funktionsweise eines Triggers am Beispiel der Triggersystems des ATLAS-Experimentes am HL-LHC.

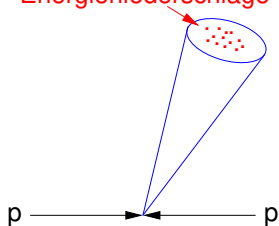
Zweistufiges System

- Stufe 1, L0 genannt, zur Vorauswahl der pp -Kollisionen unter Verwendung der Daten der Kalorimeter und des Myonspektrometers. Maximale Triggerrate: 1 MHz.
Verfügbare Zeit für die Triggerentscheidung, sogenannte Latenz: $<10 \mu\text{s}$ nach einer pp -Kollision.
- Stufe 2, HLT („high-level trigger“) genannt, zur endgültigen Auswahl der pp -Ereignisse unter Verwendung der Daten des gesamten Detektors nach der vollständigen Ereignisrekonstruktion. Maximale Triggerrate: 10 kHz.

Verwendung der Kalorimeterdaten

- e/γ : Suche nach Anhäufungen von Energieniederschlägen im elektromagnetischen Kalorimeter, die sich nicht ins Hadronkalorimeter erstrecken.
⇒ e/γ -Kandidaten mit η -, ϕ - und E_T -Werten.
- **Jets**: Suche nach Anhäufungen von Energiedepositionen in kegelförmigen Regionen der Kalorimeter.

Energieniederschläge



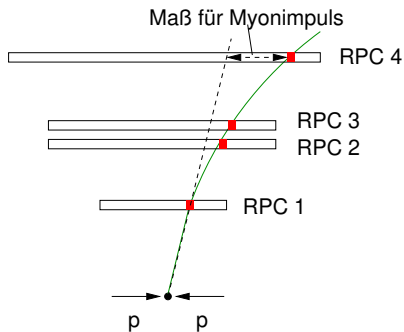
Zur Zeit Kegel mit vordefinierter Größe.
In Zukunft Anti- k_T -Algorithmus.

⇒ Jetkandidaten mit η -, ϕ - und E_T -Werten.

- E_T^{miss} : Die vektorielle Summe der transversalen Energien der Energieniederschläge liefert ein Maß für die fehlende Transversalenergie.

Triggerobjekte in der ersten Triggerstufe

Verwenden der Myonspektrometerdaten \Rightarrow Myonkandidaten



Myontrigger für $|\eta| < 1,05$

Triggerbedingung: Koinzidenz von Treffern in den 4 RPC-Lagen. Schätzwerte von η , ϕ und p_T aus dem Vergleich der Trefferpositionen.

- RPC-Triggerkammern schnell. \Rightarrow Zuordnung eines nachgewiesenen Myons zur pp -Kollision möglich, in der das Myon erzeugt wurde.
- Nur mäßige Ortsauflösung im Zentimeterbereich. \Rightarrow Mäßige Impulsauflösung.
- In einem zweiten Schritt werden auf L0 die Treffer der hochauflösenden Myondriftrohrkammern im Bereich der RPC-Treffer für eine verbesserte Spurrekonstruktion herangezogen.

\Rightarrow Relative p_T -Auflösung von $\sim 5\%$ auf L0 erreichbar.

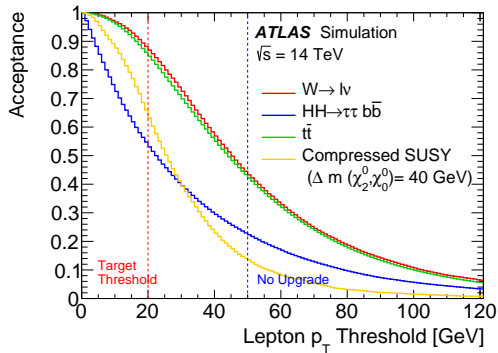
- Triggerlose Auslese der Kalorimeter und der Myonkammern: Trefferdaten werden kontinuierlich von den Detektoren über Gigabitlinks in die (räumlich entfernte) Triggerlogik gesendet.
 - Triggeralgorithmen für die erste Stufe sind auf FPGAs oder FPGAs mit eingebetteten Mikroprozessoren implementiert.
 - Im HLT werden die Daten des Innendetektors mit Hilfe spezieller Mustererkennungschips schnell rekonstruiert, ehe die Daten auf einer Rechnerfarm mit der vollständigen Ereignisrekonstruktion aufbereitet werden.
- ⇒ Komplexe Triggerbedingungen im HLT möglich, z.B. die Forderung nach der Anwesenheit von b -Quark und τ -Jets.

Physikprozesse, die mit dem Trigger zugänglich werden

CERN-LHCC-2017-020 ; ATLAS-TDR-029

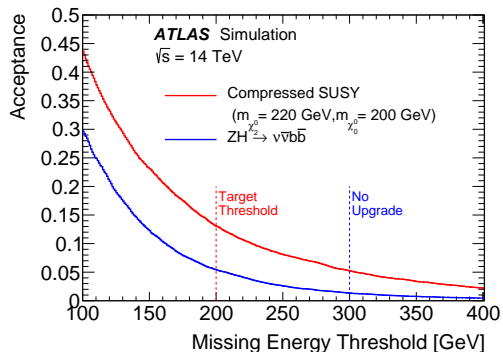
Physics Drivers @ HL-LHC		Processes	Trigger Signatures	TDR Sect.
Precision measurements of the properties of the Higgs Boson	Couplings to fermions	$H \rightarrow \tau\tau, H \rightarrow \mu\mu, t\bar{t}H, H \rightarrow b\bar{b}$	single/di- e or μ / di- τ	2.2, 2.4
	Couplings to W/Z , diff. cross-sections	$H \rightarrow \gamma\gamma, H \rightarrow W^+W^- \rightarrow \ell^+\nu\ell^-\nu, H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow \ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$	$e/\mu, \text{di-}\gamma$	2.3
Precision Standard Model Measurements	Self-coupling	$HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau / b\bar{b}\gamma\gamma / 4b$	di- τ/γ , multi-jets	2.5
	Scalar Higgs boson vs. BSM composite	$H \rightarrow \ell\ell', ZH \rightarrow \ell\ell + (\text{inv})$	e/μ	
Searches for BSM Signatures	Forward/backward asymmetry	$Z \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$	single e/μ	2.1
	Vector-boson scattering	$WWjj, WZjj$	single e/μ	
Searches for BSM Signatures	Precision top mass and cross-sections	$t\bar{t}$ production	e/μ , large R -jets/multi-jets	2.3, 2.5
	Searches for new vector bosons	Vector Boson Fusion (VBF) $Z' \rightarrow \ell\ell$	high- p_T single e/μ	
	Searches for electroweak SUSY	$\chi_1^+ \chi_2^0 \rightarrow WH\chi_1^0\chi_1^0$	E_T^{miss} , single/di- e, μ, τ	
Searches for BSM Signatures	SUSY top partners	$\tilde{t}_1 \rightarrow t\chi_1^0$	large R -jets/multi-jets+ E_T^{miss}	2.3, 2.5
	Dark matter	ISR+ $\chi_1^0\chi_1^0$	jets+ E_T^{miss}	
Searches for BSM Signatures	New resonances, SUSY	$Z', \chi_1^0 \rightarrow jjj$	jets, large R -jets, $e/\mu, \gamma, E_T^{\text{miss}}$	2.3, 2.5
	Long-lived particles	$\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \pi^\pm\tilde{\chi}_1^0$	high impact parameter, E_T^{miss}	
Flavour Physics	Lepton Flavour Violation	$\tau \rightarrow \mu\mu\mu$	low p_T di- μ	2.10
	Searches for FCNC in top decays	$t \rightarrow u/c + H/Z$	single e/μ	
Heavy-Ion Physics	Rare B -meson decays	$B \rightarrow \mu\mu, B_s \rightarrow J/\Psi + \Phi$	low p_T di- μ	2.11
	Light-by-light scattering	$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$	low p_T di-photons	
	Electroweak production	$W/Z/t$	single e/μ	
Heavy-Ion Physics	In-medium parton energy loss (jets in PbPb)	mono-jets	jet, minbias	2.11
	Quarkonia production	$J/\Psi, Y$	low-mass di- e/μ	

Endzustände mit einzelnen Leptonen



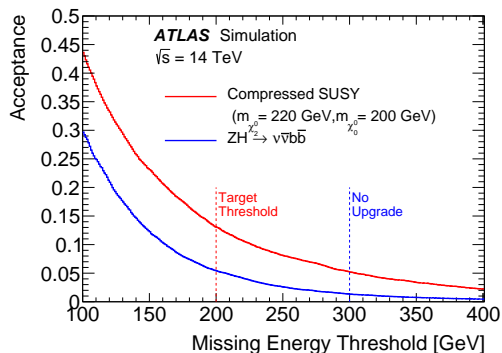
- Akzeptanz: Anteil der Ereignisse, die ein Lepton mit einem Transversalimpuls oberhalb eines gewissen Schwellenwerts haben.
- Für eine möglichst hohe Akzeptanz muss man eine niedrige Schwelle wählen.
- Beim HL-LHC wird man eine Schwelle von 20 GeV wählen können, ohne an die Triggerratengrenze der ersten Stufe zu stoßen.

Akzeptanz für E_T^{miss} -Trigger



Nahezu 100% Akzeptanz erreichbar, wenn man auf 2 Photonen mit $p_T > 25$ GeV triggert.

Akzeptanz für E_T^{miss} -Trigger



- Hohe Akzeptanzen innerhalb des verfügbaren Triggerrate nicht immer möglich.
- In den angegebenen Beispiele ist die Akzeptanz im Bereich von 5-20%.