Tag der Wissenschaften Friedrich-Gymnasium Luckenwalde 16. Februar 2009



# Urknall im Labor Teilchemphysik am Large Hadron Collider

Ulrich Husemann Deutsches Elektronen-Synchrotron

#### Was ist DESY?



#### DESY = Deutsches Elektronen-Synchrotron

- Nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft
- Zwei Standorte: Hamburg (seit 1959) und Zeuthen (seit 1992)
- Zahlen und Fakten
  - Jahresetat: 183 Millionen Euro (90% Bund, 10% Hamburg und Brandenburg)
  - Mitarbeiter: ca. 1900 (davon ca. 600 Wissenschaftler), ca. 100 junge Menschen in Berufsausbildung
- Forschungsschwerpunkte:
  - Teilchenbeschleuniger
  - Forschung mit Photonen
  - Elementarteilchenphysik





#### Wer bin ich?



- Abitur 1994 (Lippstadt in Westfalen)
- technische universität dortmund **HERA**

R



- Diplomstudium Physik (Dortmund, 1995 - 2001)
- **Promotion Physik (Dortmund und** Siegen, 2001–2005)
- **Diplom- und Doktorarbeit beim** HERA-B-Experiment (DESY)

#### Wer bin ich?



- Abitur 1994 (Lippstadt in Westfalen)
- technische universität dortmund

R



- Diplomstudium Physik (Dortmund, 1995–2001)
- Promotion Physik (Dortmund und Siegen, 2001–2005)
- Diplom- und Doktorarbeit beim HERA-B-Experiment (DESY)
- Postdoc (Rochester und Yale, 2005–2008)
- Forschung am CDF-Experiment (Fermilab, bei Chicago)



#### Wer bin ich?



- Abitur 1994 (Lippstadt in Westfalen)
- technische universität dortmund

DESY





OW BO

- Diplomstudium Physik (Dortmund, 1995–2001)
- Promotion Physik (Dortmund und Siegen, 2001–2005)
- Diplom- und Doktorarbeit beim HERA-B-Experiment (DESY)
- Postdoc (Rochester und Yale, 2005–2008)
- Forschung am CDF-Experiment (Fermilab, bei Chicago)







Nachwuchsgruppenleiter bei DESY, Lehre HU Berlin (seit 2008)

Forschung am ATLAS-Experiment



## Teilchenphysik: was wir wissen und was wir nicht wissen



Fr	iedrich-Gymnasium Luckenwald	e, 16.02.2009, U. Husemanı	n: Urknall im Labor – Teilch	enphysik am LHC 5	



Warum falle ich nach unten, wenn ich von der Mauer springe?

> Weil du von der Erde angezogen wirst.









### **Faszination Teilchenphysik**

- Elementarteilchenphysik grundlegende Fragen an die Natur:
  - Was sind die fundamentalen Bausteine der Materie?
  - Welche Kräfte wirken zwischen den fundamentalen Bausteinen?
- Technische Herausforderungen:
  - Nachweis der fundamentalen Bausteine mit "Teilchendetektoren" – riesige Maschinen mit Mikrometer-Präzision
  - Verarbeitung der Datenflut
- Internationale Zusammenarbeit:
  - Institute aus ca. 40 Nationen
  - Tausende Kolleginnen und Kollegen aus aller Welt





#### **Urknall im Labor?**



#### "Urknall im Labor" heißt:

- LHC soll Erkenntnisse bringen über Entwicklung des frühen Universums
   → enger Zusammenhang Teilchenphysik – Kosmologie
- LHC: Energien (=Temperaturen) wie weniger als 10<sup>-10</sup> Sekunden nach dem Urknall
- Kontrollierte Bedingungen: Teilchenkollisionen inmitten empfindlicher Detektoren
- "Urknall im Labor" heißt nicht:
  - Künstliche Erzeugung eines neuen Urknalls usw.



## Warum immer höhere Energien?

- Grundpfeiler der Teilchenphysik:
  - Spezielle Relativitätstheorie (A. Einstein)
  - Quantenmechanik
     (E. Schrödinger, W. Heisenberg, …)
- Relativitätstheorie:  $E = mc^2$ 
  - Masse ist eine Form von Energie
  - Mehr Energie → Produktion schwererer Teilchen
- Quantenmechanik:  $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2}$ 
  - Heisenberg'sche Unschärferelation:
     Ort (Δx) und Impuls (Δp) nicht gleichzeitig beliebig genau bekannt
  - Größerer Impulsübertrag
     Auflösung kleinerer Strukturen









#### Größenordnungen





## Fundamentale Teilchen und Kräfte





- Teilchen im "Standardmodell der Teilchenphysik"
  - 12 Elementarteilchen, jedes mit Antiteilchen
  - 6 Quarks und 6 Leptonen
  - Anordnung in 3 Familien mit unterschiedlichen Massen
- Kräfte im Standardmodell







[http://www.particlephysics.ac.uk/]

## Fundamentale Teilchen und Kräfte





- Teilchen im "Standardmodell der Teilchenphysik"
  - 12 Elementarteilchen, jedes mit Antiteilchen
  - 6 Quarks und 6 Leptonen
  - Anordnung in 3 Familien mit unterschiedlichen Massen
- Kräfte im Standardmodell







[http://www.particlephysics.ac.uk/]

## Offene Fragen 2009: Das Higgs-Teilchen



#### Die Massenfrage:

- Warum unterscheiden sich die Massen der Elementarteilchen in den drei Familien?
- Warum haben die Elementarteilchen überhaupt Masse?
- Lösung: das "Higgs-Teilchen"
  - Postuliert von britischem Physiker
     Peter Higgs (und anderen) im Jahr 1964
  - Funktion: Higgs-Teilchen "gibt" allen Elementarteilchen Masse (die Masse zusammengesetzter Teilchen ist komplizierter!)
  - Fieberhafte Suche, aber noch nicht experimentell nachgewiesen







#### Wie Teilchen Masse bekommen:



Gäste bei einer Party (= Higgs-Feld)



#### Wie Teilchen Masse bekommen:



Gäste bei einer Party (= Higgs-Feld)



Prominenter betritt den Raum (= Teilchen)



#### Wie Teilchen Masse bekommen:



Gäste bei einer Party (= Higgs-Feld)



Prominenter betritt den Raum (= Teilchen)



Prominenter kommt schwer voran (Trägheit = Masse)



#### Wie Teilchen Masse bekommen:



Gäste bei einer Party (= Higgs-Feld)



Prominenter betritt den Raum (= Teilchen)



Prominenter kommt schwer voran (Trägheit = Masse)

#### Wie das Higgs-Teilchen Masse bekommt:



Jemand streut ein Gerücht (= Anregung des Higgs-Felds)



Gerücht verbreitet sich (= massives Higgs-Teilchen)

[D. Miller]

## Standardmodell der Kosmologie





 Seit ca. 10 Jahren: konsistentes Modell von der Entwicklung des Universums seit dem Urknall → "Standardmodell der Kosmologie"

• Passen Teilchenphysik und Kosmologie zusammen?

#### **Dunkle Materie und Dunkle Energie**







#### **Dunkle Materie und Dunkle Energie**





#### Supersymmetrie?



- Das Standardmodells der Teilchenphysik erklärt nicht alles:
  - Teilchen des Standardmodells: nur 4% der Energiedichte im Universum
  - Standardmodell funktioniert nicht gut f
    ür Energien oberhalb 1 TeV
- Lösungsidee: Supersymmetrie ("SUSY")
  - Zu jeden Teilchen im Standardmodell gibt es ein (schwereres) Spiegelteilchen
  - Dunkle Materie = leichteste Spiegelteilchen (häufig: "Neutralino")



#### **Extra-Dimensionen?**

- Noch ein Problem: keine Gravitation im Standardmodell
  - Gravitation funktioniert nicht "einfach so" als Quantentheorie
  - Wasserstoffatom: Gravitationskraft zwischen Proton und Elektron 10<sup>42</sup> mal schwächer als elektromagnetische Kraft → "Hierarchieproblem"
- Spekulative Lösungsidee: zusätzliche Raumdimensionen
  - Gravitation breitet sich in mehr als 3 Raumdimensionen aus



L. Randall

**Planck-Brane:** Gravitation stark

Bulk

**TeV-Brane:** SM-Teilchen Gravitation schwach



R. Sundrum

## Schwarze Löcher am LHC?





#### • Theorien mit Extra-Dimensionen:

- Gravitation in Extra-Dimensionen stark genug zur Erzeugung mikroskopischer schwarzer Löcher am LHC (≠ Einstein'sches astronomisches schwarzes Loch)
- Zerfall in < 10<sup>-25</sup> Sekunden durch Hawking-Strahlung → spektakuläre Signatur im Detektor
- (Wilde) Spekulation: schwarzes Loch zerfällt nicht, sondern frisst Erde auf
- Der LHC ist sicher:
  - Kosmischer Strahlung: jede Sekunde Kollisionen äquivalent zu >10<sup>14</sup> Jahren LHC-Betrieb
  - Keine Zerstörung von Sonnen oder Neutronensternen durch schwarze Löcher beobachtet



## CERN und der Large Hadron Collider

### CERN – Habe ich schonmal gehört...



#### CERN – Habe ich schonmal gehört…





#### CERN – Habe ich schonmal gehört…





#### CERN – where the web was born...



Tim Berners-Lee (1990)



## Was ist CERN?



Genfer See



CERN = Europäisches Teilchenphysiklabor Weltweit größtes Labor für Teilchenphysik, gegründet 1954 Historischer Name: "Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire" 2500 Angestellte, fast 10000 Gäste (85 Nationalitäten)



## LHC – der Large Hadron Collider





## LHC – der Large Hadron Collider

LHC-Beschleuniger: Proton-Proton- und Blei-Blei-Kollisionen



## LHC – der Large Hadron Collider

**CMS-Experiment:** 

Vielzweckexperiment



LHC-Beschleuniger: Proton-Proton- und Blei-Blei-Kollisionen





Friedrich-Gymnasium Luckenwalde, 16.02.2009, U. Husemann: Urkn

#### ATLAS-Experiment: Vielzweckexperiment


## LHC – der Large Hadron Collider

**CMS-Experiment:** 

Vielzweckexperiment



LHC-Beschleuniger: Proton-Proton- und Blei-Blei-Kollisionen





ALICE-Experiment: Schwerionenphysik



Luckenwalde, 16.02.2009, U. Husemann: Urkn





ATLAS-Experiment: Vielzweckexperiment



### **Prinzip des Teilchenbeschleunigers**











DES















# Beschleunigung: Hohlraumresonatoren





# Beschleunigung: Hohlraumresonatoren





## Ablenkung: Dipolmagnete





## Ablenkung: Dipolmagnete





### LHC: Zahlen und Fakten





- Magnete halten Strahl auf Kreisbahn:
  - 1232 supraleitende Dipolmagnete (8.33 T)
  - Heliumkühlung, Betriebstemperatur: 1.9 K
- Strahlparameter:
  - Ca. 2800 Pakete mit jeweils ca. 100 Milliarden Protonen
  - Gespeicherte Strahlenergie: 700 MJ (kinetische Energie ≈ TGV mit 200 km/h)
- Wechselwirkungsrate in ATLAS & CMS
  - 40 Millionen mal 25 Proton-Proton-Kollisionen pro Sekunde
     → 1 Milliarde Ereignisse pro Sekunde
  - > 99.9999% dieser Ereignisse sind "uninteressant" (bekannte Teilchen)
  - Im Schnitt: ein Higgs-Boson in jedem 10.000.000.000sten Ereignis



# **Experimente am LHC**

### Anforderungen an die Detektoren





- Vollständige Charakterisierung der Kollision: Ort, Impuls, Energie, Art aller Teilchen → verschiedene Detektortypen, zwiebelschalenartig um Kollisionspunkt
- Neue Teilchen zerfallen sehr schnell
  - Nachweis von Zerfallsprodukten: geladene Leptonen (e,μ,τ), Photonen, Pionen, Protonen, Neutronen, Neutrinos
  - Keine freien Quarks → Nachweis als Jets = Bündel von Teilchen
  - Nachweis aller Zerfallsprodukte
    möglichst hermetischer Detektor
- Neue Teilchen werden selten erzeugt → hohe Kollisionsraten → schnelle Auslese

### Anforderungen an die Detektoren





- Vollständige Charakterisierung der Kollision: Ort, Impuls, Energie, Art aller Teilchen → verschiedene Detektortypen, zwiebelschalenartig um Kollisionspunkt
- Neue Teilchen zerfallen sehr schnell
  - Nachweis von Zerfallsprodukten: geladene Leptonen (e,μ,τ), Photonen, Pionen, Protonen, Neutronen, Neutrinos
  - Keine freien Quarks → Nachweis als Jets = Bündel von Teilchen
  - Nachweis aller Zerfallsprodukte
    möglichst hermetischer Detektor
- Neue Teilchen werden selten erzeugt → hohe Kollisionsraten → schnelle Auslese

### Teilchennachweis





### **Flug zum ATLAS-Experiment**



[ATLAS]

### **Flug zum ATLAS-Experiment**



[ATLAS]



#### ATLAS-Fakten:

- **\*** 45 m lang, 25 m hoch
- **\*** Gewicht: 7000 Tonnen
- \* 100 Millionen Elektronikkanäle



#### ATLAS-Fakten:

- **\*** 45 m lang, 25 m hoch
- **\*** Gewicht: 7000 Tonnen
- \* 100 Millionen Elektronikkanäle

Friedrich-Gymnasium Luckenwalde, 16.02.2009, U. Husemann: Urknall im Labor – Teilchenphysik am LHC 31

Spurdetektoren









### Zusammenbau des ATLAS-Detektors





### **CMS – Compact Muon Solenoid**





### **ALICE – Schwerionen & Ursuppe**

\*

\*



## LHCb – Symmetrie Materie/Antimaterie







# Teilchennachweis

### Impulsmessung



- Geladene Teilchen werden von Magnetfeldern abgelenkt
- Lorentzkraft als Zentripetalkraft:  $e \vec{v} \times \vec{B} = \frac{mv^2}{r} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$
- Typische Magnete in Collider-Detektoren
  - Solenoidmagnet (häufig supraleitend) mit Rückflussjoch
  - Ausnahme: LHCb → Dipolmagnet
- Homogenes Magnetfeld: helikale (= schraubenlinienförmige) Bewegung
  - Senkrecht zu Feldlinien: Kreisbahn
  - Parallel zu Feldlinien: gleichförmig-geradlinig
- Impuls senkrecht zu *B* aus Krümmungsradius der Teilchenspur:
   p<sub>T</sub>[GeV/c] = 0.3 *B*[T] · r[m]



### **Spur- und Vertexrekonstruktion**



- Mehrlagiger Spurdetektor
- Elektrische Signal in jeder Detektorlage
   → Spurpunkte
- Spuranpassung:
  - Mustererkennung: liegen Spurpunkte auf gemeinsamer Helixbahn?
  - Spurfit: Anpassung der der Helixparameter
- Vertexanpassung: zeigen Spuren auf gemeinsamen Ursprungsort ("Vertex")?





Simulierter Zerfall eines supersymmetrischen Teilchens (Seitenansicht)

### **Spur- und Vertexrekonstruktion**





### **Dotierte Halbleiter**



- Heutige Spurdetektoren: Halbleitertechnologie
- Typische Halbleiter (z.B. Silizium, GaAs)
  - Kristallgitter mit 4 Valenzelektronen
  - Zwei Arten von Ladungsträgern:
    - Negativ freie Elektronen
    - Positiv Elektronen wandern zwischen freien Positionen im Kristallgitter ("Löcher")
- Veränderung der Eigenschaften durch Dotierung:
  - Füge Atome mit 5 Valenzelektronen hinzu (P, As, Sb): "n-dotiert" (zusätzliche Elektronen)
  - Füge Atome mit 3 Valenzelektronen hinzu (B, Al, Ga, In): "p-dotiert" (zusätzliche Löcher)
- Tieferes Verständnis: Bändermodell



[hyperphysics.phy-astr.gsu.edu]

# pn-Übergang und Verarmungszone







[hyperphysics.phy-astr.gsu.edu]

- Übergang zwischen *p*-dotiertem und *n*-dotiertem Halbleiter
  - Ladungsträger diffundieren zur anderen Seite und rekombinieren
  - Ausbildung einer nicht-leitenden Schicht ("Verarmungszone")

### (Umgekehrte) Bias-Spannung

- Entfernung von Ladungsträgern
  → Vergrößerung der Verarmungszone
- Durchgang geladene Teilchen: neue Ladungsträger durch Ionisierung
   → elektrisches Signal

## Funktionsprinzip: Siliziumdetektoren





### **Beispiel: CMS-Spurdetektor**





- CMS-Experiment: gesamter Spurdetektor aus Silizium
  - Mehr als 200 m<sup>2</sup> Detektorfläche, mehr als 60 Millionen Auslesekanäle
  - Innere Lagen: Pixeldetektoren
    → hohe Auflösung
  - Äußere Lagen: Streifendetektoren
    → große Abdeckung



### Kalorimeter



- Historisch: Kalorimeter = "Wärmemesser"
- Teilchenphysik: Kalorimeter = "Energiemesser"
- Idee: messe Teilchenenergie mittels (teilweiser) Absorption in schwerem Detektormaterial



"Look, our new total absorption calorimeter!"

### Teilchenschauer



- Teilchen wechselwirken mit Detektormaterial im Kalorimeter: Schauer neuer Teilchen
- Welchselwirkungen in Materie: stark unterschiedlich zwischen Elektronen/ Photonen und Hadronen
  - Elektromagnetische Kalorimeter
  - Hadronische Kalorimeter
- Gesamtlänge aller Spuren im Schauer proportional zur Energie des Primärteilchens
- Teilchenidentifikation möglich durch Analyse der Schauerform


#### Arten von Kalorimetern

Lab 27 PH-CMA CERN



- Homogene Kalorimeter: Schauernachweis in gesamtem Detektorvolumen
  - Kristalle: CsI(TI), PbWO<sub>4</sub>, …
     → durchgehendes Teilchen erzeugt Lichtblitz ("Szintillation")
  - Flüssige Edelgase: Argon (LAr), Krypton (LKr) → Ionisation
- Sampling-Kalorimeter: Absorbermaterial und sensitives Material wechseln sich ab
  - Metall–Szintillator: Blei, Eisen, Uran + Plastikszintillator
  - Metall–Flüssige Edelgase: Blei, Kupfer, Messing + LAr

Segment des Flüssigargon-Kalorimeters (ATLAS)





# Flüssigargon-Kalorimeter in ATLAS



- Flüssigargon-Kalorimeter:
  - Durchgehendes Teilchen ionisiert hochreines flüssiges Argon
  - Erzeugte Ionen driften zu Elektroden (Spannung: ca. 2000 V), erzeugen elektrisches Signal
  - Betriebstemperatur: ca. 80 K (flüssiger Stickstoff)
- Elektromagnetisches Kalorimeter bei ATLAS
  - Absorption elektromagnetischer Schauer in Bleiplatten
  - Besonderheit Akkordeonstruktur: schnelle Auslese, keine Lücken in Detektorabdeckung





#### **Online-Datenverarbeitung**

- Herausforderung Datenrate:
   1 Milliarde Kollisionen pro Sekunde
  - Datenrate ca. 1 TB/s → mit heutiger Technologie nicht verarbeitbar
  - Zum Glück: >99.999999% aller Kollisionen "uninteressant" → schnelle Selektion "interessanter" Kollisionen



Uninteressantes Ereignis



### **Online-Datenverarbeitung**

- Herausforderung Datenrate:
   1 Milliarde Kollisionen pro Sekunde
  - Datenrate ca. 1 TB/s → mit heutiger Technologie nicht verarbeitbar
  - Zum Glück: >99.999999% aller Kollisionen "uninteressant" → schnelle Selektion "interessanter" Kollisionen
- Lösung: mehrstufige Online-Datenfilterung ("Trigger"):
  - Einfache Signale, geringer Auflösung,
     z. B. ein hochenergetisches Myon
     → spezielle Trigger-Hardware
  - Größere Auflösung in Teilen des Detektors, z. B. Kegel um Myon → Software auf Computerfarm
  - 3. Information von Gesamtdetektor  $\rightarrow$  Software auf Computerfarm



# **Grid-Computing**



- Herausforderungen:
  - Datenrate: ca. 15 PByte/Jahr von allen LHC-Experimenten (CD-Stapel von 20 km Höhe)
  - Prozessierung (Rekonstruktion, Simulation etc.): Rechenleistung von 100.000 Computern
- Lösung: Grid-Computing
  - Rechenleistung und Speicherplatz weltweit verteilt
  - Geschickte Aufteilung der Ressourcen: Bringe die Anwendung zu den Daten
  - Name "Grid": Analogie zu Stromnetz ("power grid")
  - LHC: Mehrstufiger ("Multi-Tier") Zugang



# **Grid-Computing**



- Herausforderungen:
  - Datenrate: ca. 15 PByte/Jahr von allen LHC-Experimenten (CD-Stapel von 20 km Höhe)
  - Prozessierung (Rekonstruktion, Simulation etc.): Rechenleistung von 100.000 Computern
- Lösung: Grid-Computing
  - Rechenleistung und Speicherplatz weltweit verteilt
  - Geschickte Aufteilung der Ressourcen: Bringe die Anwendung zu den Daten
  - Name "Grid": Analogie zu Stromnetz ("power grid")
  - LHC: Mehrstufiger ("Multi-Tier") Zugang



#### 10.09.2008: Erster Strahl











### 10.09.2008: Erster Strahl





### 19.09.2008: Verfrühte Winterpause



#### Was ist passiert?

- LHC-Magnete sind mit Spleißen elektrisch verbunden (verschweißt)
- Eine Verbindung hatte winzigen elektrischen Widerstand (nΩ): Lichtbogen → Loch in Heliumsystem
- Druckwelle im Heliumsystem beschädigt weitere Magnete
- Und was jetzt?
  - Bessere Diagnostik und verbessertes Überdrucksystem
  - Reparaturen von 53 Magnete an Oberfläche → im vollen Gange
  - Erster Strahl: Sommer 2009







[CERN]



# Menschen am LHC

#### Large Hadron Rap: 4,3 Mio Hits bei YouTube!





### **Faszination Internationalität**





### **Faszination Internationalität**





### **Berliner Studierende bei ATLAS**





- Studierende bei ATLAS: nur eine/r unter 2500?
  - Teil eines der größten Forschungsprojekte der Menschheit
  - Komplexes System,
     Verantwortung f
    ür Teilgebiet
     → Sichtbarkeit
- Breite Ausbildung:
  - Hardware: Planung, Bau, Tests…
  - Software: Datenbanken, objektorientierte
     Programmierung,
     Simulationen, statistische
     Methoden...

# **Berufsaussichten: Teilchenphysik**



#### Hervorragende Berufsaussichten!

- Absolventinnen und Absolventen begehrt in Industrie und Forschung
- Arbeitslosigkeit <2%, vgl. Durchschnitt 2007: 8.5%)
- Schlüsselqualifikationen auch in der Industrie begehrt:
  - Problemlösung
  - Team- und Kommunikationsfähigkeit
  - Konstruktive Konkurrenzsituation
  - Internationalität/ Fremdsprachen
  - EDV-Kenntnisse



# Arbeitsmarkt für Physiker/innen 2008



#### Tätigkeit: Hier arbeiten Physiker/innen<sup>3</sup>



#### Bedarf: Hier werden Physiker/innen gesucht<sup>4</sup> 20,8 % Sonstige Softwareentwicklung 2% Öffentliche Verwaltung 5% Forschung und Entwicklung 27,4% Sozial- und Gesundheitswesen 2% Hochschule und Architektur- und Forschungseinrichtungen Ingenieurbüros 2,3% 21,3 % (Stellen meist befristet) Unternehmensberatungen 1,1% Personaldienstleistungen, 7,9 % Zeitarbeit 7,6 % Messtechnik und Optik Produktion elektronischer 2,6% Bauelemente

#### **Durchschnittliches Jahreseinkommen**<sup>3, 5, 6</sup>



[DPG, PHYSIKonkret 12/08]



#### Quellen:

- Hochschul-Informations-System GmbH (HIS), "Der Absolventenjahrgang 2001/2002 fünf Jahre nach dem Hochschulabschluss" (2008).
- 4) Bundesagentur für Arbeit.
- 5) Kienbaum Management Consultants GmbH, Gehaltsumfrage 2008.
- 6) HIS, "Zwischen Hochschule und Arbeitsmarkt: Eine Befragung der Hochschulabsolventinnen und Hochschulabsolventen des Prüfungsjahres 2001" (2004).

#### Zusammenfassung



# WELT MASCHINE

#### DIE KLEINSTEN TEILCHEN UND GRÖSSTEN RÄTSEL DES UNIVERSUMS

#### AUSSTELLUNG IM U-BAHNHOF BUNDESTAG, BERLIN

15.10. - 16.11.2008 • MO - SO 10 - 19 UHR • DO 10 - 22 UHR • WWW.DIEWELTMASCHINE.DE

- Teilchenphysik und Kosmologie: viele Antworten, aber noch mehr Fragen:
  - Warum ist die Gravitation so schwach?
  - Woraus besteht Dunkle Materie?
  - Warum gibt es im Universum Materie, aber fast keine Antimaterie?
- LHC: Anbruch einer neuen Ära der Teilchenphysik
  - Unerreichte Kollisionsenergien
  - Teilchendetektoren: präzise
     Vermessung der Kollisionen
  - Herbst 2009: erste Kollisionen





# Impulsmessung mit Siliziumdetektoren





- Idee der Impulsmessung:
  - Bestimme Spuren geladener Teilchen aus Spurpunkten
  - Ablenkung in Magnetfeld umgekehrt proportional zu Impuls des Teilchens (Masse × Geschwindigkeit)

# Impulsmessung mit Siliziumdetektoren





#### **Front-End-Elektronik**

DESY

- Detektoren liefern in der Regel kleine analoge Signal
   Vorverarbeitung nah am Detektor ("Front-End")
- ASD (engl.: amplifier-shaper-discriminator)



ADC (engl.: analog-to-digital converter)



- Datenübertragung häufig mit optischen Fasern
  - Kleine Dämpfung über typische Abstände (50–100 m)
  - Keine Beeinflussung durch elektromagnetische Störungen

#### **Online-Datenverarbeitung**



- Herausforderung Datenrate:
  - "Nadel im Heuhaufen": jede Sekunde 1 Milliarde Kollisionen, aber nur ca. 100 interessante Ereignisse
  - Überschlagsrechnung: 10<sup>9</sup> Kollisionen/s × 10<sup>6</sup> aktive Kanäle
     = 1 TB/s → mit heutiger Technologie nicht speicherbar



### **Online-Datenverarbeitung**



#### • Herausforderung Datenrate:

- "Nadel im Heuhaufen": jede Sekunde 1 Milliarde Kollisionen, aber nur ca. 100 interessante Ereignisse
- Überschlagsrechnung: 10<sup>9</sup> Kollisionen/s × 10<sup>6</sup> aktive Kanäle
   = 1 TB/s → mit heutiger Technologie nicht speicherbar
- Lösung: mehrstufige Datenfilterung ("Trigger"):
- Einfache Signale, geringer Auflösung,
   z. B. ein hochenergetisches Myon
   → spezielle Trigger-Hardware
- Größere Auflösung in Teilen des Detektors, z. B. Kegel um Myon → Software, Computerfarm
- Information von Gesamtdetektor → Software, Computerfarm





# **Grid-Computing**



- Herausforderungen:
  - Datenrate: ca. 15 PByte/Jahr von allen LHC-Experimenten (CD-Stapel von 20 km Höhe)
  - Prozessierung (Rekonstruktion, Simulation etc.): Rechenleistung von 100.000 Computern
- Lösung: Grid-Computing
  - Rechenleistung und Speicherplatz weltweit verteilt
  - Geschickte Aufteilung der Ressourcen: Bringe die Anwendung zu den Daten
  - Name "Grid": Analogie zu Stromnetz ("power grid")
  - LHC: Mehrstufiger ("Multi-Tier") Zugang



# **Grid-Computing**



- Herausforderungen:
  - Datenrate: ca. 15 PByte/Jahr von allen LHC-Experimenten (CD-Stapel von 20 km Höhe)
  - Prozessierung (Rekonstruktion, Simulation etc.): Rechenleistung von 100.000 Computern
- Lösung: Grid-Computing
  - Rechenleistung und Speicherplatz weltweit verteilt
  - Geschickte Aufteilung der Ressourcen: Bringe die Anwendung zu den Daten
  - Name "Grid": Analogie zu Stromnetz ("power grid")
  - LHC: Mehrstufiger ("Multi-Tier") Zugang



# **Kalibration und Alignment**



- Kalibration: Sicherstellung gleichmäßiger Detektorantwort
  - Herausforderung 1: Nicht jeder Auslesekanal eines Subdetektors zeigt die gleiche Antwort bei Teilchendurchgang
  - Herausforderung 2: Antwort kann zeitlich variabel sein
- Alignment: genaue Ausrichtung der Detektoren
  - Herausforderung: riesige Detektoren (z.B. ATLAS: 25 × 25 × 45 m<sup>3</sup>), aber Spurauflösung von einigen 10 µm
  - Grobe Ausrichtung: Präzisionsmechanik bei Konstruktion, Vermessungstechnik
  - Feinausrichtung mit Daten von Teilchenspuren



# **Kalibration und Alignment**



- Kalibration: Sicherstellung gleichmäßiger Detektorantwort
  - Herausforderung 1: Nicht jeder Auslesekanal eines Subdetektors zeigt die gleiche Antwort bei Teilchendurchgang
  - Herausforderung 2: Antwort kann zeitlich variabel sein
- Alignment: genaue Ausrichtung der Detektoren
  - Herausforderung: riesige Detektoren (z.B. ATLAS: 25 × 25 × 45 m<sup>3</sup>), aber Spurauflösung von einigen 10 µm
  - Grobe Ausrichtung: Präzisionsmechanik bei Konstruktion, Vermessungstechnik
  - Feinausrichtung mit Daten von Teilchenspuren



# **Kalibration und Alignment**



- Kalibration: Sicherstellung gleichmäßiger Detektorantwort
  - Herausforderung 1: Nicht jeder Auslesekanal eines Subdetektors zeigt die gleiche Antwort bei Teilchendurchgang
  - Herausforderung 2: Antwort kann zeitlich variabel sein
- Alignment: genaue Ausrichtung der Detektoren
  - Herausforderung: riesige Detektoren (z.B. ATLAS: 25 × 25 × 45 m<sup>3</sup>), aber Spurauflösung von einigen 10 µm
  - Grobe Ausrichtung: Präzisionsmechanik bei Konstruktion, Vermessungstechnik
  - Feinausrichtung mit Daten von Teilchenspuren





 Monte-Carlo (MC-) Simulationen: numerische Methoden, die auf Zufallszahlen basieren

> "It's called 'Monte Carlo' because you're playing on someone else's money." [B. Jacobsen, Berkeley]

#### Beispiel: MC-Integration



Integral proportional zur Zahl der zufälligen Punkte unter der Kurve



 Monte-Carlo (MC-) Simulationen: numerische Methoden, die auf Zufallszahlen basieren

> "It's called 'Monte Carlo' because you're playing on someone else's money." [B. Jacobsen, Berkeley]

#### MC-Simulation in der Teilchenphysik

**Ereignisgenerator** simuliere physikalischen Prozess (Quantenmechanik: Wahrscheinlichkeiten)

#### Beispiel: MC-Integration



Integral proportional zur Zahl der zufälligen Punkte unter der Kurve



 Monte-Carlo (MC-) Simulationen: numerische Methoden, die auf Zufallszahlen basieren

> "It's called 'Monte Carlo' because you're playing on someone else's money." [B. Jacobsen, Berkeley]

#### Beispiel: MC-Integration



Integral proportional zur Zahl der zufälligen Punkte unter der Kurve

#### MC-Simulation in der Teilchenphysik

**Ereignisgenerator** simuliere physikalischen Prozess (Quantenmechanik: Wahrscheinlichkeiten)

Detektorsimulation: simuliere Wechselwirkung mit Detektormaterial



 Monte-Carlo (MC-) Simulationen: numerische Methoden, die auf Zufallszahlen basieren

> "It's called 'Monte Carlo' because you're playing on someone else's money." [B. Jacobsen, Berkeley]

#### Beispiel: MC-Integration



Integral proportional zur Zahl der zufälligen Punkte unter der Kurve

#### MC-Simulation in der Teilchenphysik

**Ereignisgenerator** simuliere physikalischen Prozess (Quantenmechanik: Wahrscheinlichkeiten)

Detektorsimulation: simuliere Wechselwirkung mit Detektormaterial

**Digitalisierung**: übersetze Wechselwirkungen im Detektor in realistische Signale



 Monte-Carlo (MC-) Simulationen: numerische Methoden, die auf Zufallszahlen basieren

> "It's called 'Monte Carlo' because you're playing on someone else's money." [B. Jacobsen, Berkeley]

#### Beispiel: MC-Integration



Integral proportional zur Zahl der zufälligen Punkte unter der Kurve

#### MC-Simulation in der Teilchenphysik

**Ereignisgenerator** simuliere physikalischen Prozess (Quantenmechanik: Wahrscheinlichkeiten)

Detektorsimulation: simuliere Wechselwirkung mit Detektormaterial

**Digitalisierung**: übersetze Wechselwirkungen im Detektor in realistische Signale

Rekonstruktion/Analyse: wie für reale Daten

#### Datenanalyse



- Objektorientierte Datenanalyse mit ROOT (<u>http://root.cern.ch</u>)
- Analyseschritte (schematisch):
  - Trennung der "interessanten" Kollisionen (z.B. Higgs-Kandidat) von "uninteresanten" Kollisionen: Selektionsschnitte, Anpassungen ("Fits"), neuronale Netze, …
  - MC-Simulationen, Vergleich mit theoretischen Vorhersagen
- Präsentation der Ergebnisse, eingehende Prüfung durch Kollaboration
- Vorstellung auf Konferenzen
- Veröffentlichung in internationalen Fachzeitschriften

🥖 🖯 🖯	X TreeV	liewer	
<u>F</u> ile <u>E</u> dit <u>R</u> un <u>O</u> ptions			<u>H</u> elp
Command	Option	Histogram htemp 🗖 Hist 🗖	Scan 🔽 Rec
Current Folder TreeList Function	Current Tree : TopT X: -empty- Z: -empty- C: -empty- Scan box E() -empty- E() -empty- E(	Fiel EC) -empty- evt run Number evt.eventNumber evt.eventNumber evt.cosmicOOTLow evt.CosmicOOTLow evt.bunchNum159 evt.bunchNum36 evt.gliveTotalLumi evt.gliveTotalLumi evt.scalerTotalLumi evt.scalerTotalLumi evt.scalerTotalLumi	<ul> <li>evt.bun</li> <li>evt.gliw</li> <li>evt.cres</li> <li>summar</li> </ul>
vist OList	First entry : 0 Last entry : 140	60 н н н н	▼ RESE <sup>-1</sup>

#### Datenanalyse



- Objektorientierte Datenanalyse mit ROOT (<u>http://root.cern.ch</u>)
- Analyseschritte (schematisch):
  - Trennung der "interessanten" Kollisionen (z.B. Higgs-Kandidat) von "uninteresanten" Kollisionen: Selektionsschnitte, Anpassungen ("Fits"), neuronale Netze, …
  - MC-Simulationen, Vergleich mit theoretischen Vorhersagen
- Präsentation der Ergebnisse, eingehende Prüfung durch Kollaboration
- Vorstellung auf Konferenzen
- Veröffentlichung in internationalen Fachzeitschriften



#### Datenanalyse



- Objektorientierte Datenanalyse mit ROOT (<u>http://root.cern.ch</u>)
- Analyseschritte (schematisch):
  - Trennung der "interessanten" Kollisionen (z.B. Higgs-Kandidat) von "uninteresanten" Kollisionen: Selektionsschnitte, Anpassungen ("Fits"), neuronale Netze, …
  - MC-Simulationen, Vergleich mit theoretischen Vorhersagen
- Präsentation der Ergebnisse, eingehende Prüfung durch Kollaboration
- Vorstellung auf Konferenzen
- Veröffentlichung in internationalen Fachzeitschriften

