ROOT - Einleitung

Der Vergleich von Messungen mit theroretischen Modellen ist ein wichtiger Bestandteil der Experimentalphysik. Dazu müssen in der Regel Daten selektiert, statistisch analysiert, modelliert, Modelparameter angepasst und Fehler abgeschätzt werden.

- Mit den bisher gelernten C++ Elementen könnten wir im Prinzip die Daten eines Experimentes analysieren, aber es fehlt z.B. noch
  - graphische Darstellung
  - Datenanpassung
  - I/O für komplexere Datenstrukturen (HEP Experimente > 10^6 Kanäle)
  - Speichern von Objekten

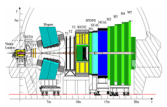
ROOT Data Analysis Framework entwickelt seit 1995 am CERN als Open Source Project unter GNU LGPL zur Datenanalyse am LHC als C++ Klassenbibliothek.

- 10 Vollzeit-Entwickler am CERN
- Offener Quellcode → software wird von den Usern mit- und weiterentwickelt
- Dokumentation, Tutorials und Quellcode: https://root.cern.ch/

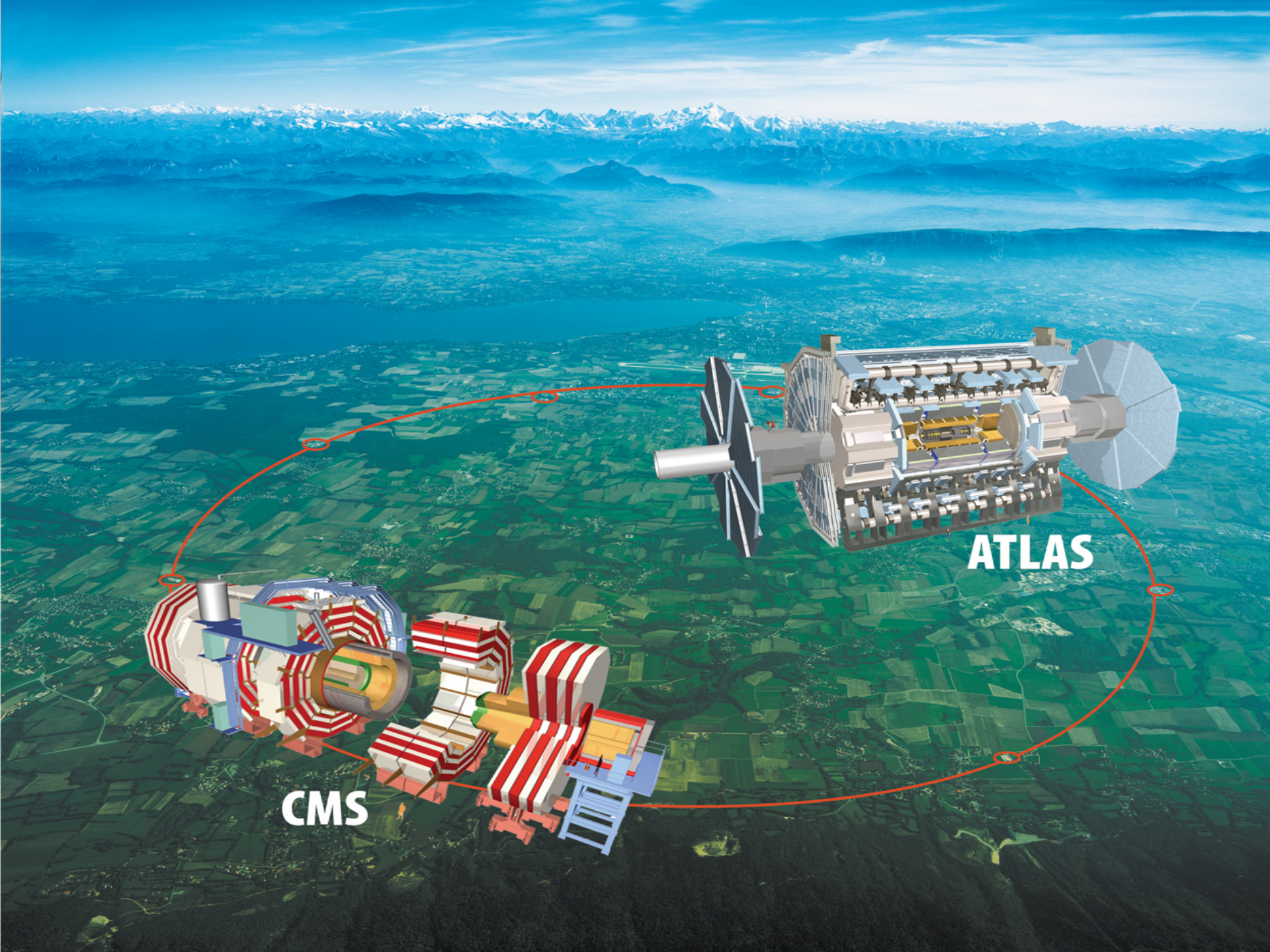
Large Hadron Collider at CERN

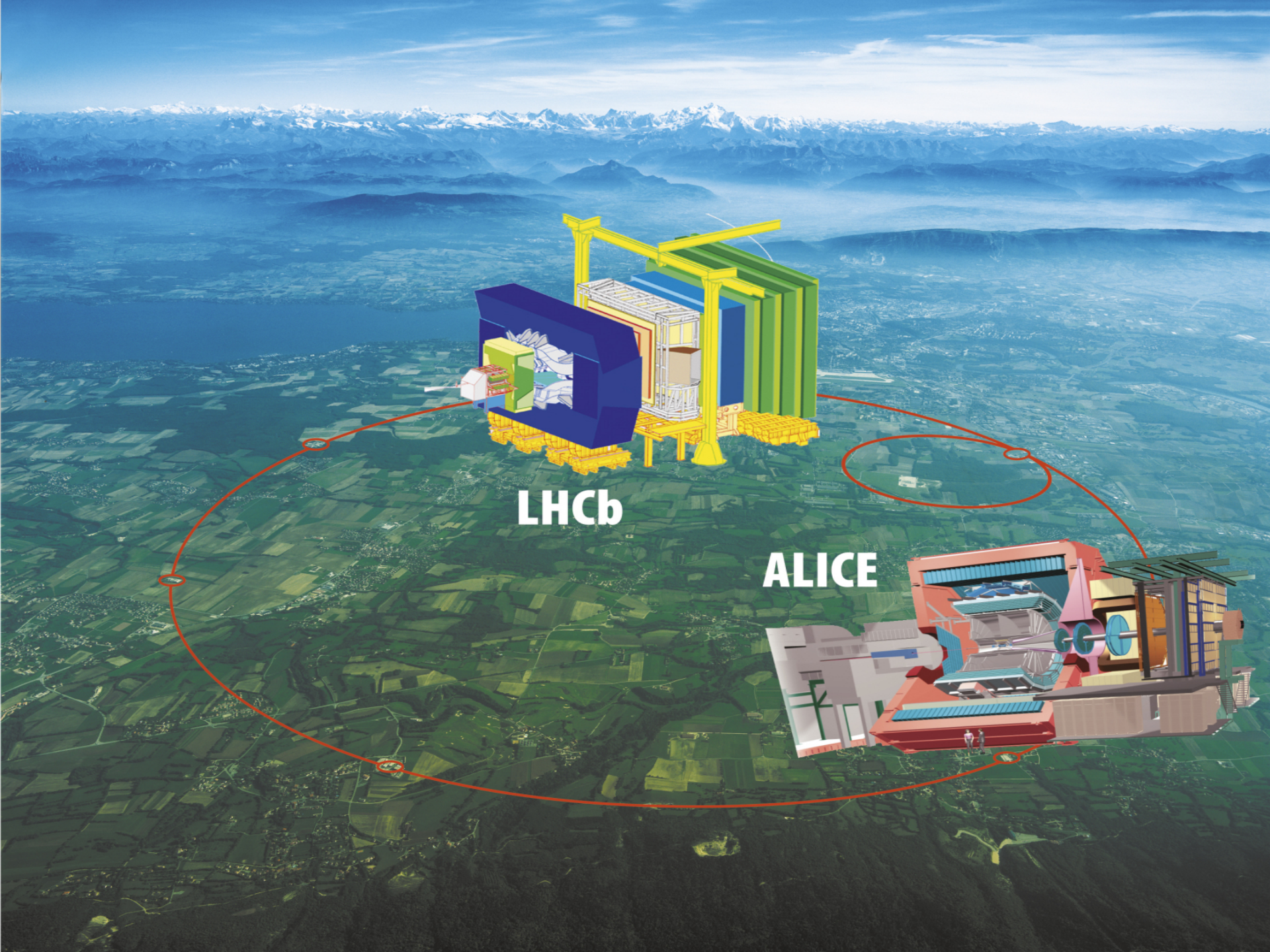
CERN – in a Nutshell

- CERN = Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire
- Is the largest research facility for particle physics world wide
- Is located in Switzerland, in Meyrin close by Geneva
- It has 22 member states from Europe with others associated
- ~ 3300 employees and about 13500 guest scientists
- The annual budget is about 750 million Euro
- The facility has 3 accelerators, PS, SPS and the LHC




LHCb
ATLAS
CERN Meyrin
CERN Prévessin
SPS 7 km
SUISSE
FRANCE
CMS
LHC 27 km


ATLAS
CMS


LHCb
ALICE

ROOT - Einleitung

ROOT

- Framework zum Prozessieren grosser Datenmengen
  - Data @ LHC: > 10 PetaByte / Jahr und Experiment
  - Selektion von wenigen Ereignissen aus 10^{12} Kandidaten
- stellt statistische Analyse Algorithmen zur Verfügung
- mathematische Bibliothek mit nicht trivialen und optimierten Funktionen
- Multivariante Analyse Werkzeuge und neuronale Netze
- Werkzeug zur Visualisierung von Daten und Experimentgeometrie
- Interface zur Simulation von physikalischen Ereignissen in Detektoren
- Plattform für das parallele Bearbeiten von Ereignissen (PROOF)
- Implementiert auf unterschiedlichen Betriebssystemen
  Linux, MacOS X, Windows

RootInstall.pdf

ROOT - Start

ROOT setup: Installationspfade von ROOT müssen den environment variablen $PATH und $LD_LIBRARY_PATH hinzugefügt werden

```
export ROOTSYS=/cern/root
export PATH=.:$PATH:$ROOTSYS/bin
export LD_LIBRARY_PATH=$LD_LIBRARY_PATH:$ROOTSYS/lib
```

Check: `echo $PATH`
`echo $LD_LIBRARY_PATH`

Im CIP Pool bitte ausführen:

```
$> source setroot.sh
```

ROOT startup im Terminal Fenster mit

```
$> root
root [0] _
root [1] .?
root [2] .q
root [3] qqqqq
```

ROOT history:
`$HOME/.root_hist`

- root prompt versteht C++ mit dem Interpreter CINT (V5.xx) / CLing (V6.xx)
  Python binding vorhanden
  Benutzen Sie die keys ⇧ ⇩ um Befehle erneut zu verwenden
- einfache Benutzung als Taschenrechner auch mit definierten Funktionen
- Darstellen von Funktionen

```
root [4] TF1 *f1 = new TF1("f1","[0]*sin([1]*x)/x",0.,10.);
root [5] f1->SetParameter(0,1); f1->SetParameter(1,1);
root [6] f1->Draw();
```

ROOT – as Calculator

```
marks@jma:~> root
   ------------------------------------------------------------------
  | Welcome to ROOT 6.06/02                        http://root.cern.ch |
  |                                  (c) 1995-2014, The ROOT Team     |
  | Built for linuxx8664gcc                                           |
  | From heads/master@v6-07-02-437-gb06340c, Mar 02 2016, 19:01:57    |
  | Try '.help', '.demo', '.license', '.credits', '.quit'/'.q'        |
   ------------------------------------------------------------------

root [0] gROOT->GetVersion()
(const char *) "6.06/02"
root [1] double x=.5
(double) 0.500000
root [2] int N=30 ; double gs = 0 ;
root [3] for(int i=0;i<N;i++) gs+=TMath::Power(x,i)
root [4] TMath::Abs(gs - (1-TMath::Power(x,N-1))/(1-x))
(Double_t) 1.86265e-09
root [5] double val = 0.992 ;
root [6] sin(val)
(double) 0.837122
root [7] TMath::Pi()
(Double_t) 3.14159
root [8] .!pwd
/local/home/marks
root [9] .!whoami
marks
root [10]
```

Get functions from TMath:
`TMath::function`

Execute system commands:
`.!<unix command>`

ROOT – as Calculator

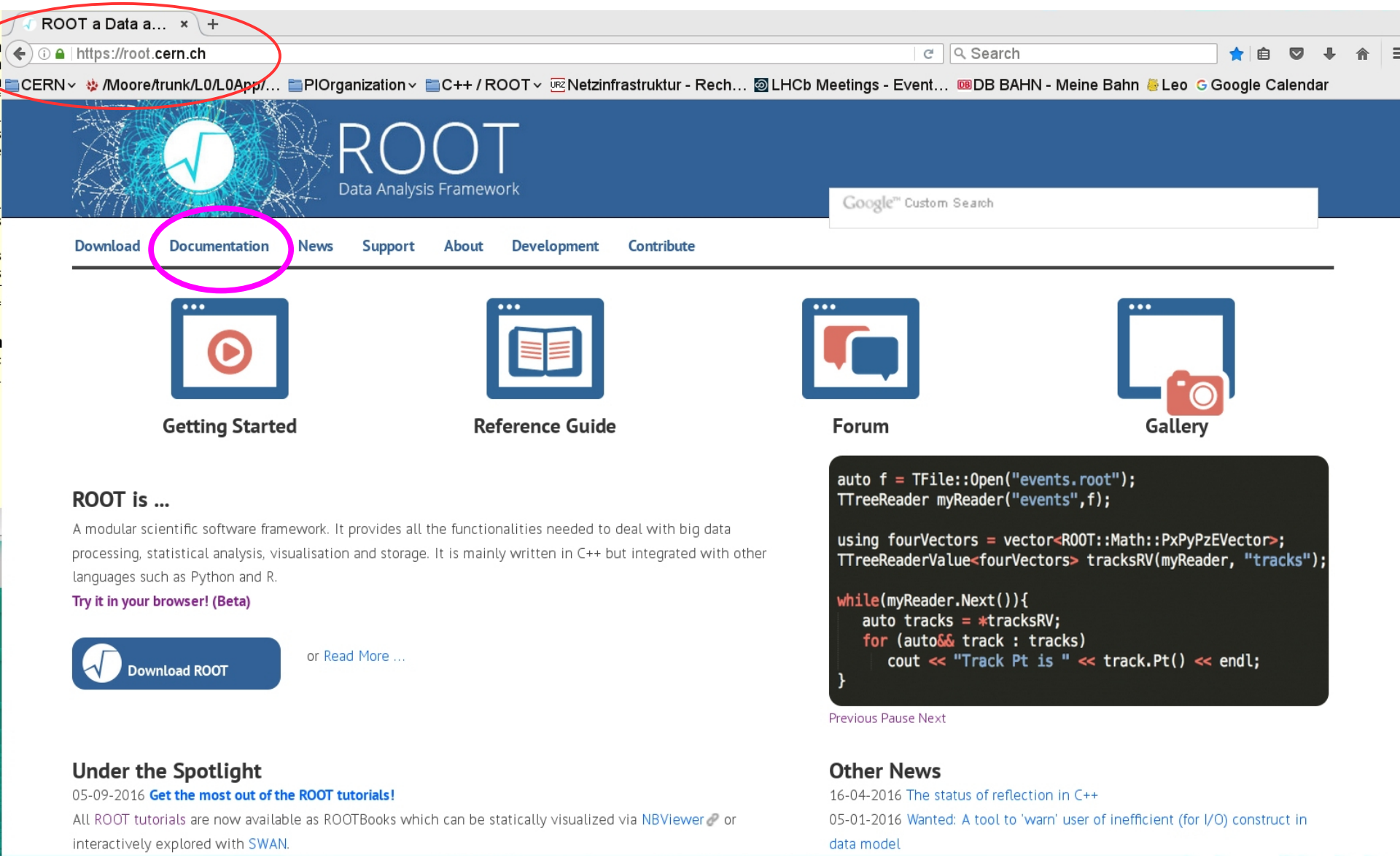
```
marks@jma:~> root
   ------------------------------------------------------------------
  | Welcome to ROOT 6.06/06                        http://root.cern.ch |
  |                                      (c) 1995-2016, The ROOT Team |
  | Built for linuxx8664gcc                                           |
  | From heads/v6-06-00-patches@v6-06-04-66-gb9c1d82, Jul 06 2016, 18:28:55 |
  | Try '.help', '.demo', '.license', '.credits', '.quit'/'.q'        |
   ------------------------------------------------------------------

root [0] TVector3 a(6.,10,40);
root [1] TVector3 b(1.,1,40);
root [2] TVector3 c = a + b ;
root [3] TVector3 d = a.Cross(b);
root [4] double s = a.Dot(b);
root [5] c(0)
(Double_t) 7.00000
root [6] c(1)
(Double_t) 11.0000
root [7] c(2)
(Double_t) 80.0000
root [8] a.Angle(b)
(Double_t) 0.249542
root [9] aperp = a.Orthogonal();
root [10] e = aperp.Unit();
root [11] a.RotateY(TMath::Pi());
root [12] a.Rotate(TMath::Pi()/4, c);
root [13] a(0)
(Double_t) -16.0374
root [14] a(1)
(Double_t) 3.79044
root [15] a(2)
(Double_t) -38.2679
```

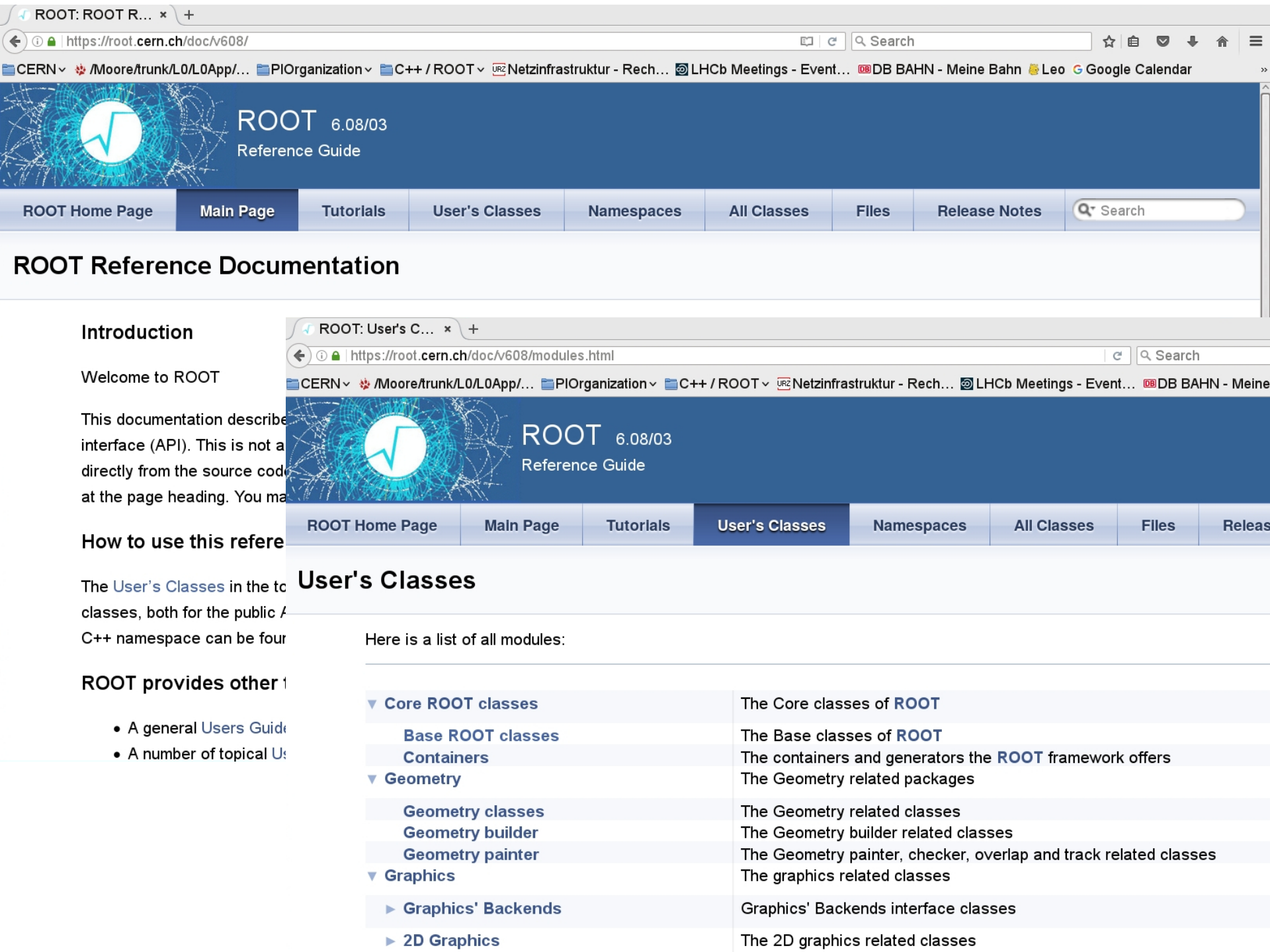
Vektor Rechnung mit dem C++ Interpreter in ROOT

Offensichtlich benutzen wir die Klasse `TVector3`. Woher wissen wir welche Methoden implementiert sind?

```
root[16] .class TVector3
```

ROOT – Dokumentation




ROOT: ROOT R...
https://root.cern.ch/doc/v608/
Search
CERN
/Moore/trunk/L0/L0App/...
PlOrganization
C++ / ROOT
Netzinfrastruktur - Rech...
LHCb Meetings - Event...
DB BAHN - Meine Bahn
Leo
Google Calendar
ROOT 6.08/03
Reference Guide
ROOT Home Page
Main Page
Tutorials
User's Classes
Namespaces
All Classes
Files
Release Notes
Search
ROOT Reference Documentation
Introduction
Welcome to ROOT
This documentation describe
interface (API). This is not a
directly from the source cod
at the page heading. You ma
How to use this refere
The User's Classes in the to
classes, both for the public A
C++ namespace can be four
ROOT provides other
A general Users Guid
A number of topical Us
ROOT: User's C...
https://root.cern.ch/doc/v608/modules.html
Search
CERN
/Moore/trunk/L0/L0App/...
PlOrganization
C++ / ROOT
Netzinfrastruktur - Rech...
LHCb Meetings - Event...
DB BAHN - Meine
ROOT 6.08/03
Reference Guide
ROOT Home Page
Main Page
Tutorials
User's Classes
Namespaces
All Classes
Files
Releas
User's Classes
Here is a list of all modules:
Core ROOT classes
The Core classes of ROOT
Base ROOT classes
The Base classes of ROOT
Containers
The containers and generators the ROOT framework offers
Geometry
The Geometry related packages
Geometry classes
The Geometry related classes
Geometry builder
The Geometry builder related classes
Geometry painter
The Geometry painter, checker, overlap and track related classes
Graphics
The graphics related classes
Graphics' Backends
Graphics' Backends interface classes
2D Graphics
The 2D graphics related classes

Reference Guide

ROOT Home Page | Main Page | Tutorials | User's Classes | Namespaces | All Classes | Files | Release Notes | Search

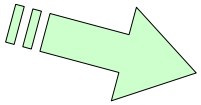
Class List | Class Index | Class Hierarchy | Class Members

Class List

Here are the classes, structs, unions

- N BidirMMapPipe_impl
- N cling
- N Memstat
- N PyROOT
- N Rgl
- N RooStats
  - N HistFactory
    - C AcceptanceRegion
    - C AsymptoticCalculator
    - C BayesianCalculator

ROOT Class Index



ROOT source code

ROOT: hist/spec… × +

https://root.cern.ch/doc/v608/TSpectrum_8cxx_source.html

CERN | /Moore/trunk/L0/L0App/… | PlOrganization | C++ / ROOT | Netzinfrastruktur - Rech… | LHCb Meetings - Event… | DB BAH

ROOT 6.08/03
Reference Guide

ROOT Home Page | Main Page | Tutorials | User's Classes | Namespaces | All Classes | Files

File List | File Members

hist | spectrum | src

TSpectrum.cxx

Go to the documentation of this file.

```
1  // @(#)root/spectrum:$Id$
2  // Author: Miroslav Morhac   27/05/99
3
4  #include "TSpectrum.h"
5  #include "TPolyMarker.h"
6  #include "TVirtualPad.h"
7  #include "TList.h"
8  #include "TH1.h"
9  #include "TMath.h"
10
11 /** \class TSpectrum
12     \ingroup Spectrum
13     \brief Advanced Spectra Processing
                                    hac
                                    nced spectra processing functions for:
17
18  -   One-dimensional background estimation
19  -   One-dimensional smoothing
20  -   One-dimensional deconvolution
21  -   One-dimensional peak search
22
```

ROOT - Start

Graphische Darstellung von Daten aus einem File

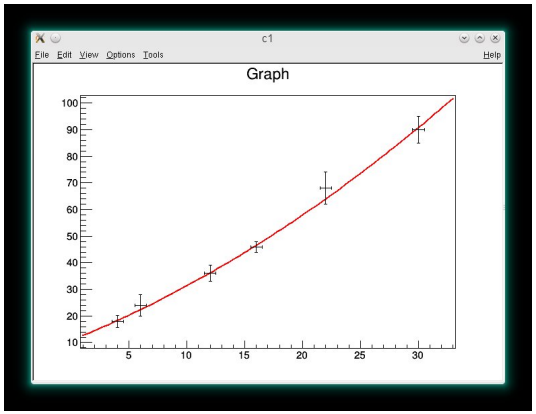
```
$> root
root [0] TGraphErrors *gr = new TGraphErrors("myFile.txt");
root [1] gr->SetTitle("myTitle;xAxis;yAxis");
root [2] gr->Draw("AP");
```

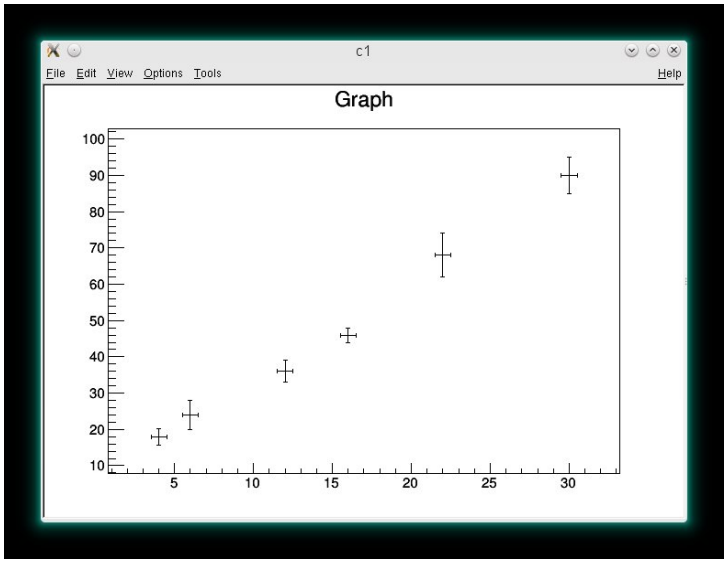
Draw **A**xis and **P**oints

myFile.txt :

```
4    18   0.5  2.3
6    24   0.5  4.1
12   36   0.5  3.0
16   46   0.5  2.0
22   68   0.5  6.0
30   90   0.5  5.0
```

- Graphik kann modifiziert werden:
  - Symbole
  - Achsenbeschriftung / Tick marks
  - beliebiger Text
- Als root file speichern zur weiteren Bearbeitung
- Parameter anpassen mit dem
  Fit Panel unter dem Menue „Tools“





Wir wollen den ROOT Interpreter und die ROOT Klassen verwenden, um das Rechnen mit Vektoren zu demonstrieren und ausserdem Funktionen darzustellen.

<u>Arbeitsvorschlag:</u>

- Bestimmen Sie die Summe $\sum_{k=1}^{N} = \frac{x^k}{k}$ für N=10 und x = 3.

- Welche Methoden stehen für `TVector3` und `TLorentzVector` zur Verfügung

- Benutzen Sie die Klasse `TLorentzVector` um die invariante Masse der Vierer-vektoren `u(3.,10.,40.,10.)` und `v(1.,0.,10.,3.)` zu bestimmen. Bestimmen Sie die transversale Komponente des Summenvektors von u und v.

- Erzeugen Sie ein Text File mit gedachten Messungen und benutzen Sie die Klasse `TGraphErrors("myFile.txt")` zur Darstellung. Probieren Sie die Fit Funktionalität aus.

ROOT - Start

Ausführung von Programmen

```
$> root
root [0] .x myMacro.C(2,2)
```

- File myMacro.C wird von CLing interpretiert und ausgeführt

```
$> root
root [0] .x myMacro.C+(2,2)
root [1] myMacro(2,2)
```

myMacro.C:

```
int myMacro(int a, int b)
{
   int s = a + b ;
   return s ;
}
```

- File myMacro.C wird mit ACLiC kompiliert und es wird eine shared library erzeugt myMacro.so
  - system compiler wird benutzt
  - das File wird nur kompiliert, wenn es geändert wurde.
- CINT/CLing versus compiled C++
  - Interpreter → rapid prototyping
  - Compiled code → Syntax check, schneller bei der Ausführung

ROOT - Start

Ausführung von Programmen

- Gemeinsames Ausführen von ROOT und C++ code

```
$> g++ -o throwDice throwDice.cc  `root-config --cflags --glibs`
$> ./throwDice 3
Dice 1: 3
Dice 2: 4
Dice 3: 4
```

Programm wird in der shell unter Hinzufügen der ROOT spezifischen flags kompiliert

`command`: command wird ausgefuehrt
-o FileName : FileName des Programms

```
$> root
root [0] .x throwDice.cc(3)
Dice 1: 5
Dice 2: 4
Dice 3: 2
```

Programm wird in ROOT von CLing interpretiert

```
root [1] .x throwDice.cc+(3)
root [2] throwDice(3)
Dice 1: 2
Dice 2: 2
Dice 3: 2
```

Programm wird in ROOT mit ACLiC kompiliert und eine shared library gebaut, es kann dann in ROOT ausgeführt werden

File Edit Options Buffers Tools C++ Help

Save Undo

```
# include <cstdlib>
# include <iostream>
# include "TRandom3.h"

using namespace std;

# ifndef __CINT__  // the following code will be invisible for CINT interpreter
int rollDice();
void throwDice (int NDice);

int main(int argc, char* argv[])
{
  throwDice (atoi(argv[1])) ;
  return 0 ;
}
# endif   // end ignore

void throwDice (int NDice) {
  for (int I = 1 ; I <= NDice; I++)
     cout << "Dice " << I << ": " << rollDice() << endl;
  return ;
}
int rollDice() {
   UInt_t MaxInt = 6 ;
   TRandom3 *R = new TRandom3();
   R->SetSeed(0);  // set seed to machine clock
   UInt_t NRnd  = R->Integer(MaxInt) ;
   int roll = static_cast <int> (NRnd) + 1 ;
   return roll ;
}
```

-:--- **throwDice.cc** Top (4,0) (C++/l Abbrev)

throwDice.cc

https://root.cern.ch/doc/v608/classTRandom3.html

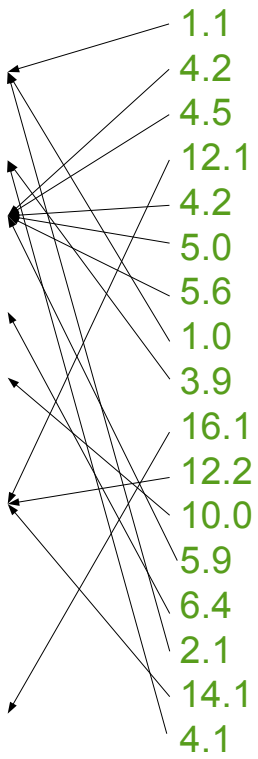
Arbeitsvorschlag: Können Sie das Programm so ändern, dass es bevorzugt 3 würfelt.

ROOT - Histogramme

Histogramm: In Abschnitte geteiltes Diagramm bezüglich einer Variablen, in das die Anzahl der Werte für jeden Abschnitt eingetragen wird

$0 \leq x < 18$

0	Underflow	
1	0-2	3
⋮	2-4	2
	4-6	5
	6-8	1
	8-10	1
	10-12	0
	12-14	3
	14-16	0
9	16-18	1
10	Overflow	



- Histogramm Klassen in ROOT:
  TH1F, TH1D (1 dimensional)
  TH2F, TH2D (2 dimemsional)
- Benutzung:
  - Initialisieren
  - Variable füllen
  - Graphische Darstellung und Bearbeitung
  - Resultate in einem ROOT File speichern

Mean

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

Standard Deviation

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\left[\left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2\right) - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2\right]}$$

Mean +/- Error
Standard Deviation
Skewness
Curtosis

Skewness

$$S = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_i - \bar{x}}{s}\right)^3$$

Curtosis

$$C = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_i - \bar{x}}{s}\right)^4$$

ROOT - Histogramme

Histogramm: In Abschnitte geteiltes Diagramm bezüglich einer Variablen, in das die Anzahl der Werte für jeden Abschnitt eingetragen wird

- Beispiel Macro der Histogramm Klassen in ROOT

myHisto.C

  - Initialisieren

```
TH1F *h = new TH1F ("myhist","Altersverteilung",60,0.,60.);
```

pointer auf das TH1F Objekt h | Histogramm Name | Titel | Anzahl der Bins | Grenzen

  - Variable füllen

```
h->Fill(age,weight=1.);
```

  - Graphische Darstellung und Bearbeitung

```
h->Draw("Options");
Options = "","E","SAME","C","L"
```

Fehlerbalken | in den gleichen Plot | glatte Kurve | Line

  - Resultate in einem ROOT File speichern

```
TFile outFile ("myFile.root","RECREATE");
```
Outputfile öffnen

```
h→Write();
```
Histogramm schreiben

```
outFile.Close();
```
Outputfile schließen

ROOT - Histogramme

Histogramm: In Abschnitte geteiltes Diagramm bezüglich einer Variablen, in das die Anzahl der Werte für jeden Abschnitt eingetragen wird

- Ausführen des Beispiel Macros und Ansehen des Histogramms myHisto.C

```
$> root myHisto.C
root [0]
Processing myHisto.C...
Histogram filled with 20 entries
root [0] .q
$> ls altersverteilung.root
altersverteilung.root
$> root altersverteilung.root
Root [0] TBrowser T
```

Programm wird in ROOT von CLing interpretiert

Enthält ein ROOT file mit Histogramm

Mit dem Browser läßt sich das ROOT file ansehen und das Histogramm darstellen.

File Edit Options Buffers Tools C++ Help

Save Undo

```
# include <iostream>
# include <TRandom3.h>
# include <TFile.h>
# include <TH1.h>

using namespace std;

void myHisto() {
   int NumberParticipants = 20 ;
   Double_t averageAge= 20. , sigmaAge = 1.0 ;
   Double_t age;

   TRandom3 *R = new TRandom3();
   R->SetSeed(0);  // set seed to machine clock

   TH1F *h = new TH1F ("myhist","Altersverteilung",,0.,60.);

   for (int I = 0 ; I < NumberParticipants ; I++) {
       age = R->Gaus(averageAge,sigmaAge) ;
       h->Fill(age);
   }

   cout << "Histogram filled with "<< NumberParticipants<< " entries" << endl;

   TFile outFile ("altersverteilung.root","RECREATE");
   h->Write();
   outFile.Close();

   return ;
}
```

-:--- **myHisto.C** Top (5,0) (C++/l Abbrev)

myHisto.C

ROOT - Histogramme

- Graphische Darstellung im Programm

  Die graphische Ausgabe von ROOT wird in einem “Canvas“ dargestellt, das vom Displaymanager kontrolliert wird. Es kann in mehrere Canvas Fenster geschrieben werden. Ein Canvas kann in Unterbereiche geteilt werden.

```
TCanvas *C = new TCanvas("myC","Pad Histogram",0,0,800,600);
```

pointer auf das TCanvas Objekt C | Canvas Name | Titel | Pixel Koordinaten von oben links | Breite / Höhe des Fensters

```
C->Divide(2,2);
```

Erzeugen eines Pads mit 2x2 Subfeldern zum Darstellen von Plots

```
C->cd(1);
h->DrawClone();
```

Darstellen des Histogramms h und erzeugen einer Kopie

```
C->cd(2);
h->Scale(1./NumEntries);
h->Draw();
```

Normieren des Histogramms h auf die Fläche 1

```
C->Write();
```

Schreiben des Canvas in das ROOT file

ROOT - Histogramme

- Histogramm Ergebnisse im Programm weiter verwenden und setzen

```
Double_t binContent = h->GetBinContent(22);
Double_t error = h->GetBinError(22);
```

Get Inhalt Bin 22

```
Double_t NumEntries = h->GetEntries();
Int_t MaxBin = h->GetMaximumBin();
Double_t histoMean = h->GetMean();
Double_t histoMeanError = h->GetMeanError();

TAxis *xaxis = h->GetXaxis();
Double_t binCenter = xaxis->GetBinCenter(22);

h->GetXaxis()->SetTitle("X axis title");
h->GetYaxis()->SetTitle("Y axis title");

h->SetTitle("Histogram title;  Another X title Axis");
```

- Histogramm speichern und lesen

```
TFile f("histos.root", "new")
h->Write();
```

Schreiben des Histograms in das ROOT file

```
TFile f("histos.root");
TH1F *h = (TH1F*)f.Get("hgaus");
```

Lesen des Histograms

ROOT - Histogramme

- Operationen mit Histogramm

myHistoExtended.C

```
TH1F *h = new TH1F ("myhist","Altersverteilung",60,0.,60.);
h->GetXaxis()->SetTitle("age[years]");
h->Sumw2(); // get access to proper error treatment

TH1F *hbck = new TH1F ("hbck","Untergrund
                                Altersverteilung",60,0.,60.);
hbck->GetXaxis()->SetTitle("age[years]");
hbck->Sumw2();

TH1F *hsum  =(TH1F*)h->Clone();
hsum->SetName("hsum");
hsum->Add(hbck,1.0);

TH1F *h3 = new TH1F ("h3","h1+h2",nBins,xMin,xMax);
h3->Add(h1,h2);
h3->Add(h1,h2,1.,-1.);
```

Erzeugen einer Kopie des Histogramms h

Addieren von hbck zu h mit Skalenfaktor 1

Addieren von 2 Histogrammen

Subtrahieren von 2 Histogrammen

- Histogramme h1,h2,h3 haben das gleiche binning!
- Sonst müssen Bingrenzen erhalten bleiben

ROOT - Histogramme

myHistoExtended.C

- Histogramme in 2D

```
TH2F *h2D = new TH2F("h2D", "Alter vs Groesse",
                                          60,0.,60.0,50,140,190);
h2D->GetXaxis()->SetTitle("age[years]");
h2D->GetYaxis()->SetTitle("height[cm]");
h2D->Sumw2();
```

Optionen zur Darstellung

```
TH2F *h = new TH2F("h","2D Gauss",40,-4.,4.,40,-4.,4.);
for(int j=0; j<10000;j++){
   double x = R->Gauss(0,1);
   double y = R->Gauss(1,2);
   h->Fill(x,y);
}
```

Gauss Verteilung, Mean=0 und Breite =1

Gauss Verteilung, Mean=1 und Breite =2

```
h->Draw("COLZ");
h->Draw("CONTZ");
h->Draw("LEGO");
```

Farbänderungen entsprechend der Einträge in z

Contour Plot bezüglich z

Lego Plot Entries in z

ROOT - Histogramme

- Histogramme in 2D

```
TH2F *h2D = new TH2F("h2D", "Alter vs Groesse",
                                    60,0.,60.0,50,140,190);
```

Projektionen auf die Achsen erzeugen 1D Histogramme

```
TH1F *projX =  h2D->ProjectionX("MyProjX",1,-1);
TH1F *projY =  h2D->ProjectionY("MyProjY",1,nBin);
```

Binbereich: -1 =: kopieren bis zum Ende

Profil von 2D Histogrammen: Mittelwerte in Bins bezüglich einer Koordinate

```
TProfile *profX =  h2D->ProfileX("MyProfileX",1,-1);
TProfile *profY =  h2D->ProfileY("MyProfileY",1,-1);
```

Binbereich in y

Hier wird die Bin Grösse des 2D Histogramms verwendet. Für die Mittelwertbildung werden nur die Bin Mitten benutzt! Daher haben wir nur eine Näherung.

TProfile: bilde Mittelwerte von y in Bins von x

```
TProfile *prof = new TProfile("prof","Title",
                                    100,0.,60.0,140,190);

prof->Fill(x,y);
```

Bins von x. x Bereich y Bereich

Mittelwert: y Fehler: $rms/\sqrt{n}$

Datenanalyse – erste Schritte

Wir wollen nun beispielhaft eine Messung analysieren, bei der das Ausgangssignal eines Verstärkers wiederholt gemessen wird. Der Messbereich ist [0,450]. Gleichzeitig wird mit jeder Messung die Raumtemperatur aufgezeichnet. Es werden 2 Textfiles geschrieben, signal.txt und temperature.txt

analysis_frame.cc

Arbeitsvorschlag:

- Schreiben Sie ein ROOT Macro, das das Verstärkersignal darstellt. Bestimmen Sie die Anzahl der Messungen, den Mittelwert und den Fehler und die Standard-abweichung. Ist das Signal gaussverteilt? Welcher Bereich ist als Signalbereich sinnvoll? Mit welcher Auflösung wird das Signal gemessen?
- Schätzen Sie den Anteil der Untergrundeinträge im Signalbereich ab?
- Gibt es eine Korrelation zwischen Signal und Temperatur. Was bedeutet das für die Auflösung der Signalverteilung. Wie kann man die Temperaturabhängigkeit des Signals korrigieren? Wie groß ist dann die Auflösung?
- Subtrahieren Sie die Untergrundverteilung von der korrigierten Signalverteilung. Wie groß ist nun die Auflösung?

analysis.cc

Datenanalyse – erste Schritte

Wir wollen nun beispielhaft eine Messung analysieren, bei der das Ausgangssignal eines Verstärkers wiederholt gemessen wird. Der Messbereich ist [0,450]. Gleichzeitig wird mit jeder Messung die Raumtemperatur aufgezeichnet. Es werden 2 Textfiles geschrieben, signal.txt und temperature.txt

Lösungsschritte:

- Öffnen der Textfiles mit 2 Eingabeströmen
- Lesen jeweils bis EOF und speichern als vector <double>
- 2 1D Histogramme mit Signal und Temperatur, 1 2D Histogramm Temperatur gegen Signal auftragen.
- Interaktiv Gauss Anpassung, Auflösung = Sigma / Mean
- Integriere Signal im Bereich [350 – 450] (nur Untergrund). Da der Untergrund gleichverteilt ist, kann damit auf den Untergrund im Signalbereich geschlossen werden.
- Im 2D Plot ist klar eine Korrelation zwischen Signal und Temperatur sichtbar. Die Auflösung ist dadurch überschätzt.
- Bestimme das mittlere Signal in 4 Bins der Temperatur (interaktive Gauss Anpassung). Daraus kann die Änderung mit der Temperatur bestimmt werden.
- Diese Änderung kann durch die Umrechnung des Signals auf T=19 Grad korrigiert werden. Die korrigierten Werten werden als vector gespeichert und histogrammiert.
- Damit kann die Auflösung bestimmt werden.
- Wir kennen die Zahl der Untergrundereignisse im gesamten Signal Bereich. Erzeuge ein Untergrund Histogramm in dem Zufallswerte gefüllt werden. Das Untergrund Histogramm kann man abziehen.

ROOT - Histogramme

Im Analyse Programm müssen oft viele Histogramme einer Messgrösse erzeugt werden und Mittelwerte / Fehler in Bereichen von anderen Variablen ermittelt und weiter verwendet werden. Im folgenden werden einige häufig verwendbare Anweisungsblöcke gezeigt.

Variable Anzahl von Histogrammen einer Messgrösse in definierbaren Bereichen einer anderen Grösse

```
char name[128],title[128];
const int nHisto = 6 ;
double Range[nHisto+1] ={0.,1.5,2.9,3.5,5.0,7.0,9.5};
TH1F *hisSig[nHisto];
for(int j=0; j<nHisto;j++){
sprintf(name,"range%i_%i",(int)Range[j],(int)Range[j+1]);
sprintf(title,"Range: %5.1f<Range<%5.1f",Range[j],Range[j+1]);
hisSig[j] = new TH1F(name,title,nBin,Range[j],Range[j+1]); }

for (int I = 0; I < nEvent; I++){
    for (int j = 0; j < nHisto ; j++) {
      if(S[I] >= Range[j] && S[I] < Range[j+1])
                                        hisSig[j]->Fill(S[I]);}
}
```

definiere Selektionsbereich

array mit Histogramm Zeigern

dynamisches Erzeugen der Histogramme

Füllen der Histogramme in Selektionsbereichen

ROOT - Histogramme

Bestimmung der Mittelwerte/Fehler und rms von Histogrammen

Fortsetzung der obigen Anweisungen

```
double S_mean[nHisto], S_meanError[nHisto], S_rms[nHisto];
for(int j=0; j<nHisto;j++){
  S_mean[j] = hisSig[j]→GetMean();
  S_meanError[j] = hisSig[j]→GetMeanError();
  S_rms[j] =  hisSig[j]→GetStdDev();
}
```

Methoden um die Histogramm-eigenschaften auszulesen

Wenn die Messungen gaussverteilt sind, lassen sich Mittelwert und Fehler auch durch die Anpassung eines Gauss Models an die Histogramme bestimmen.

```
double Fit_mean[nHisto],Fit_meanErr[nHisto],Fit_sigma[nHisto];
for(int j=0; j<nHisto;j++){

 hisSig[j]→Fit("gaus","0","",Range[j],Range[j+1]);

 Fit_mean[j]=hisSig[j]→GetFunction("gaus")->GetParameter(1);
 Fit_sigma[j]=hisSig[j]→GetFunction("gaus")->GetParameter(2);
 Fit_meanErr[j]=hisSig[j]→GetFunction("gaus")->GetParError(1);}
```

Anpassung des Gauss Models an die Histogramme

(Details im folgenden)

ROOT – Graphische Darstellung

Drei Klassen (TGraph, TGraphErrors, TGraphAsymmErrors) können in ROOT zur graphischen Darstellung von Messungen verwendet werden. Grundsätzlich werden die Zahl der Messpunkte und arrays mit den darzustellenden Werten gegeben.

```
const int nHisto = 6 ;
double Range[nHisto+1] ={0.,1.5,2.9,3.5,5.0,7.0,9.5};
// Werte der Gauss Anpassung
double Mean[nHisto], MeanErr[nHisto];
double RangeBin[nHisto], RangeBinErr[nHisto];
for(int j=0; j<nHisto;j++){
  RangeBin[j] = Range[j]+(Range[j+1]-Range[j])/2. ;
  RangeBinErr[j] = (Range[j+1]-Range[j])/2. ;
}
TGraphErrors *grRangeDep = new
       TgraphErrors(nHisto,RangeBin,Mean,RangeBinErr,MeanErr);
// Draw onto Canvas
  TH1F * frame = gPad->DrawFrame(xMin,yMin,xMax,yMax);
  frame->SetYTitle("Signal from fit[myUnit]");
  frame->Draw("");
  grRangeDep→SetMarkerColor(2);
  grRangeDep→SetMarkerStyle(21);
  grRangeDep→Draw("P");
```

Zeichnen des festen Rahmens

Zeichnen des Graphen

ROOT – Darstellung Histogramm

Mit den folgenden Methoden läßt sich die Histogramm Darstellung modifizieren.

```
h→SetLineColor(kRed);
h→SetTitle("my Title");
h→SetXTitle("my x Axis");
h→SetAxisRange(10.,25.);
h→SetMarkerColor(kBlue);
h→SetMarkerSize(1.);
h→SetMarkerStyle(20);
h→SetFillColor(kGreen);
h→SetFillStyle(3004);
h→Daw("e");
h→Print();
```

Linienfarbe auf rot setzen
Titel setzen
Achsenbeschriftung
Bereich ändern
Symbolfarbe auf blau setzen
Symbolgröße setzen
Symbol setzen
Histogrammfarbe
Diagonale Linien unter Histogramm
Zeichnen, Einträge mit Fehler
Info am Bildschirm

Nach Änderungen mit obigen Methoden muss das Histogramm erneut gezeichnet werden oder das Canvas muss einen update erhalten.

Datenanalyse – erste Schritte

Wir wollen nun beispielhaft eine Messung analysieren, bei der das Ausgangssignal eines Verstärkers wiederholt gemessen wird. Der Messbereich ist [0,450]. Gleichzeitig wird mit jeder Messung die Raumtemperatur aufgezeichnet. Es werden 2 Textfiles geschrieben, signal.txt und temperature.txt

Arbeitsvorschlag:

- Verwenden Sie bitte als Arbeitsbasis das Programm analysis_frame.cc

- Schreiben Sie ein ROOT Macro, das das mittlere Verstärkersignal in verschiedenen Temperaturbereichen darstellt. Verwenden Sie zunächst die Methoden von TProfile. Passen Sie ein Polynom 1. Ordnung an und lesen sie die Fit Parameter aus (gleiche Verwendung wie bei der Gauss Anpassung, statt "gaus" jedoch "pol1") Diese sollen zur Temperaturkorrektur benutzt werden

  analysis_1.cc

- Definieren Sie nun eigene nicht gleich große Temperaturbereiche und bestimmen Sie das mittlere Verstärkersignal mit einer Gauss Anpassung. Tragen Sie die Werte gegen die Temperatur auf. Wir wollen korrigierte und unkorrigierte mittlere Verstärkersignalwerte in der gleichen graphischen Darstellung haben. Passen Sie jeweils ein Polynom 1. Ordnung an.

  analysis_2.cc

Datenanalyse – erste Schritte

Wir wollen nun beispielhaft eine Messung analysieren, bei der das Ausgangssignal eines Verstärkers wiederholt gemessen wird. Der Messbereich ist [0,450]. Gleichzeitig wird mit jeder Messung die Raumtemperatur aufgezeichnet. Es werden 2 Textfiles geschrieben, signal.txt und temperature.txt

Lösungsschritte:

- Das Programm analysis_frame.cc stellt die Daten im vector Temperature und Signal zur Verfügung.
- Erzeuge ein 2D Histogramm Temperature vs Signal. Wir müssen hier ein sinnvolles Binning für die Temperatur wählen. Mit der Methode ProfileX erhalten wir ein TProfile Objekt.
- Das TProfile Objekt kann mit der Methode Fit verwendet werden.
- Direkte Verwendung der Methode TProfile. Wie beim 2D Histogramm wird es mit der Methode Fill gefüllt. Auf das TProfile Objekt kann ebenfalls Fit angewendet werden.
- Die Darstellung erfolgt in beiden Fällen mit Draw().
- Der Wert der Anpassung für die Steigung dient zur Temperaturkorrektur
- Für den 2. Teil wird ein array mit Temperaturbereichen definiert.
- Initialisiere ein Histogramm Zeiger array und instanziere die Histogramme
- Diese werden gefüllt und mit einem Gauss gefittet.
- Mittelwerte und Fehler des Fits werden in arrays geschrieben.
- Die Temperaturbins und die halbe Breite werden ebenfalls in ein array geschrieben.
- Darstellung mit TGraphErrors.

ROOT - Funktionsklassen

TF1 Objekte in ROOT definieren 1 D Funktionen in einem Intervall. Auf eingebaute Funktionen, Polynome, Gaussverteilung, …. haben wir mit der `TH1::Fit` Methode über die Angabe des Funktionsnamens zugegriffen

"gaus"	$f(x) = p_0 \cdot e^{-\frac{1}{2}(\frac{(x-p_1)}{p_2})^2}$
"expo"	$f(x) = e^{p_0+p_1 x}$
"polN" N=0-9	$f(x) = p_0 + p_1 x + p_2 x^2 + ... + p_n x^n$
"chebychevN" N=0-9	$f(x) = p_0 + p_1 x + p_2(2x^2 - 1) + ...$
"landau"	$p(x) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(x+e^{-x})}$
"gausn"	$f(x) = p_0 \cdot e^{-\frac{1}{2}(\frac{(x-p_1)}{p_2})^2/(p_2\sqrt{2\pi})}$

- Möglichkeiten zur Definition von Funktionen

  Die Instanzierung von TF1 Objekten in ROOT erfolgt über verschiedene Konstruktoren

  - Formeln sind definiert als Character string (TFormula) ohne Parameter

```
TF1 * f1 = new TF1("f1","exp(-1.0*x)*sin(10.0*x)",0.,5.0);
```

Funktion Funktionsbereich

ROOT - Funktionsklassen

- Möglichkeiten zur Definition von Funktionen

  - Formeln sind definiert als Character string (TFormula) mit Parameter

```
TF1 * f2 = new TF1("f2","[0]*exp([1]*x)*sin([2]*x)",0.,5.0);
f2->SetParameter(0,0.8);
f2->SetParameter(1,-1.0);
f2->SetParameter(2,9.0);
```

Funktion

Funktionsbereich

Parameter setzen

  - User definierte Funktionen (C++ code)

```
Double_t myFunction(Double_t *x , Double_t *par) {
  return (par[0]*x[0]*x[0]+par[1]*x[0]+par[2]) ;
}
```

  - User definierte Funktionen, Lambda Ausdruck (anonyme Funktion) (C++ code)

```
TF1 f1("f1","sin(x)",0,10);
TF1 f2("f2","cos(x)",0,10);
TF1 fsum("fs","[&](double *x, double *p){
                return p[0]*f1(x) + p[1]*f2(x); }",0,10,2);
```

Anzahl der Parameter

ROOT - Funktionsklassen

- TF1 Beispiel: C++ Funktionen mit Variablen und Parameter

```
// Macro myFunc.C
Double_t myfunction(Double_t *x, Double_t *par)
{
   Double_t xx =x[0];
   Double_t f = TMath::Abs(par[0]*sin(par[1]*xx)/xx);
   return f;
}
void myFunc()
{
   TF1 *f1 = new TF1("myFunc",myfunction,0,10,2);
   f1->SetParameters(2,1);
   f1->SetParNames("constant","coefficient");
   f1->Draw();
}
```

In der ROOT session

```
Root > .L myFunc.C
Root > myFunc();
```

ROOT - Funktionsklassen

- TF2 – 2D Funktionen

```
TF2 * f = new TF2("f","exp(-1.0*x)*sin(10.0*x)*cos(y)"
                                                ,0.,5.0,0.,6.3);
f->Draw("fsurf3")
```

- Mit Funktionen (TFn) können wir folgendes machen

Drawing	`f->Draw()`
Printing	`f->Print()`
Evaluate values	`f->Eval(1.7)`
Integration	`f->Integral(0.6,0.99)`
Differentiate	`f->Derivative(.2)`
Change line attributes	`f->SetLineColor(kRed)`
	`f->SetLineStyle(2)`
	`f->SetLineWidth(1)`
	….....

ROOT – Zufallszahlen

Bei der Modellierung von Prozessen spielen einem funktionalen Zusammenhang entsprechend verteilte Zufallszahlen eine große Rolle. In ROOT lassen sich Zufallszahlen mit verschiedenen Algorithmen generieren, TRandom1, TRandom2, und TRandom3 (Mersenne-Twister Algorithmus, lange Periode von 2**19937 -1, 45 ns pro call).

- Zufallszahlen in ROOT

Wir können gleichzeitig mehrere verschiedene Instanzen verwenden

```
#include <TRandom.h>
TRandom3 *R = new TRandom3();  // Instanzieren des Objektes
R→SetSeed(0);                  // set seed to machine clock,
                               // Zahl für feste Sequenz
Double_t MyRandom = R→Rndm();  // [0,1]Gleichvert. Zufallszahl
```

Weitere Mehtoden um Zufallszahlen gemäß von Verteilungen zu generieren:

```
UIint_t  i = R→Integer(iMax);     //[0,iMax] UInt_t Zufallszahl
Double_t x = R→Uniform(x1,x2);    // [x1,x2] Zufallszahl
Double_t x = R→Gaus(mean,sigma); //gaussverteilte Zufallszahl
Double_t x = R→Exp(tau);          //exponentielle Zufallszahl
Double_t x = R→Poisson(mean);    //poissonverteilte Zufallszahl
Double_t x = R→Landau(mpv,sigma);//landauverteilte Zufallszahl
Double_t x = R→Binomial(ntot,prob);//binomialvert. Zufallszahl
```

ROOT – Histogramme aus TF1

In ROOT lassen sich auch Histogramme mit Zufallszahlen füllen, die dem funktionalen Verlauf eines TF1 Objektes oder einem anderen Histogramm entsprechen.

- Histogramme mit Zufallszahlen aus TF1 Funktionen

  Es können sowohl die intern definierten Funktionen als auch beliebige TFN Funktionen zur Verteilung der Zufallszahlen verwendet werden.

```
TH1F *h = new TH1F ("myRandom","Histogramm from Landau",
                                                    100,0.,10.);
h→FillRandom("landau",10000);
```

Funktion Zahl der Einträge

Oder

```
TF1 * f2 = new TF1("f2","[0]*exp([1]*x)*sin([2]*x)",0.,5.0);
f2->SetParameter(0,0.8);
f2->SetParameter(1,-1.0);
f2→SetParameter(2,9.0);

h→FillRandom("f2",10000);
```

myFunc.C

ROOT – Histogramme aus TF1

- Histogramme mit Zufallszahlverteilung aus anderen Histogrammen

  Liegen Messungen in Form von Histogrammen vor, können auch Histogramme mit Zufallszahlverteilungen bezüglich der Messungen generiert werden.

```
TH1F *myMeasure=new TH1F("myMeasure","Gemessenes Histogramm",
                                                    100,0.,100.);
TH1F *mySim=new TH1F("mySim","Simuliertes Histogramm",
                                                    100,0.,100.);
mySim→FillRandom(&myMeasure, 10000);
```

ROOT – TFn und Zufallszahlen

- Verteilung von Zufallszahlen gemäß einer TFn Funktion

Um den Einfluß von funktionalen Abhängigkeiten in Messungen zu untersuchen, ist häufig eine Verwendung von Zufallszahlverteilungen nützlich. TRandom enthält vordefinierte Verteilungen, es lassen sich aber auch Zufallszahlen bezüglich definierter TFn Funktionen generieren.

```
TF1 * f1 = new TF1("f1","[0]*exp([1]*x)*sin([2]*x)",0.,5.0);
f1→SetParameter(0,0.8);
f1→SetParameter(1,-1.0);
f1→SetParameter(2,9.0);

TRandom3 *R = new TRandom3();
R->SetSeed(0);  // set seed to machine clock
for (int I = 0 ; I < 100 ; I++) {
    Double_t gaussSignal = R->Gaus(averageSignal,sigma) ;
    Double_t f1Signal = f1->GetRandom();
}
```

Funktions- und Parameterdefinition

Gaussverteilte Zufallszahlen mit Mittelwert und Sigma

Zufallszahlen verteilt wie f1

ROOT – TFn und Zufallszahlen

- Beispiel Maxwell-Bolzmann Geschwindigkeitsverteilung

myMaxwell.cc

Neben den in ROOT definierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen können wir beliebige Verteilungen erzeugen.

Funktionsdefinition

```
double maxwellfunc (double *x, double *p) {
  double xx = x[0];        //Definiere *x = x[0] zu xx
  double f = 4*Pi()*Power(Sqrt(p[0]/(2*Pi()*p[1]*p[2])),3)
             *xx*xx*Exp(-p[0]*xx*xx/(2*p[1]*p[2]));
  return f;
}
```

Parameter setzen

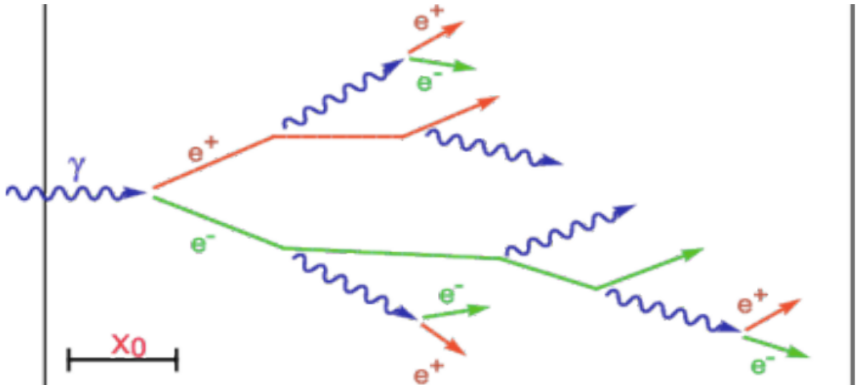
```
.........
  double k_B = 8.6173303e-5;      //Boltzmann Kostante in eV/K
  double m = 0.5109989461e-6;     //Masse eines Elektron in eV/c^2
  double T = 300.;                //Temperatur des Teilchensystems

  TF1 *f1 = new TF1("f1",maxwellfunc,0.,1000.,3);
  f1→SetParameters(m,k_B,T);
```

Funktion erzeugen

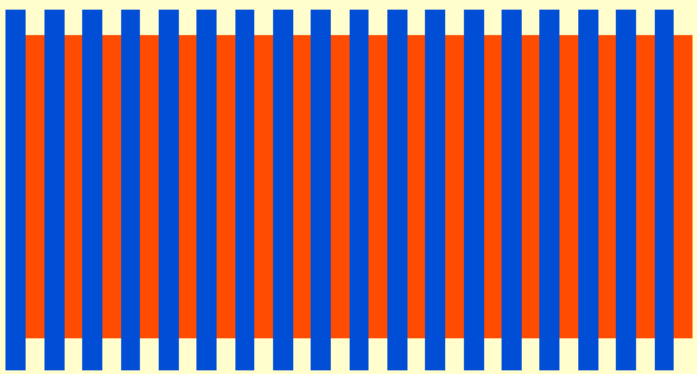
```
  TH1F *T300 = new TH1F("Maxwell Bolzmann T=300",3000,0.0,3000.0);
  T300→FillRandom("f1",5000);
.........
```

Zufallszahlen verteilt wie f1

Energiemessung von Photonen



Sampling Kalorimeter

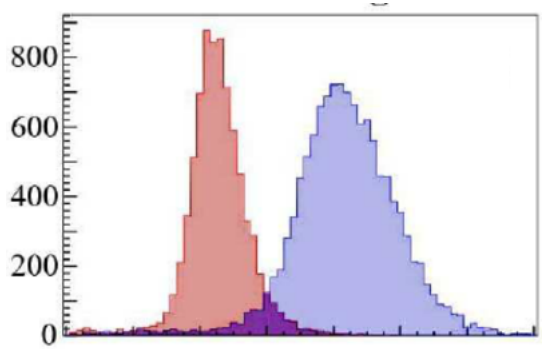


Homogene Kalorimeter

Beiträge zur Energieauflösung:

Sampling / Quantum Fluktuationen	$\sigma_s/E \sim \frac{a}{\sqrt{E}}$	$a = 10\%$
Elektronik Noise	$\sigma_N/E \sim \frac{b}{E}$	$b = 0.1\,GeV$
Struktur / Aufbau	$\sigma_c/E \sim c$	$c = 0.35\%$

$$\sigma_{tot}^2 = \sigma_s^2 + \sigma_N^2 + \sigma_c^2$$



Simulation von Verteilungen

Die Energieauflösung σ/E eines elektromagnetischen Kalorimeters zur Energiemessung von Photonen besteht aus 3 Anteilen mit verschiedenen Energieabhängigkeiten. Die gesamte Energieauflösung ist die quadratische Summe der einzelnen Anteile.

Arbeitsvorschlag:

- Schreiben Sie eine TF1 Funktion für sigma und eine für sigma/E als C++ Funktion. Zeichnen Sie beide in ein Canvas für 1-150 GeV.
- In das Canvas für Sigma/E soll der funktionale Verlauf der einzelnen Anteile eingezeichnet werden.
- Simulieren Sie die gemessene Kalorimeterenergie für 6 feste Energiewerte und tragen Sie die Werte jeweils in ein Histogramm ein. Pro Energiewert wollen wir 1000 Werte simulieren.

CaloResolution.C

ROOT – Input / Output

I/O ist für ein Datenanalyse Tool von großer Bedeutung. Mit ROOT lassen sich, im Gegensatz zu nativem C++, Objekte in Files schreiben.

Was wird gebraucht um Objekte in Files / Disks zu speichern (Serialization) ?

- Typ des Objekts → runtime type information (RTTI)
- Infos des Objektes (Typ, Größe, Member) → reflection
- Ort der Datenmember des Objektes im Speicher → introspection
- Lesen des Datenstroms aus dem Speicher auf die Disk → raw I/O
  → komplexe Aufgabe ohne native Unterstützung in C++.

Ziel: I/O mit einer Rate von einigen 10 PByte Daten / Jahr

ROOT verwendet ein komprimierendes maschinenunabhängiges binäres Format, das Daten und die Beschreibung (Dictionary in ROOT Files speichert. Die Files besitzen eine Directory Struktur. Das Dictionary mit reflection data aller Typen im Quellcode wird automatisch erzeugt, z.B. bei der Benutzung von ACLiC

```
Root[0]    .L myCode.C+
```

ROOT – Input / Output

Speichern von Objekten in Files mit ROOT

- Öffnen eines TFiles

```
TFile * f = Tfile::Open("myFile.root","RECREATE");
```

- Schreiben einer Instanz von `TObject`

```
object→Write("OptionalName");
```

mit „`"OptionalName"` oder `Tobject::GetName()`

- Schreiben eines beliebigen Objektes bei bekanntem dictionary

```
f→WriteObject(object,"Name");
```

TFile – Klasse zum Schreiben von ROOT Files


```
TFile * myFile = new Tfile ("myFile.root","NEW");
if ( myFile→IsOpen() ) cout << "File openend" << endl;
```

`myFile` wird Default für den gesamten I/O (setzt die globale Variable `gFile`)

```
myFile→Close();
```

```
delete myFile;
```

ROOT – Input / Output

TFile – Directory

```
root [0] TFile *f1 = new Tfile("AFile1.root","NEW");
root [1] gDirectory→pwd();            // das neue Tfile wird aktuelles directory
AFile1.root:/
root [2] f1→mkdir("myStuff");         //directory myStuff wird erzeugt
root [3] gDirectory→pwd();
AFile1.root:/
root [4] f1→cd("myStuff");            // wechsel in das directory myStuff
root [5] gDirectory→pwd();
Afile1.root:/myStuff
root [6] f1→GetCompressionFactor();   // wechsel in das directory myStuff
(float) 1.00000f
root [7] .ls
TDirectoryFile*         myStuff myStuff
root [8] gROOT→cd();                  // CLing wird aktuelles directory
root [9] gDirectory→pwd();
Rint:/
```

ROOT – Input / Output

TFile – Write/Read

```
root [10] TH1F*h=new TH1F("h","Interactive;X;Entries",100,-5,5);
root [11] h->FillRandom("gaus");      // create and fill histogramm h
root [12] f1→cd();                    // goto Tfile f1
root [13] h→Write();                  // write histogramm to File
root [14] gDirectory→ls("-d");        // content on disk
TFile**            AFile1.root
TFile*             Afile1.root
TDirectoryFile*    myStuff myStuff
KEY: TDirectoryFile myStuff;1
KEY: T H1F          h;1   Interactive
root [15] f1→GetCompressionFactor()   // wechsel in das directory myStuff
(float) 1.99421f
root [16] gDirectory→ls("-m");        // see content in memory
root [17] h→Draw();                   // zeichnen erzeugt ein Canvas
Info in <Tcanvas::MakeDefCanvas>:create default canvas with name c1
root [18] c1→Write();                 // Write Canvas to File

root [19] vector <int> p{2,5,7};                  // create int vector p
root [20] gDirectory→WriteObject(&p,"p_1");       // Write vector p to the root file
root [21] vector <int> *l;                        // create pointer of int vector l
root [22] gDirectory→GetObject("p_1",l);          // copy vector back to l
root [23] cout << l->size() <<endl;
```

ROOT – Input / Output

TFile – Write/Read

```
root [24] TH1F *hc=(TH1F*)gDirectory→Get("h");    // Read histo h from File
root [25] TFile*f3 = Tfile::Open(    // Remote acces of TFile
          "https://www.physi.uni-heidelberg.de/~marks/analysis.root");
root [25] gDirectory→pwd();
https://www.physi.uni-heidelberg.de/~marks/analysis.root:/
root [25] gDirectory→ls();
TWebFile**              https://www.physi.uni-heidelberg.de/~marks/analysis.root
 TWebFile*              https://www.physi.uni-heidelberg.de/~marks/analysis.root
  KEY: TH1D     S;1     Signal
  KEY: TH1D     T;1     Temperature
  KEY: TH2D     C2;1    Temperature vs Signal
  KEY: TCanvas  myC;1   Signal Plots
  KEY: TH1D     S1;1    Signal 19<T<20
  KEY: TH1D     S2;1    Signal 20<T<21
  KEY: TH1D     S3;1    Signal 21<T<22
  KEY: TH1D     S4;1    Signal 22<T<23
  KEY: TCanvas  myTempDep;1     T dependent Signal Plots
  KEY: TH2D     CS2;1   Temperature vs Signal corrected
  KEY: TH1D     CS;1    Signal corrected
  KEY: TH1D     CSCLONE;1       Signal corrected
  KEY: TH1D     BCK;1   background
  KEY: TH1D     CSSUB;1 Signal corrected, Bck subtracted
  KEY: TCanvas  myCor;1 T corrected Signal Plots
```

rootIO_commands.txt

ROOT – Speichern von Objekten

Alle Objekte die von TObject erben können in ein ROOT- File geschrieben werden (persistent Object). Die Objekte können anschliessend wieder eingelesen werden.

Beispiel Schreiben:

Beispiel in myRooFileWrite.C

```
…….
void myRooFileWrite{
      TRandom3 *R = new TRandom3();
      R->SetSeed(0);
      TH1F *h = new TH1F ("myhist","Write Test",100,-5.,5.);
      h->FillRandom("gaus",10000);
      TFile outFile ("myRooFileWrite.root","RECREATE");
      h->Write();
      outFile.Close();
      return;
}
```

```
>$ root myRooFileWrite.root
```

ROOT File öffnen

```
root[0] _file0->ls()
```

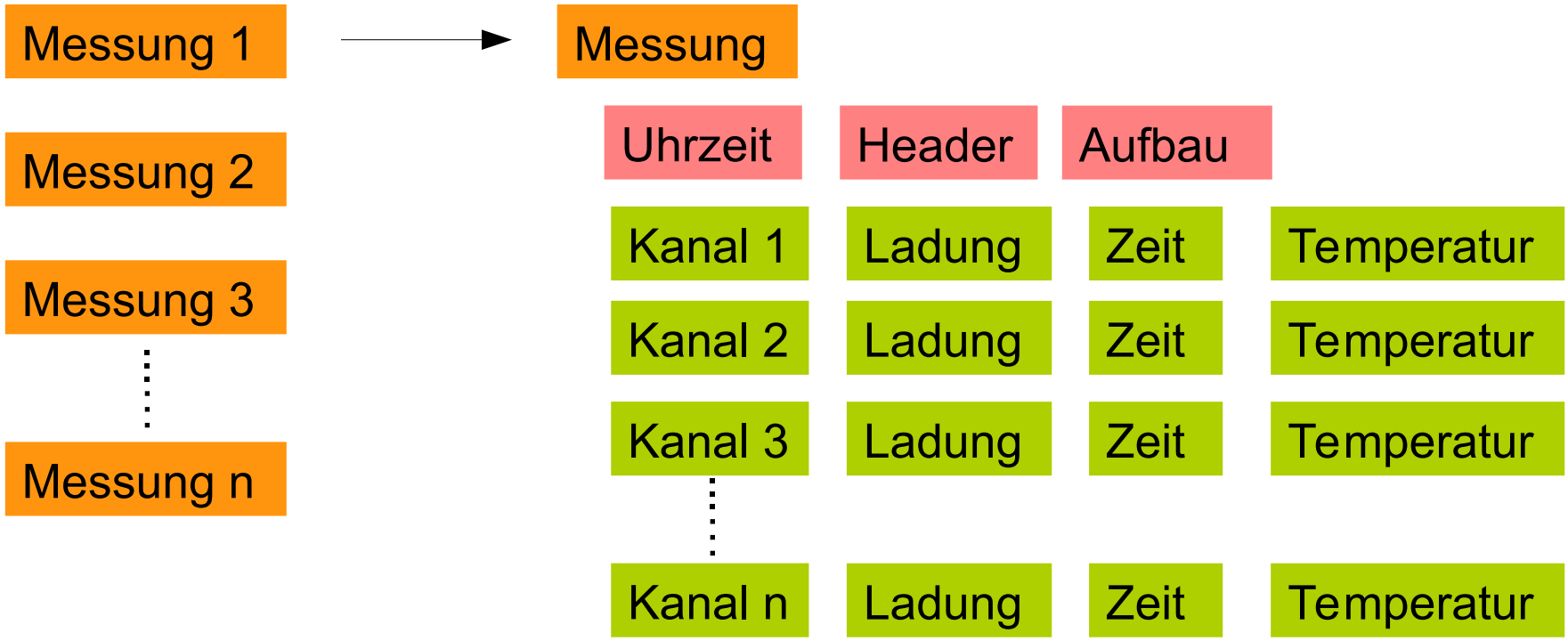
Inhalt auflisten

```
TFile**         myRooFileWrite.root
TFile*          myRooFileWrite.root
KEY: TH1F     myhist;1        Write Test
myhist->Draw()
```

Histogramm darstellen

TTree - Speichern von Daten

Ein ROOT Tree enthält eine Daten Struktur, die in Form einer C++ Klasse dargestellt werden kann. Die Struktur wird dabei wiederkehrend in Form von Einträgen gespeichert. Der gesamte Tree läßt sich in einem ROOT File speichern und kann anschliessend wieder gelesen werden.



Der Tree ist in Äste (branches) unterteilt, die die Objekte speichern.
Spezielle Techniken sorgen für effizienten Input/Output.

TTree - Ntuple

- Ein Beispiel mit einer tabellarischen Datenstruktur stellt das Ntuple dar.

Im Beispiel myRooFileWriteText.C wird ein Text File mit 4 Spalten geschrieben. Dieses Text File wird dann mit myRooFileReadText.C in ein Ntuple geschrieben und in einem root File gespeichert.

```
Float_t px,py,pz,p,E;
TFile *f = new TFile("myRooNtuple.root","RECREATE");
TNtuple *ntuple = new TNtuple("ntuple",
                              "data from asci File","px:py:pz:p:E");
For (int i = 0 ; j < nRead ; j++)
                    ntuple→Fill(px,py,pz,p,E);
f->Write();
```

Mit Hilfe des TBrower Werkzeugs kann das Ntuple im root File dann angesehen werden und auch am root prompt manipuliert werden.

```
>$ root myRooNtuple.root                                  ROOT File öffnen
root[0] Attaching file myRooNtuple.root as _file0...
root[1] TBrowser T                                        Inhalt ansehen
root[2] _file0→ls()
…..
root[3] TCanvas *myCanvas = new Tcanvas()                 Neues Canvas erzeugen
root[4] ntuple->Draw("px:E")
root[5] ntuple→Draw("px:E","p>600")                       Plot px vs E  für p>600
```

TTree - Beispiel

- Schreiben eines TTree Objektes

Im Beispiel myWriteTTree.C wird ein TTree Objekt, das 1000 Elemente der Größen E und des arrays p[3] enthält, in einem ROOT File gespeichert.

```
…..
TFile *f = new Tfile("myTTree.root","RECREATE");
TTree *t = new TTree("tree","data tree");

int nEvent;     t->Branch("nEvent",&nEvent,"nEvent/I");
double E;       t->Branch("E",&E,"E/D");
double p[3];    t->Branch("p",p,"p[3]/D");

for (int i = 0 ; i < 1000 ; i++){
   nEvent++;
   E = …
   p[0] = ….
   t→Fill();
}

f->cd();
t->Write();
f->Close();
}
```

Specify TTree name

In einen Branch können beliebig komplexe Objekte geschrieben werden.

TTree - Beispiel

- Schreiben eines TTree Objektes

Im Beispiel myWriteTTree.C wird ein TTree Objekt, das 1000 Elemente der Grössen E und des arrays p[3] enthält, in einem ROOT File gespeichert.

```
…..
TFile *f = new Tfile("myTTree.root","RECREATE");
TTree *t = new TTree("tree","data tree");

int nEvent;     t->Branch("nEvent",&nEvent,"nEvent/I");
double E;       t->Branch("E",&E,"E/D");
double p[3];    t->Branch("p",p,"p[3]/D");

for (int i = 0 ; i < 1000 ; i++){
   nEvent++;
   E = …
   p[0] = ….
   t→Fill();
}

f->cd();
t->Write();
f->Close();
}
```

Specify TTree name

In einen Branch können beliebig komplexe Objekte geschrieben werden.

TTree - Beispiel

- Lesen eines TTree Objektes

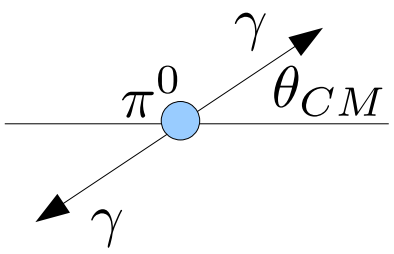
Im Beispiel myReadTTree.C wird das im vorherigen Beispiel geschriebene TTree Objekt gelesen.

```
…..
TFile *f = new Tfile("myTTree.root");
TTree *t = (TTree*) f->Get("tree");

TBranch *b_nEvent;
TBranch *b_E;
TBranch *b_p;

int nEvent;  t->SetBranchAddress("nEvent",&nEvent,&b_nEvent);
double E;    t->SetBranchAddress("E",&E,&b_E);
double p[3]; t->SetBranchAddress("p",p,&b_p);

Long64_t nentries = t->GetEntries();
for (Long64_t i=0;i<nentries;i++) {
    t->GetEntry(i);
    cout << "Event " << nEvent << "  p[0] = " << p[0] << endl;
}
```

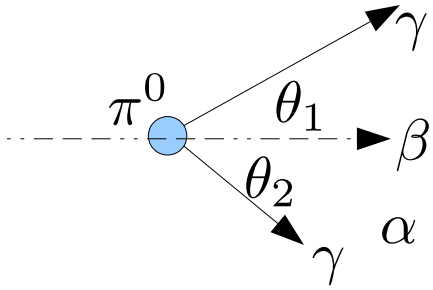
Specify TTree name

Simulation des π^0 Zerfalls

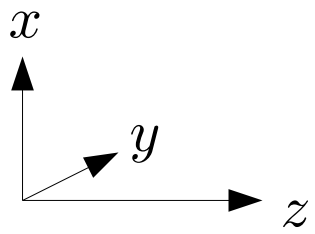
Schwerpunktsystem:



Laborsystem:



$$\alpha = \theta_1 + \theta_2$$



Relativistische Variablen:

$$\beta = \frac{|\vec{p}|}{E} \qquad \gamma = \frac{E}{m_0 c^2}$$

Photonen:

$$E_1^{lab} = \gamma \frac{m}{2}(1 + \beta cos(\theta_{CM}))$$

$$E_2^{lab} = \gamma \frac{m}{2}(1 - \beta cos(\theta_{CM}))$$

Invariante Masse

$$m^2 = 2E_1^{lab}E_2^{lab}(1 - cos(\alpha))$$

$$tan(\theta_1) = \frac{sin(\theta_{CM})}{\gamma(\beta + cos(\theta_{CM}))}$$

θ_{CM} wird im Bereich [0,pi] uniform verteilt generiert, daraus lassen sich die Photonenergien und Winkel bestimmen. Die π^0 Energie wird gegeben. Eine Abhängigkeit in der x-y Ebene ist nicht vorhanden.

Implementiert in pi0Decay.C

Simulation des π^0 Zerfalls

Die maximale und minimale Energie im Laborsystem ist:

$$E_{max}^{lab} = \gamma \frac{m}{2}(1+\beta) \qquad E_{min}^{lab} = \gamma \frac{m}{2}(1-\beta)$$

Der minimale Öffnungswinkel ist: $\alpha_{min} = arcsin(\frac{1}{\gamma})$

Die Grenzen der Energiewerte können mit den obigen Gleichungen implementiert werden.

Durch den Messprozess werden die Energiewerte und Winkel mit einer Unsicherheit gemessen, die durch die Auflösung des Detektors gegeben ist. Zur Simulation des Messprozesses nehmen wir an, das die Auflösungsfunktionen gaussverteilt und energieabhängig sind. Es werden folgende Funktionen benutzt:

$$\sigma_E = \sqrt{(a \cdot \sqrt{E})^2 + (c \cdot E)^2 + b^2}$$

$$\sigma_\theta = \frac{t}{\sqrt{E}}$$

Typische Werte:

$$a = 0.05\,\sqrt{GeV}$$
$$b = 0.07\,GeV$$
$$c = 0.01\,GeV^{-1}$$
$$t = 0.004\,mrad \cdot \sqrt{GeV}$$

Simulation des Zerfalls $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

Im Programm pi0Decay.C ist ein Zerfall $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ simuliert. Aus dem generierten Streuwinkel im Schwerpunktsystem werden die Photonenergien und Streuwinkel im Laborsystem berechnet und die Viervektoren der Photonen erzeugt.

Arbeitsvorschlag:

- Es sollen für eine beliebige Anzahl von Zerfällen die beschreibenden Variablen in ein nTuple mit dem Namen “pi0Gen“ geschrieben werden. Gehen Sie dazu vom oben genannten Programm aus. Stellen Sie dann Variablen des ntuples mit TBrowser dar.

pi0DecaySim.C

- Ergänzen Sie ihr Programm, in dem Sie die Messung des generierten Zerfalls simulieren. Dazu werden die generierten Werte der Photonenergie und der Photon-winkel mit Auflösungsfunktionen (CaloFunc.C) versehen. Schreiben Sie die generierten Grössen und die gemessenen Photonvierervektoren in einen TTree. Vergleichen Sie die gemessene und die generierte invariante Masse.

pi0DecayCalo.C

Datenanpassung

- Generelle Fragestellung

  Welche Möglichkeiten haben wir einen Satz von n mal gemessenen Werten (Stichprobe) mit Hilfe eines Modells zu beschreiben?

  Zum Beispiel wollen wir die invariante Masse des Zerfalls $D^0 \to K^+\pi^-$ bestimmen. Wir messen die Vierervektoren (E, P_x, P_y, P_z) von K^+und π^- und bilden

  $$m^2 = [(E, P_x, P_y, P_z)_K + (E, P_x, P_y, P_z)_\pi] \cdot [(E, P_x, P_y, P_z)_K + (E, P_x, P_y, P_z)_\pi$$

  Durch die statistische Natur des Zerfalls und der Messung von Energie und Impuls ist invariante Masse gaussverteilt mit Parametern μ und σ^2 .

  Das Ziel ist eine Messung von μ und σ^2 und eine Bestimmung des Messfehlers.

  Die Methodik der Parameterbestimmung wird im Physiker Slang als Fit bezeichnet.

- Die Datenanpassung in ROOT erfolgt mit Hilfe von speziellen Programm Paketen
  - Minuit wird in ROOT zum fitten verwendet
  - RooFit
  - RooStats

Datenanpassung

In ROOT stehen zwei Methoden zur Bestimmung von optimalen Parametern aus Stichproben für Wahrscheinlichkeitsverteilungen zur Verfügung

- Maximum-Likelihood-Methode
- LS Methode = least square method

- Fitten – das wichtigste Tool der Datenanalyse

Mathematische Prozedur ein Modell and Datenpunkte anzupassen. Das Modell wird durch eine Funktion beschrieben, die freie Parameter besitzt. Die Parameter werden beim Anpassen so verändert, dass die folgende Grösse minimal wird:

$$\chi^2 = \sum \left(\frac{y_i - f(x_i)}{\sigma_i} \right)^2$$

Die Funktion wird als χ^2Funktion bezeichnet. Ein guter Fit hat $\chi^2/ndf \approx 1$, wobei ndf die Anzahl der Freiheitsgrade ist.

Voraussetzung für eine „erfolgreiche“ Datenanpassung sind
- der Verlauf der Funktion kann grundsätzlich die Daten beschreiben
- die Startparameter sind so gesetzt, das die Funktion ungefähr die Daten beschreibt

ROOT - Histogramme

Erweiterungen zu myHisto.C

- Histogramme fitten

```
TH1F *h = new TH1F ("myhist","Altersverteilung",60,0.,60.);
….
h->Fill(age);
….
h->Fit("gaus","M","",15.,25);
```

Fit Funktion

Fit Bereich

Arbeitsvorschlag:
Probieren Sie die diskutierten Methoden aus und ändern Sie dazu myHisto.C

myHistoExtended.C

- Nützliche Beispiele

```
TAxis *axis = h->GetXaxis();
```

Find a Bin

```
bin_number = axis->FindBin(x_value);
```

```
TH1F * h3 = new TH1F ("h3","h1/h2",nBin,xMin,xMax);
```

Divide 2 Histos

```
h3->Divide(h1,h2);
```

ROOT – Darstellung/FIT von Messungen

- Example code zur Darstellung und Fit von Messungen

Erzeugen des Graphen

Daten in Form von Arrays

```
TGraphErrors *g = new TgraphErrors(nP,X,Y,ErrorX,ErrorY);
```

Canvas um den Graphen darzustellen

```
TCanvas *myC = new TCanvas ("myC","My Histogram Results",
                                                    0,0,800,600);
```

Position und Grösse

Funktion für das Datenmodell

```
TF1 * f = new TF1("f","[0]+[1]*x*x",0.,7.0);
```

Anpassung der Funktion an den Graphen

```
g->Fit("f");
```

Definition der Beschreibung

Position und Grösse

```
TLegend *leg = new TLegend(0.1,0.7,0.3,0.9,"Time vs Position");
```

Erzeugen eines Output Files

```
myC->Print("myGraph.pdf");
```

Endung legt Filetyp fest

Vollständiges Beispiel in myGraph.C

```
>$ root myGraph.C
>$ g++ myGraph.C `root-config --cflags --glibs`
```

Erzeugt kein Canvas!

ROOT – Fitting mit Minuit

Elemente, die für einen Fit mit Minuit innerhalb von ROOT gebraucht werden

```
#include <TMinuit.h>
…..
//set default to Minuit since we will use gMinuit
TvirtualFitter::SetDefaultFitter("Minuit");
…..
// Create fit Function
TF1* f = new TF1("f",myFunc,xRmin,xRmax,nDim);
…..
// Perform the fitting
```

Pointer to results | Instance to be fitted | Fit function | Fit Options

```
TFitResultPtr fp = Graph->Fit(f, "S");
…..
double myFunc (double* xval, double* par){
  // Polynomial of Dimension nDim
  double x = xval[0];
  double f = 0.;
  for (int i=0; i<nDim; i++){
    f += par[i] * pow(x,i);
  }
  return f;
}
```

ROOT – Python Interface

ROOT hat ein Python binding (PyROOT) und vereinigt damit compilierte C++ Bibliotheken mit der Flexibilität von Python.

- Ein Beispiel : Füllen eines Histogramms mit einer Polynomial 1.Grades Zufallsverteilung.

```
>$ python
Python 2.7.8 (default, Sep 30 2014, 15:34:38) [GCC] on linux2
Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more
information.
>>> import ROOT
>>> h=ROOT.TH1F("myPyHisto","Productivity;Python Knowledge;
Productivity",64,0,63)
>>> h.FillRandom("pol1")
>>> h.Draw()
```

Conclusion

Mit diesem Einblick in die Grundlagen eines modernen Analysewerkzeuges sollten Sie in der Lage sein

- im Selbststudium C++ Kenntnisse für komplexere Probleme zu erarbeiten
- die ROOT Documentation and Tutorials zu verstehen

Ausblick

Weiterführende, für eine Datenanalyse wichtige Themen, die hier nicht behandelt werden konnten, sind

- Datenanpassung mit Hilfe von ROOT/Minuit
  - Bestimmung von Modelparametern
- Datenanpassung mit hilfe von rooFit und rooStat
  - Statistische Methoden der Datenauswertung
- Multivariate Analysis
  - Multvariate Analyse zur Datenselektion und Untergrundreduktion mit dem ROOT Paket TMVA
- Neural networks
  - Artificial neural networks (ANN) mit der ROOT Klasse TmultiLayerPerceptron
  - Neural Network Objects (NNO)