

14.10.2021

# Single Top-Quark Production at LHC

## An Insight into the World of the Smallest Particles

Lukas Kretschmann

Carl-Fuhlrott-Gymnasium, Wuppertal (NRW)



The World of the Smallest Particles and  
the Top-Quark

The Top-Quark

Single Top-Quark Production

Investigation of the t-channel cross  
section

Summary

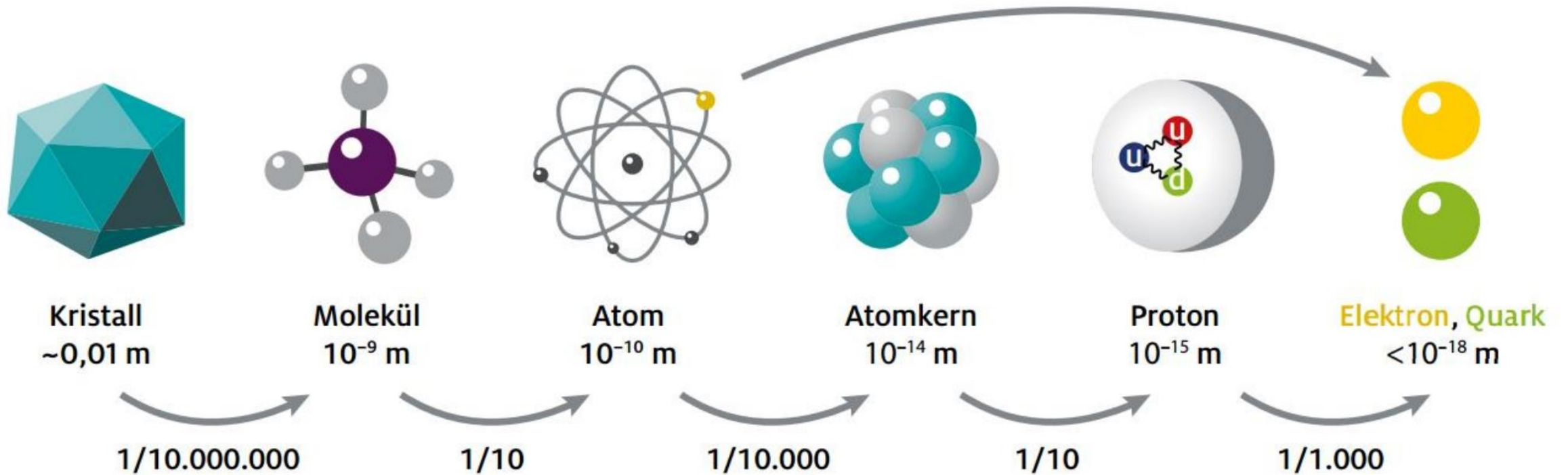


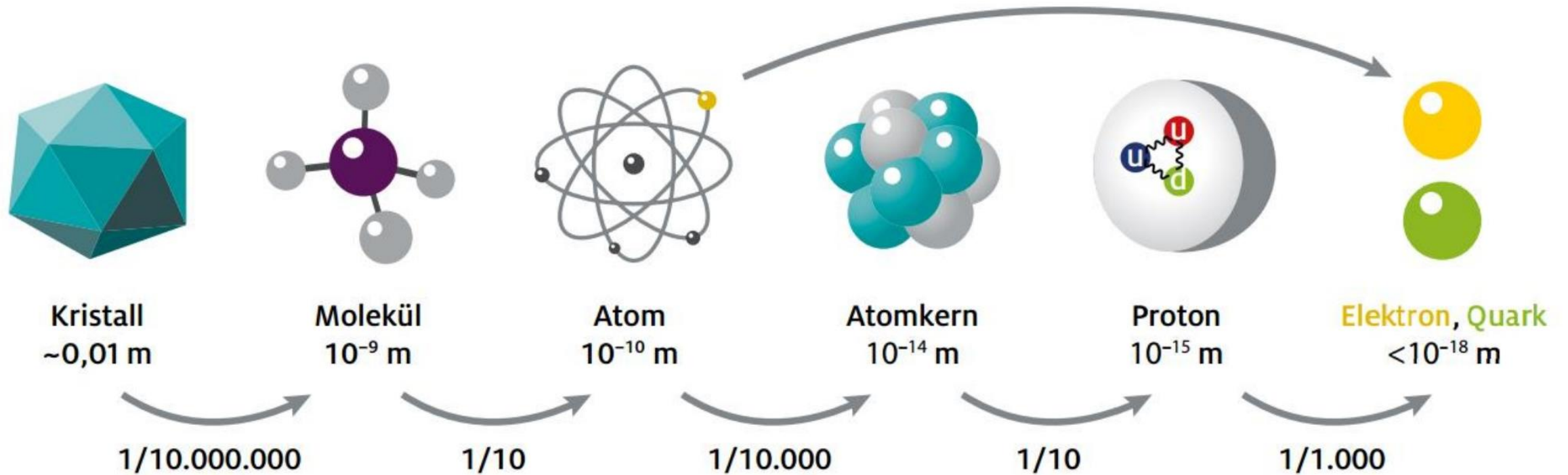


# The World of the Smallest Particles and the Top-Quark

From Makro- to Microcosmos

# The World of the Smallest Particles and the Top-Quark





Confinement: Quarks can never be observed as a free particle

# The Top-Quark

A real massive contemporary...



## Standard-Modell der Elementarteilchen

Drei Generationen der Materie (Fermionen)			Wechselwirkungen (Bosonen)		
	I	II	III		
Masse	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	<b>u</b> Up	<b>c</b> Charm	<b>t</b> Top	<b>g</b> Gluon	<b>H</b> Higgs
	<b>d</b> Down	<b>s</b> Strange	<b>b</b> Bottom	$\gamma$ Photon	
	<b>e</b> Elektron	$\mu$ Muon	$\tau$ Tau	<b>Z</b> Z-Boson	
	$\nu_e$ Elektron-Neutrino	$\nu_\mu$ Muon-Neutrino	$\nu_\tau$ Tau-Neutrino	<b>W</b> W-Boson	

**QUARKS** (left side, purple text)

**LEPTONEN** (left side, green text)

**EICHBOSONEN VEKTORBOSONEN** (right side, red text)

**SKALARBOSONEN** (right side, yellow text)

## Standard-Modell der Elementarteilchen

Drei Generationen der Materie  
(Fermionen)

Wechselwirkungen  
(Bosonen)

	I	II	III		
Masse	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
<b>QUARKS</b>	<b>u</b> Up	<b>c</b> Charm	<b>t</b> Top	<b>g</b> Gluon	<b>H</b> Higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>d</b> Down	<b>s</b> Strange	<b>b</b> Bottom	<b><math>\gamma</math></b> Photon	
<b>LEPTONEN</b>	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>e</b> Elektron	<b><math>\mu</math></b> Muon	<b><math>\tau</math></b> Tau	<b>Z</b> Z-Boson	
	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	$\frac{1}{2}$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b><math>\nu_e</math></b> Elektron-Neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> Muon-Neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> Tau-Neutrino	<b>W</b> W-Boson	
					<b>EICHBOSONEN</b> <b>VEKTORBOSONEN</b>
					<b>SKALARBOSONEN</b>



## Standard-Modell der Elementarteilchen

Drei Generationen der Materie (Fermionen)			Wechselwirkungen (Bosonen)		
	I	II	III		
QUARKS	Masse Ladung Spin $=2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>u</b> Up	$=1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>c</b> Charm	$=173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>t</b> Top	$0$ $0$ $0$ <b>g</b> Gluon	$=124.97 \text{ GeV}/c^2$ $0$ $0$ <b>h</b> Higgs
	$=4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> Down	$=96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> Strange	$=4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> Bottom	$0$ $0$ $1$ <b>\gamma</b> Photon	
	$=0.511 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ <b>e</b> Elektron	$=105.66 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ <b>\mu</b> Muon	$=1.7768 \text{ GeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ <b>\tau</b> Tau	$=91.19 \text{ GeV}/c^2$ $0$ $1$ <b>Z</b> Z-Boson	
LEPTONEN	$<1.0 \text{ eV}/c^2$ $0$ $\frac{1}{2}$ <b>\nu_e</b> Elektron-Neutrino	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ $0$ $\frac{1}{2}$ <b>\nu_\mu</b> Muon-Neutrino	$<18.2 \text{ MeV}/c^2$ $0$ $\frac{1}{2}$ <b>\nu_\tau</b> Tau-Neutrino	$=80.39 \text{ GeV}/c^2$ $\pm 1$ <b>W</b> W-Boson	EICHBOSONEN VEKTORBOSONEN
					SKALARBOSONEN

$171.2 \text{ GeV}/c^2$

$\frac{2}{3}$

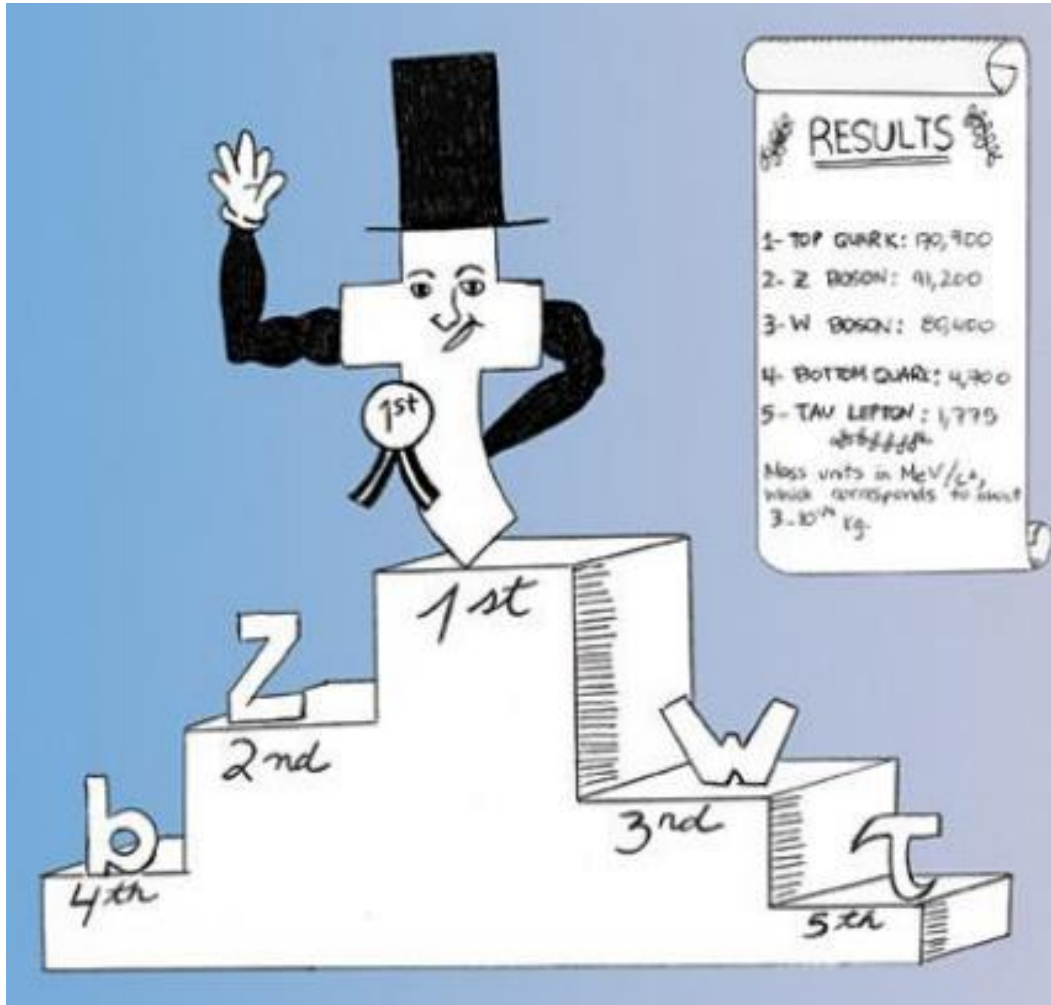
**t**

$\frac{1}{2}$

top

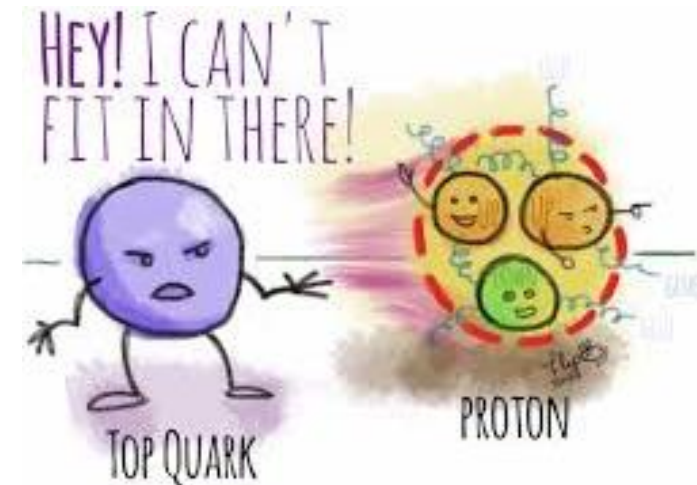


- A half integer-spin like all quarks
- Electric charge of  $\frac{2}{3}e$
- Short lifespan of ca.  $4,2 \cdot 10^{-25} \text{ s}$
- Like all quarks it can take part in all four fundamental interactions



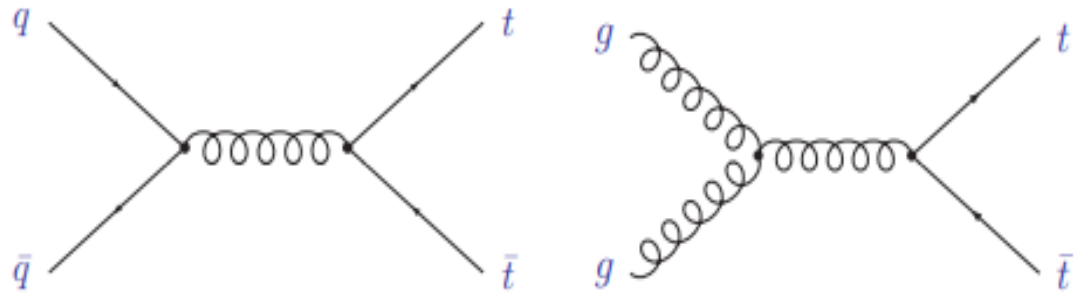
Most massive  
fundamental particle  
(~mass of a gold-atom)

Due to its small  
lifespan it can not  
hadronise

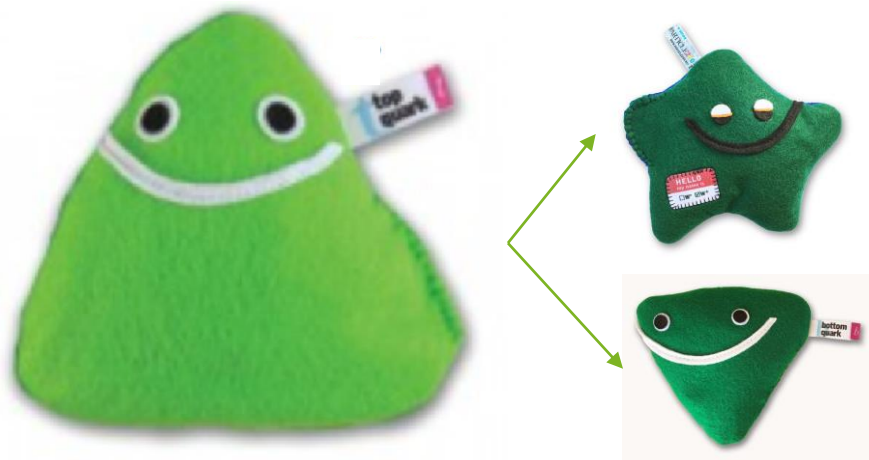


# The Top-Quark

Top quarks are mainly produced as top quark pairs at the LHC, namely via the strong interaction



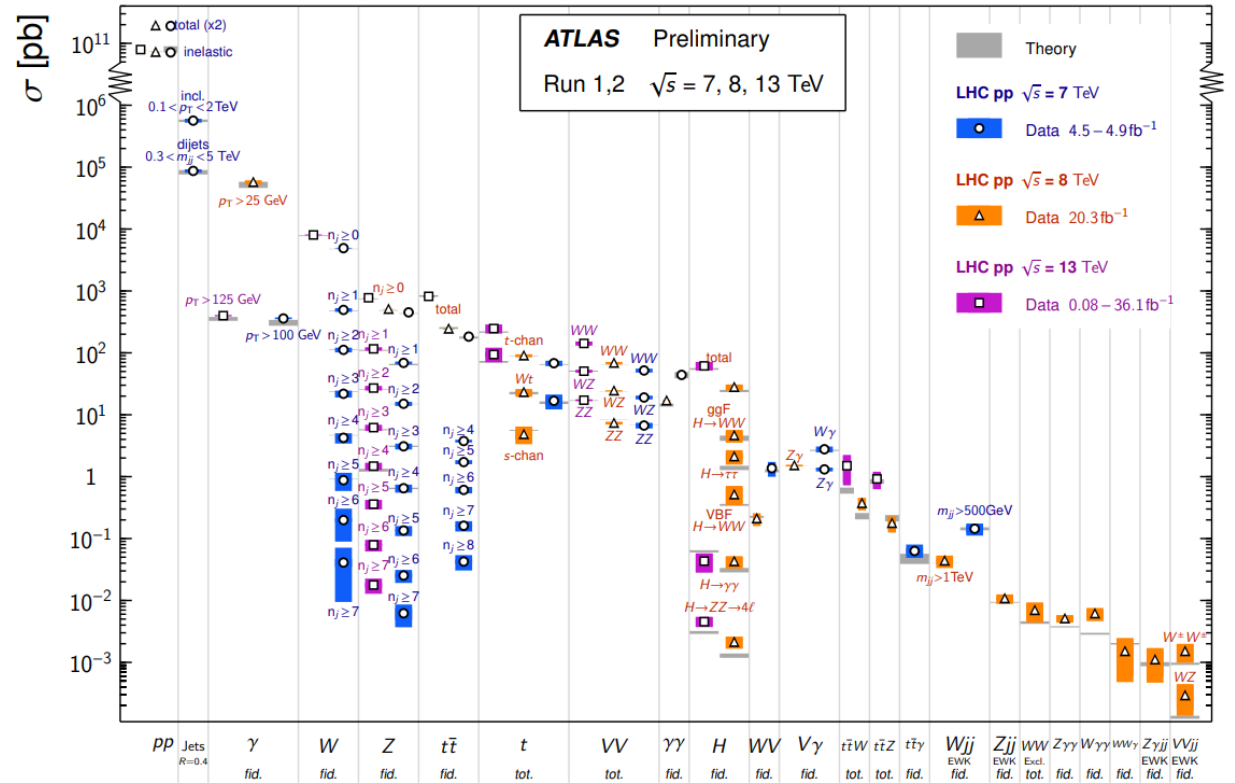
The Top-Quark almost exclusively breaks up into a W-Boson and a Bottom-Quark



~100%  
 $t \rightarrow Wb$

Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: May 2017



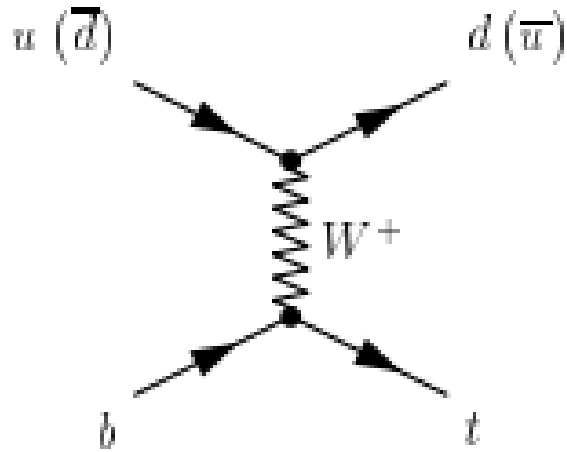
But the top quark can also be produced as a single particle, not just in the form of a particle-antiparticle pair!



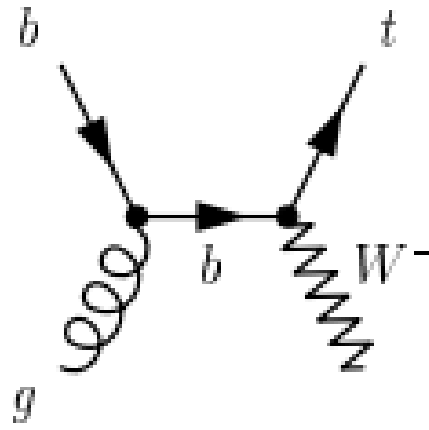


# Single Top-Quark Production

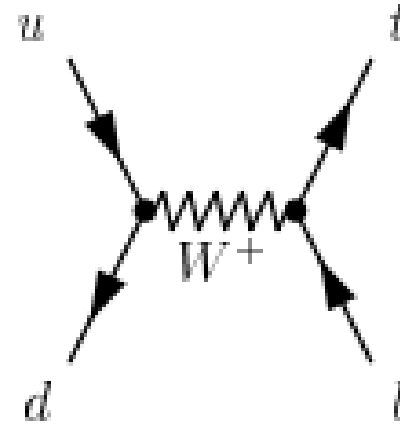
# Single Top-Quark Production



t-channel (tq)

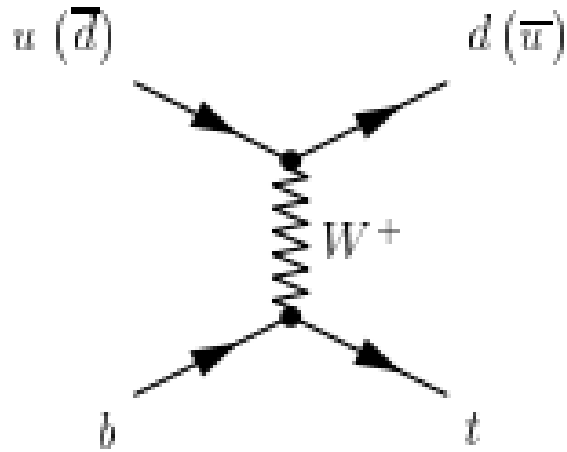


Wt-channel

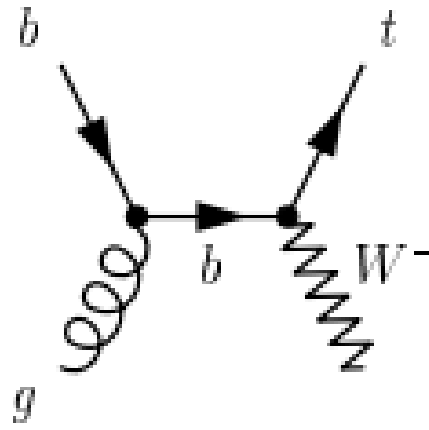


s-channel (tb)

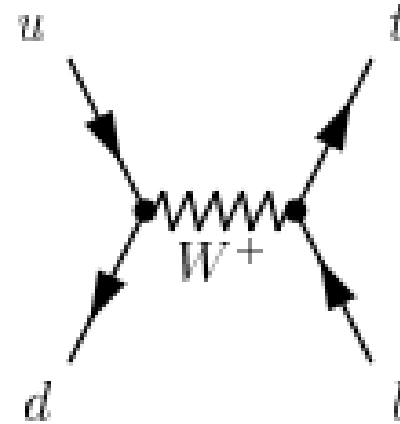
# Single Top-Quark Production



t-channel (tq)



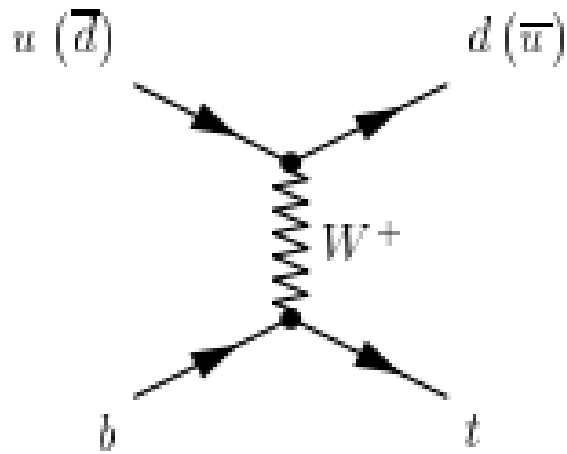
Wt-channel



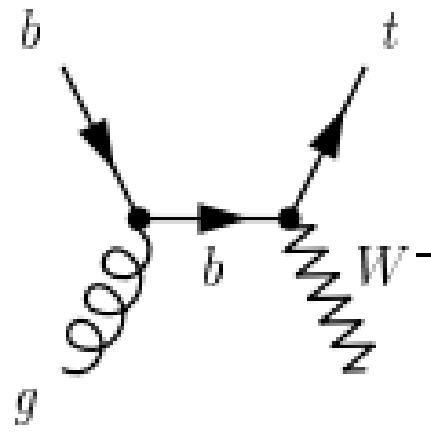
s-channel (tb)

How can you tell how often these processes happen?

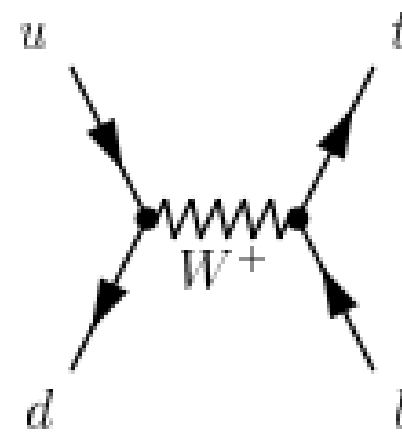




t-channel (tq)



Wt-channel



s-channel (tb)

How can you tell how often these processes happen?



Cross-Sections!

One Barn equals  $10^{-28} \text{m}^2$ .  
The cross-section is so small that it has to  
be expressed in Picobarn ( $10^{-12}$  Barn)



Cross-Section  
proportional to the  $V_{tb}$   
matrix element of the  
CKM matrix  
→ Test of unitarity of  
the CKM matrix



$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

For unitarity the following must apply:

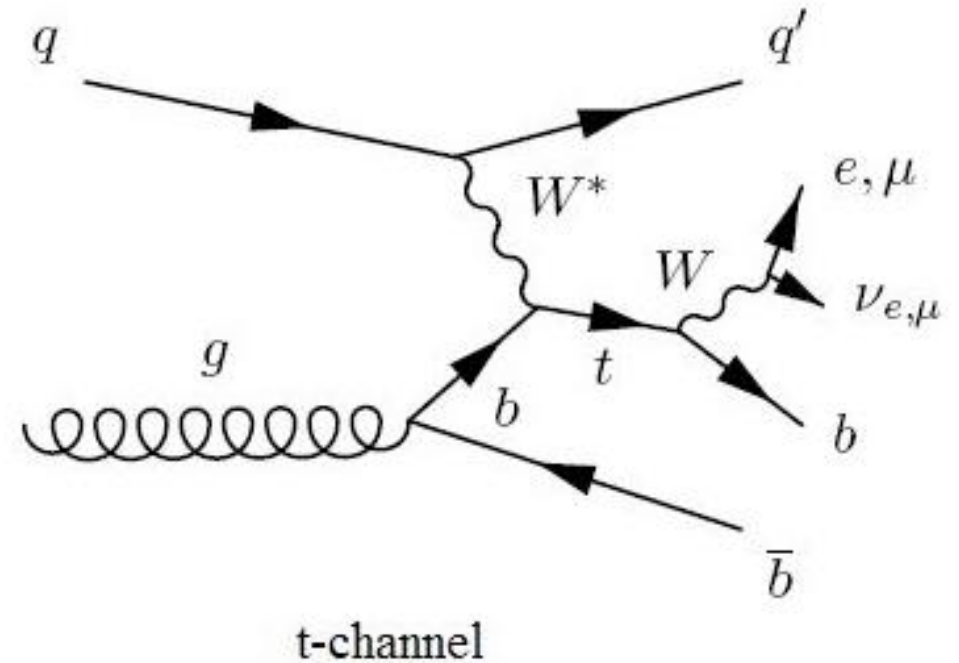
$$|V_{td}|^2 + |V_{ts}|^2 + |V_{tb}|^2 = 1$$

Unitarity is the preservation of normalization, or:  
„The preservation of the probabilities“

# Why should you investigate the t-channel?

Cross-Section  
proportional to the  $V_{tb}$   
matrix element of the  
CKM matrix  
→ Test of unitarity of  
the CKM matrix

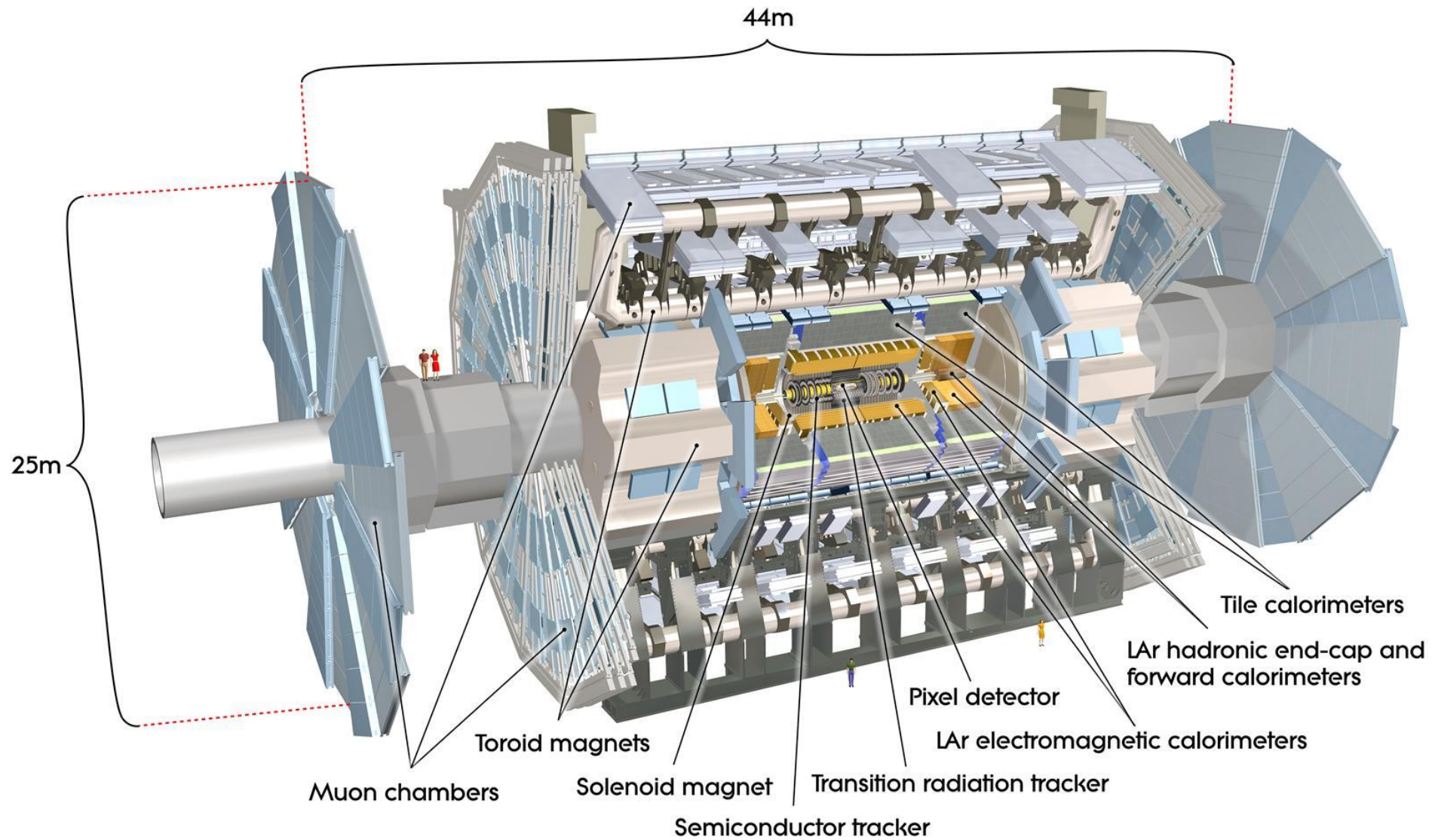
Test of the  
standardmodell:  
Cross section of the  
channel,  $R_t$





# Investigation of the t-channel cross-section

# The ATLAS-Detector

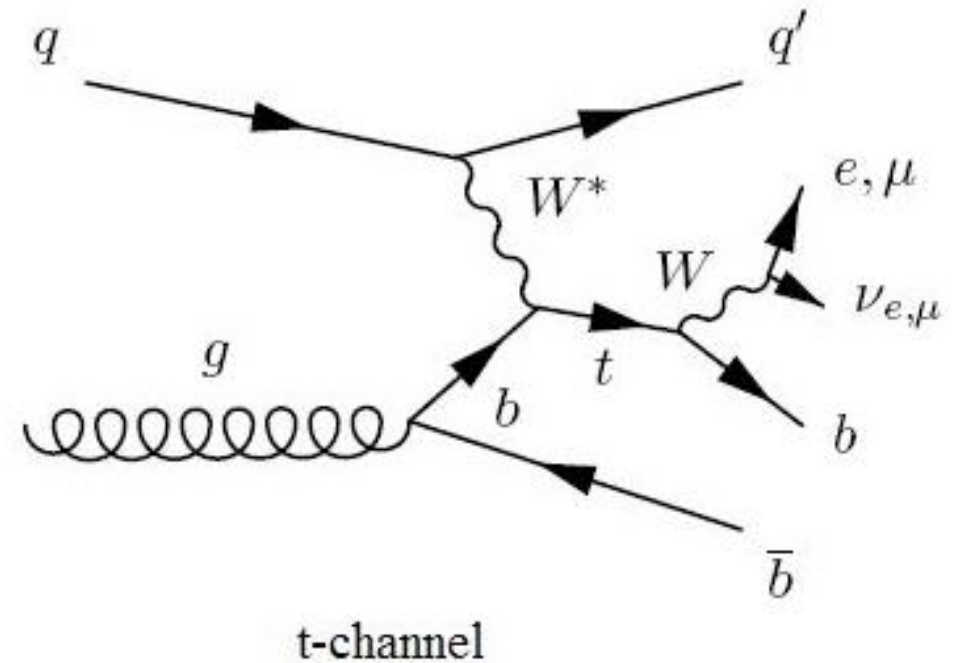


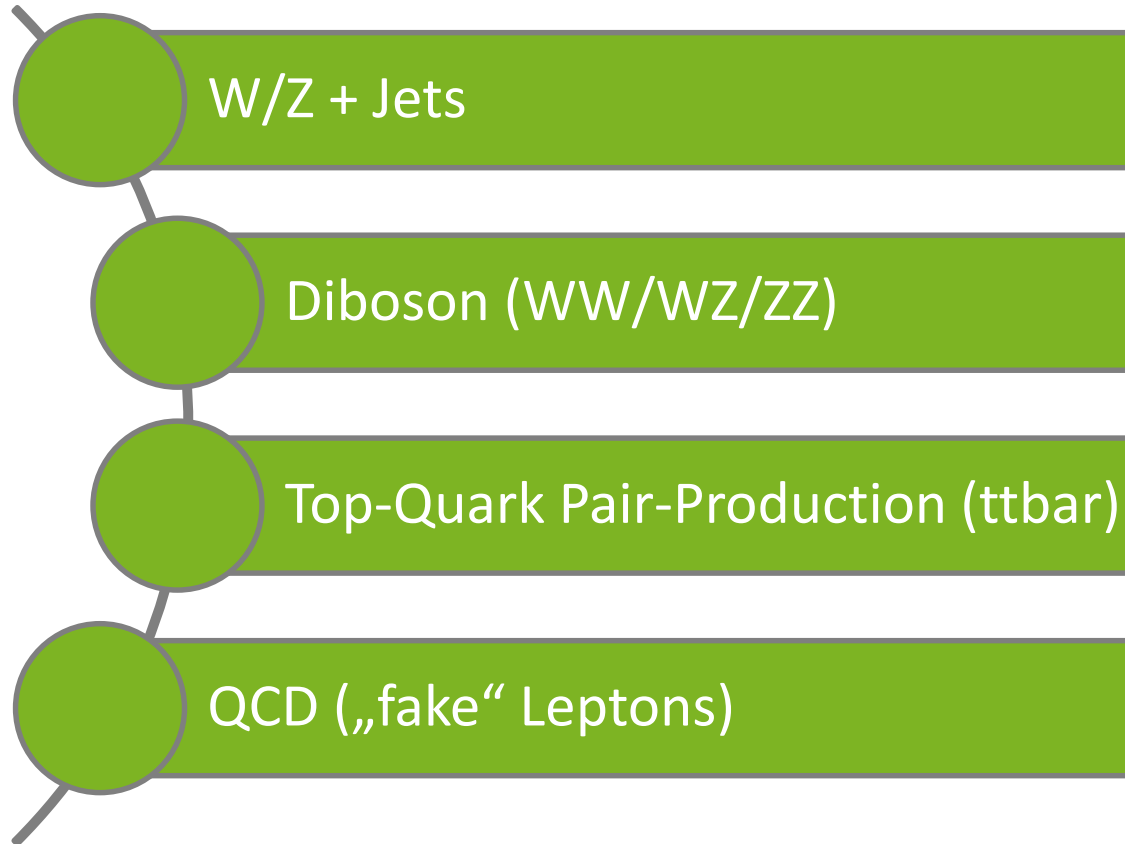
Signature of the t-channel production:

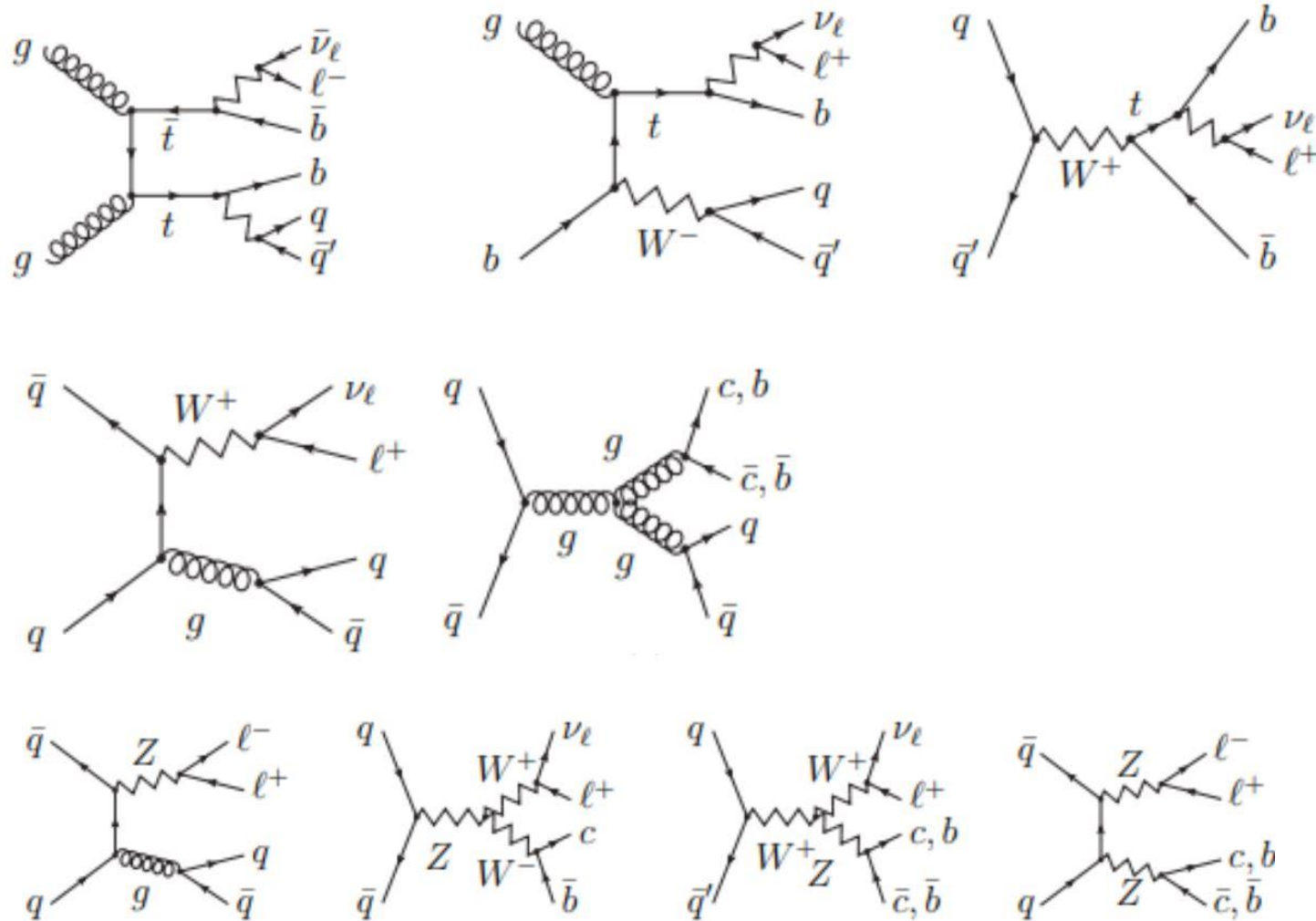
One W-Boson

One jet from a Bottom-Quark

One or two additional light jets







Top-Quark Pair-Production

Wt-channel

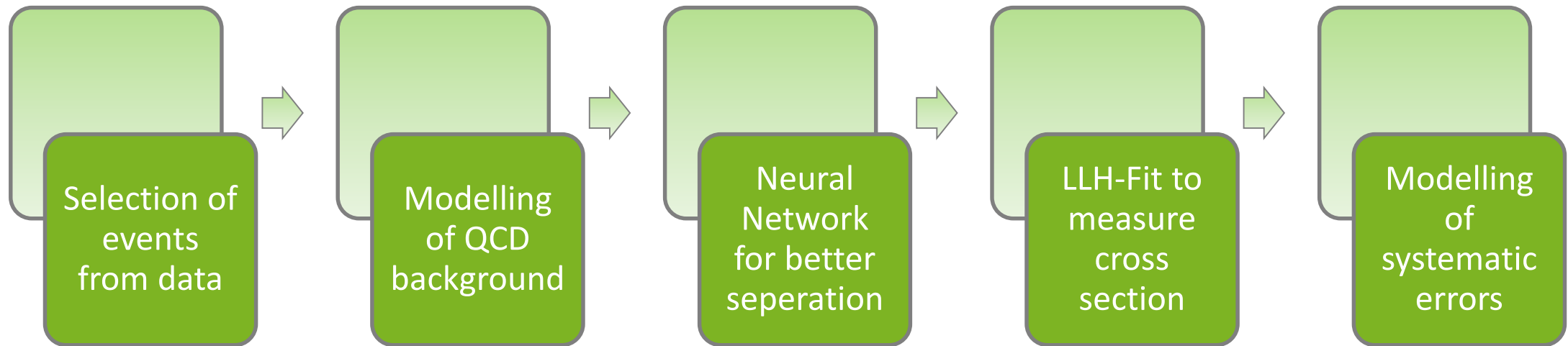
s-channel

W+Jets

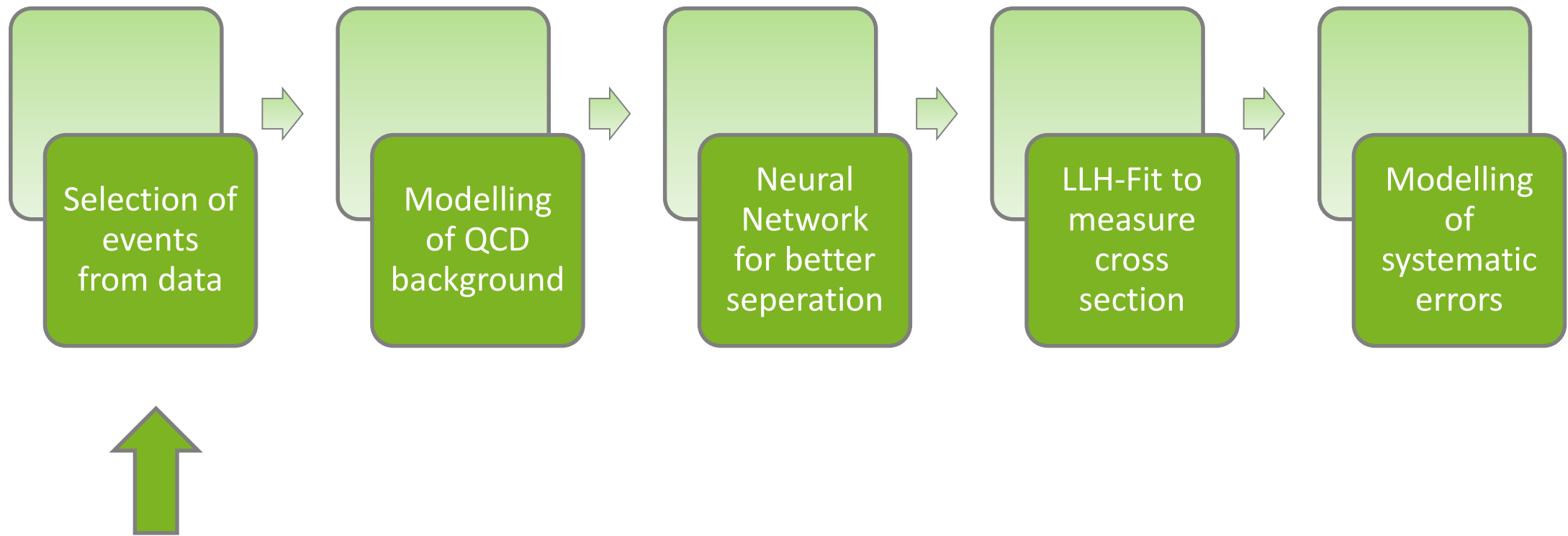
QCD/Multijet

Z+Jets

Diboson





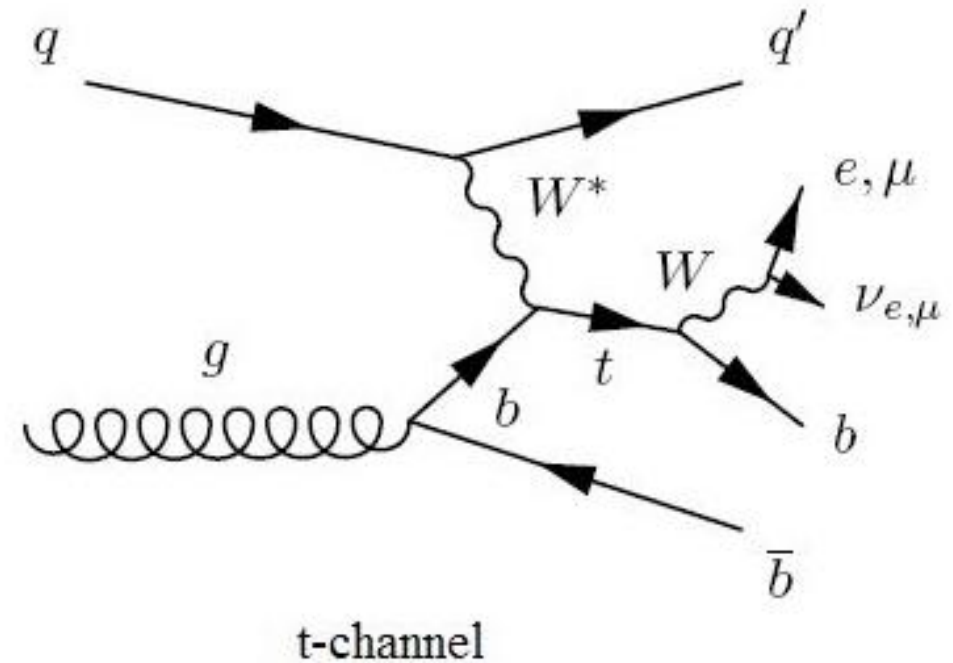


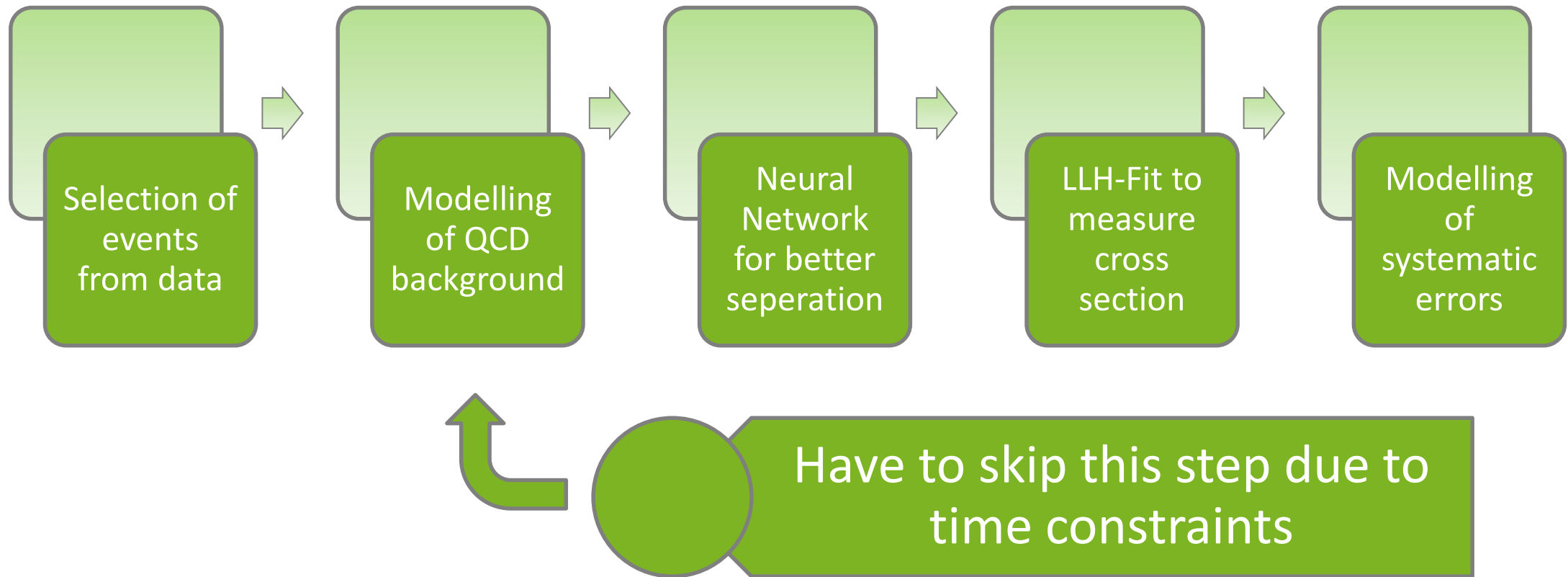
Signature of the t-channel production:

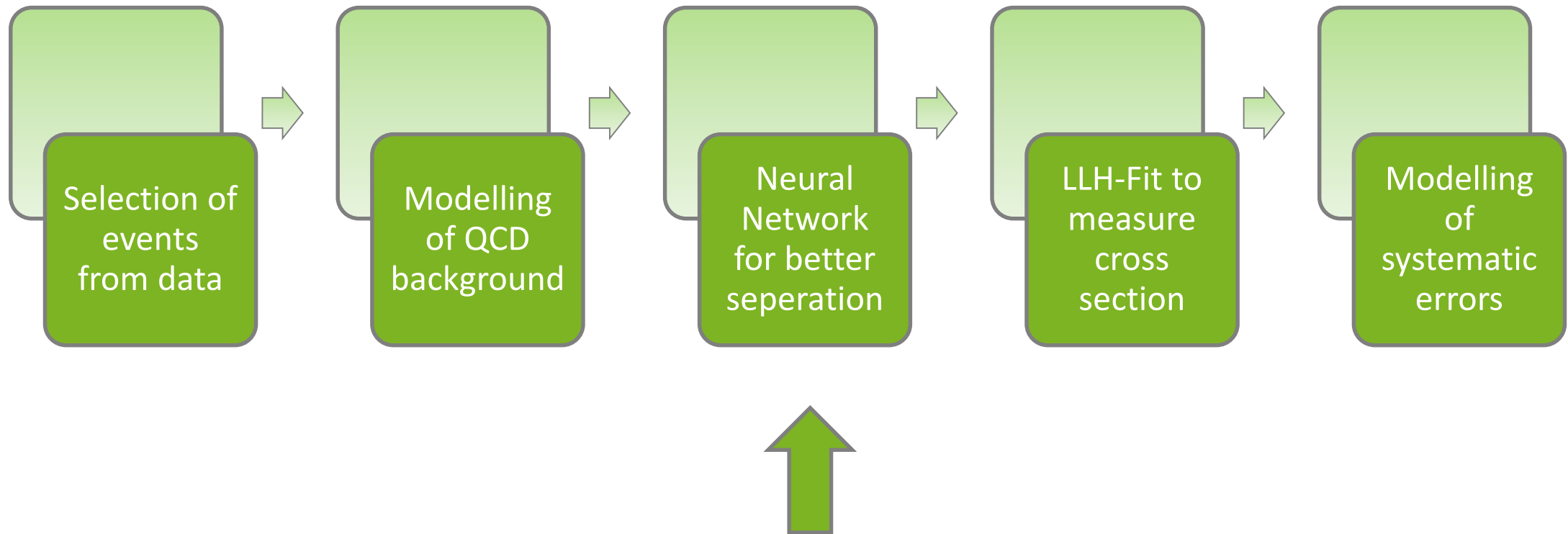
One W-Boson

One jet from a Bottom-Quark

One or two additional light jets





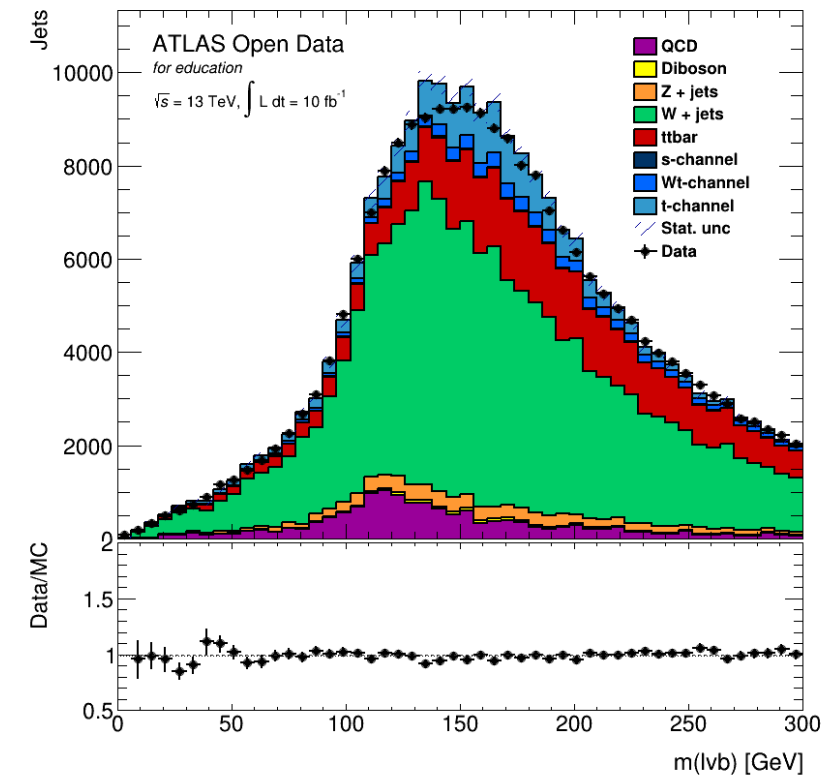
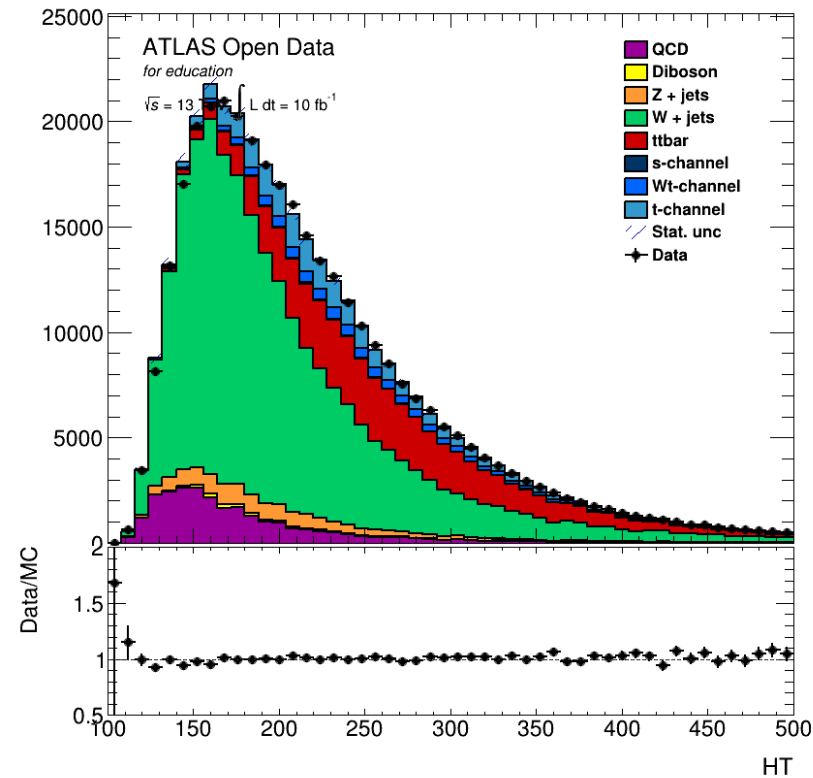
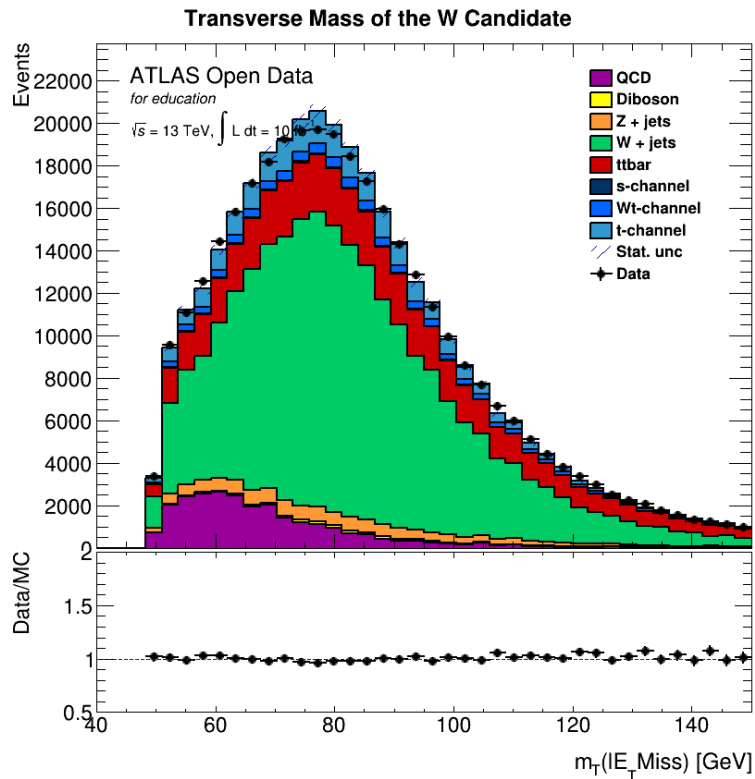


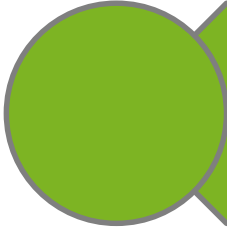
The number of events of the single Top-Quark t-channel production is contained in the investigated events

The only problem is that the individual kinematic variables are not precise enough (consent data to simulations)

The number of events of the single Top-Quark t-channel production is contained in the investigated events

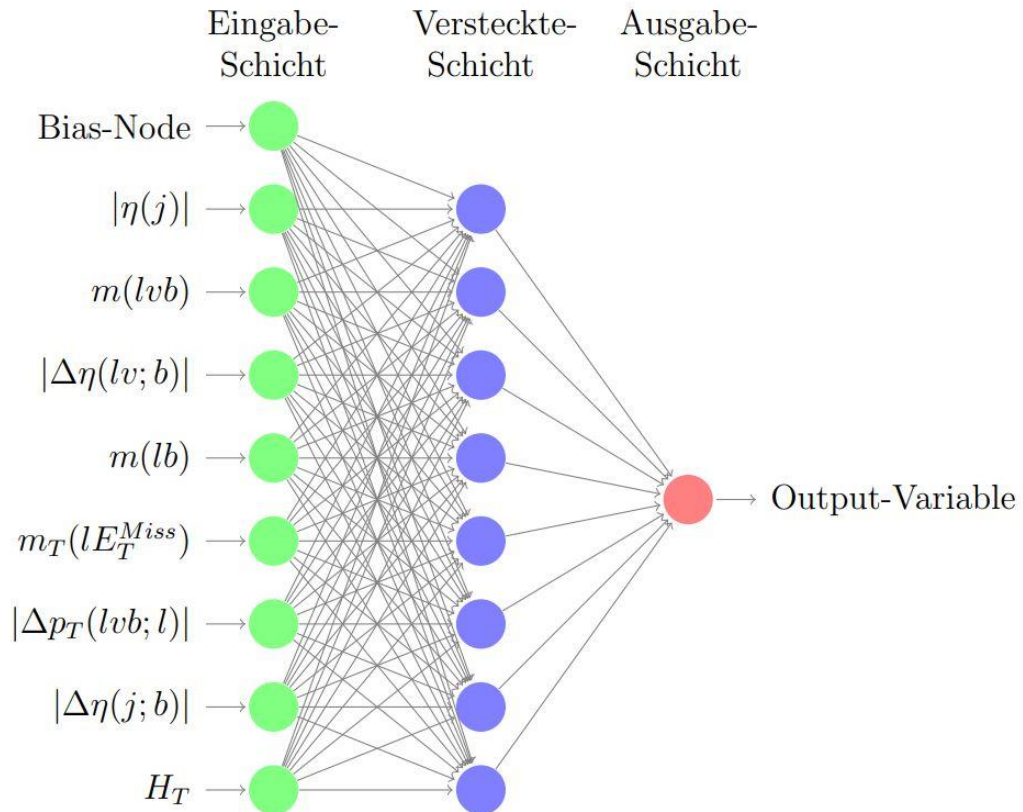
The only problem is that the individual kinematic variables are not precise enough (consent data to simulations)





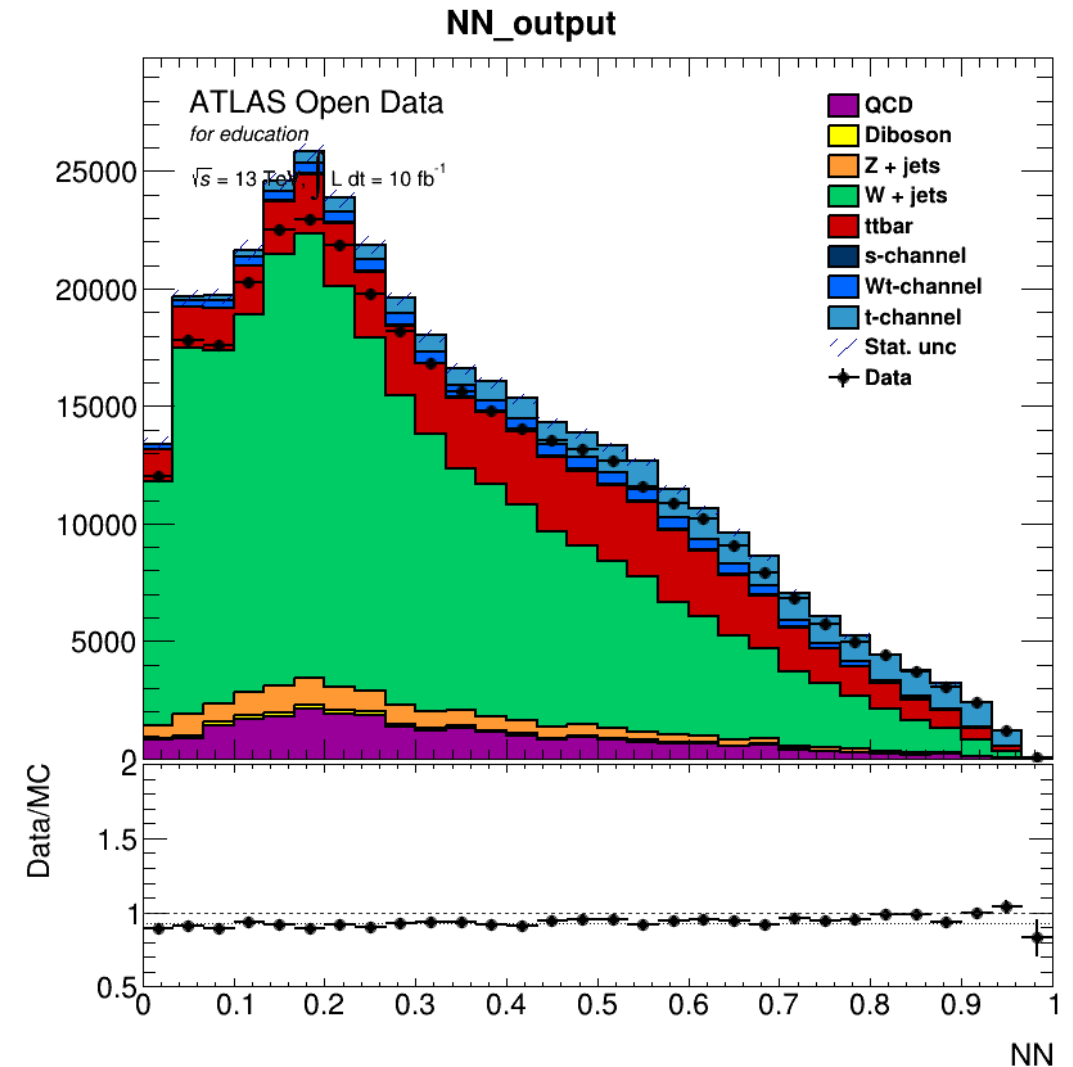
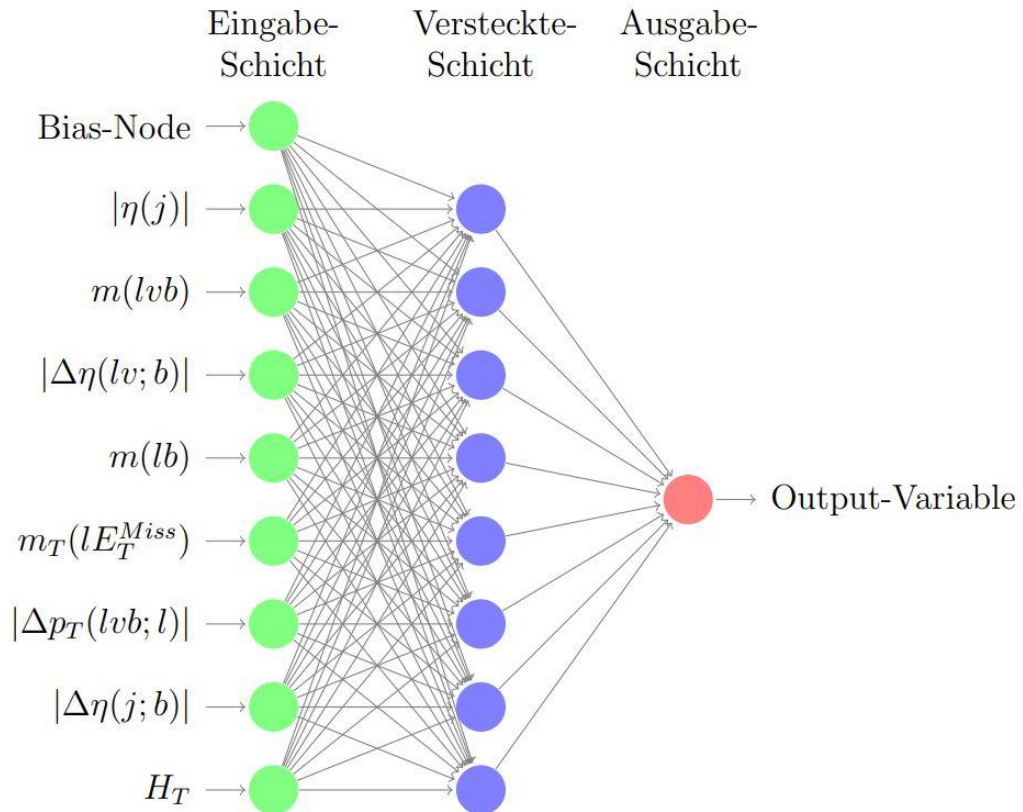
In order to obtain a high-precision variable, different kinematic variables can now be combined with a neural to form a high-precision discriminant, whereby the individual variables should already have a high level of precision and a good separation of signal and background

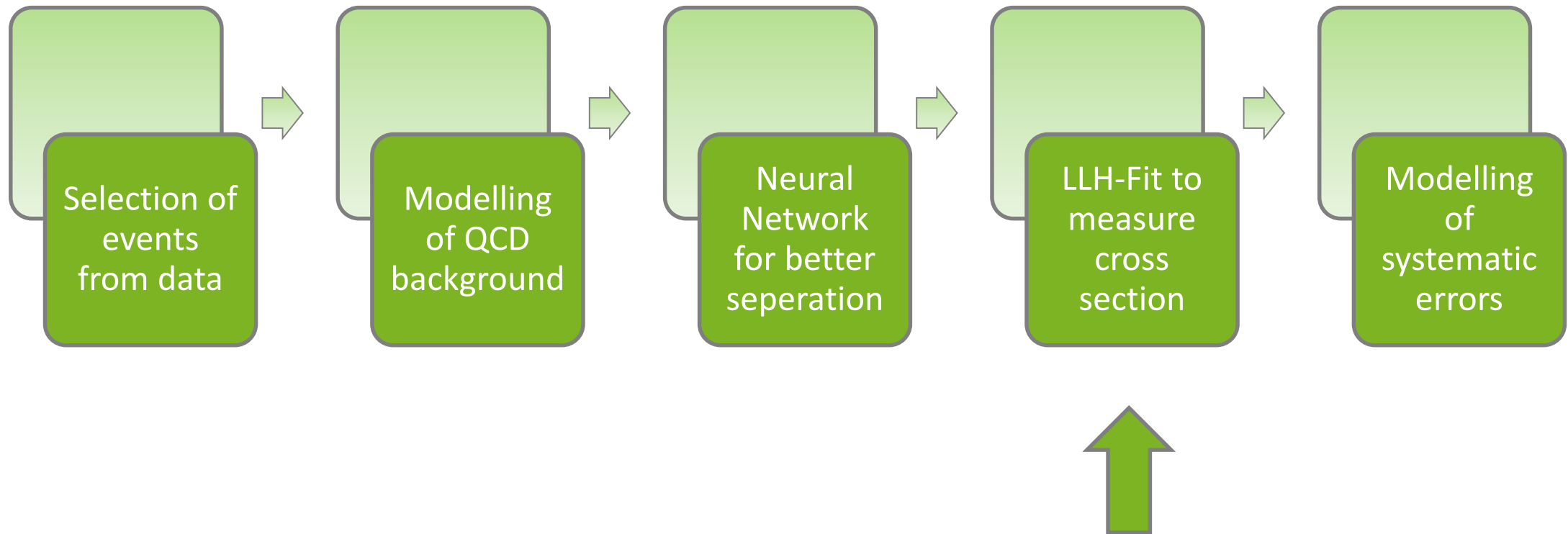
In order to obtain a high-precision variable, different kinematic variables can now be combined with a neural to form a high-precision discriminant, whereby the individual variables should already have a high level of precision and a good separation of signal and background





In order to obtain a high-precision variable, different kinematic variables can now be combined with a neural to form a high-precision discriminant, whereby the individual variables should already have a high level of precision and a good separation of signal and background





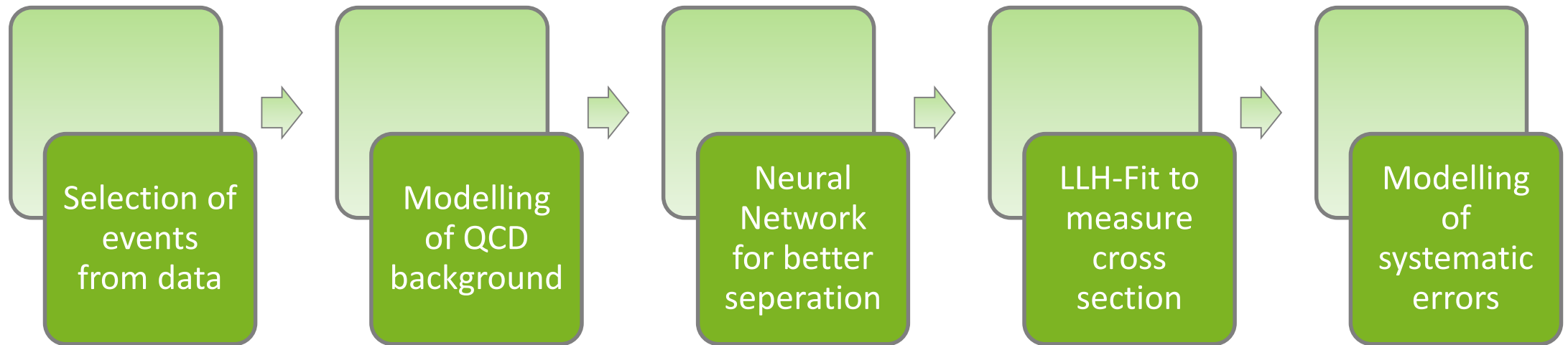
In order to now calculate the cross section, a scaling factor for the signal process is extracted with a likelihood fit

$$\mathcal{L}(\beta^s, \beta_i^b) = \prod_k \mathcal{P}(n_k; \mu_k(\beta^s, \beta_i^b)) \cdot \prod_i \mathcal{G}(\beta_i^b; 1, \delta_i)$$

$$\mathcal{P}(n_k; \mu_k) = \frac{e^{-\mu_k} \cdot \mu_k^{n_k}}{n_k!} \text{ mit } \mu_k = \mu_k^s + \sum_i \mu_{ik}^b \quad \mathcal{G} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta_i^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(\beta_i^b - 1)^2}{2\delta_i^2}\right)$$

$$\sigma(tq + \bar{t}q) = \frac{xsec(tq) + xsec(\bar{t}q)}{\mathcal{B}} \cdot \beta^s$$

The likelihood function for the NN-Out distribution is minimized (the negative natural logarithm of it) and the cross-section can be calculated using this relationship!



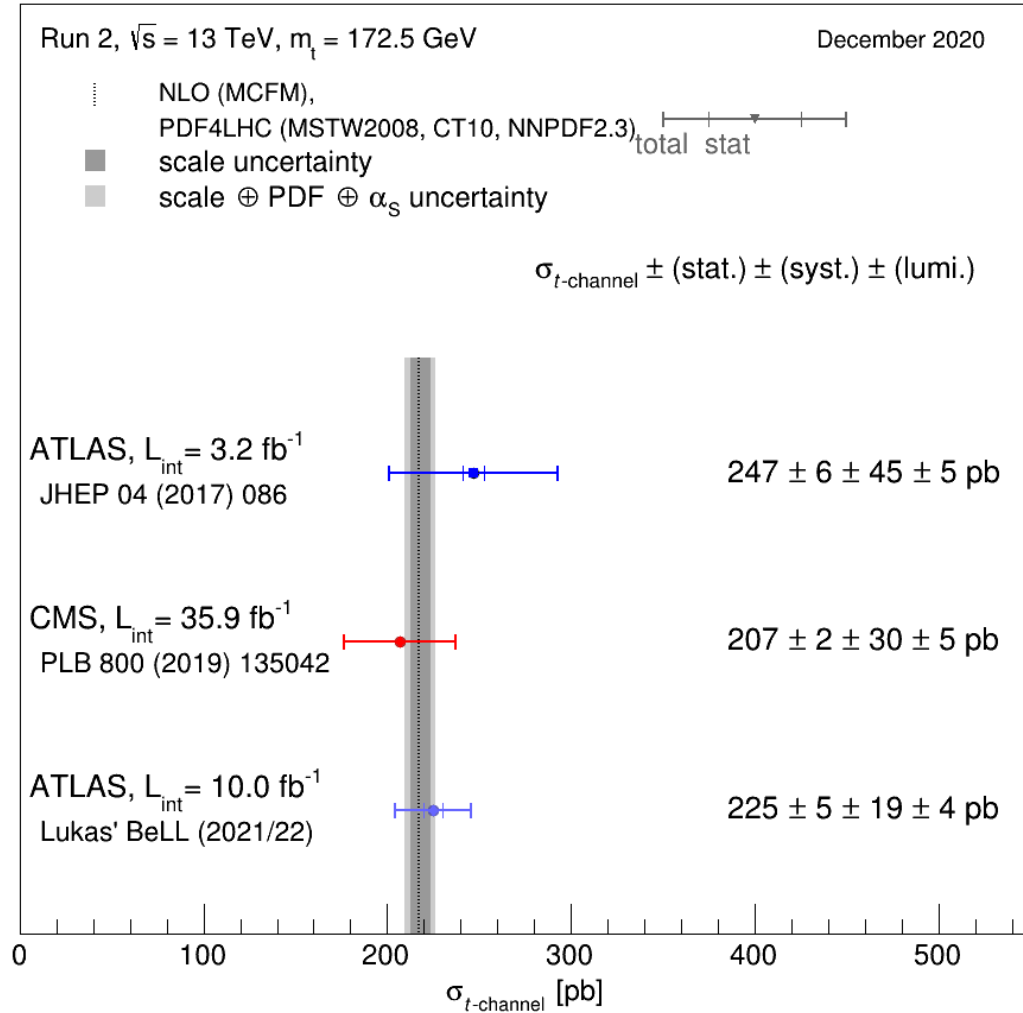
I will have to skip this part due to time constraints!  
In addition, the modeling is highly complex and  
there is really not enough time for it





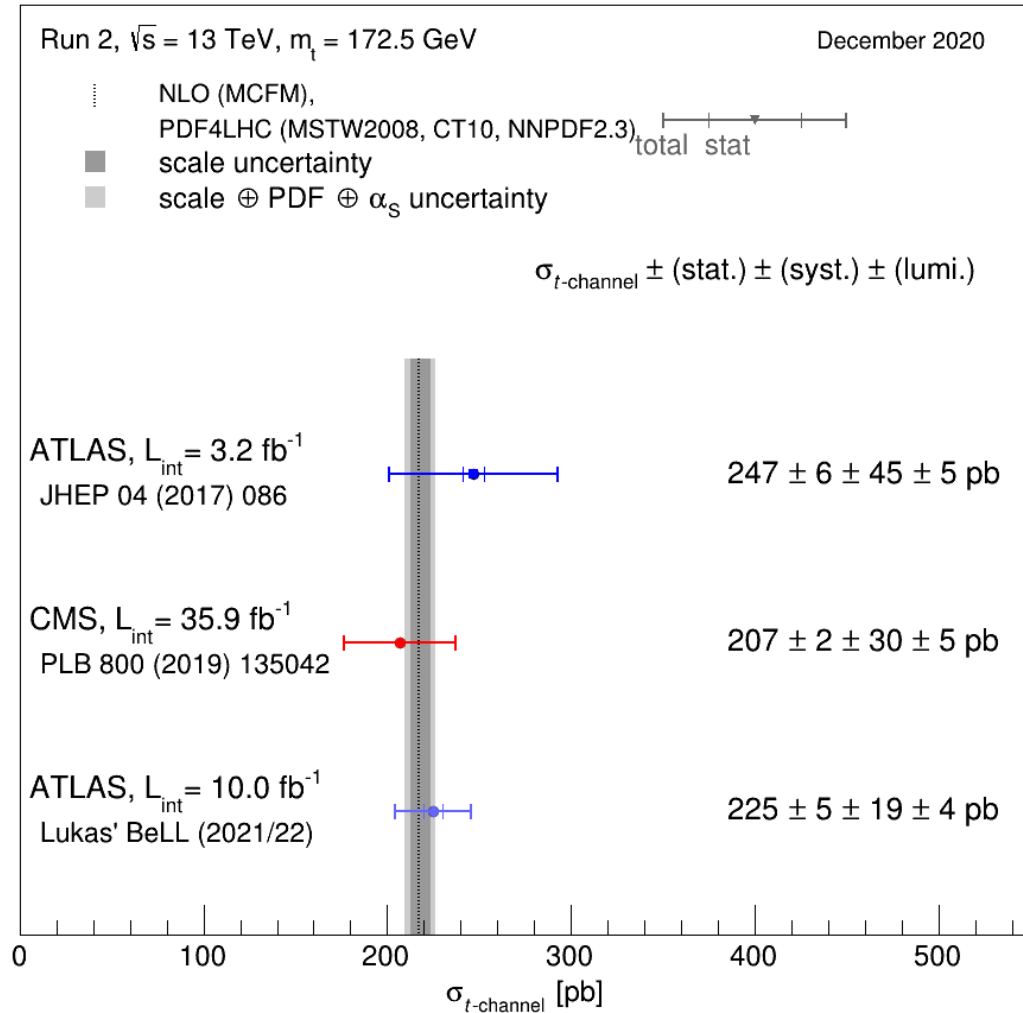
# Summary

Now we finally did it!

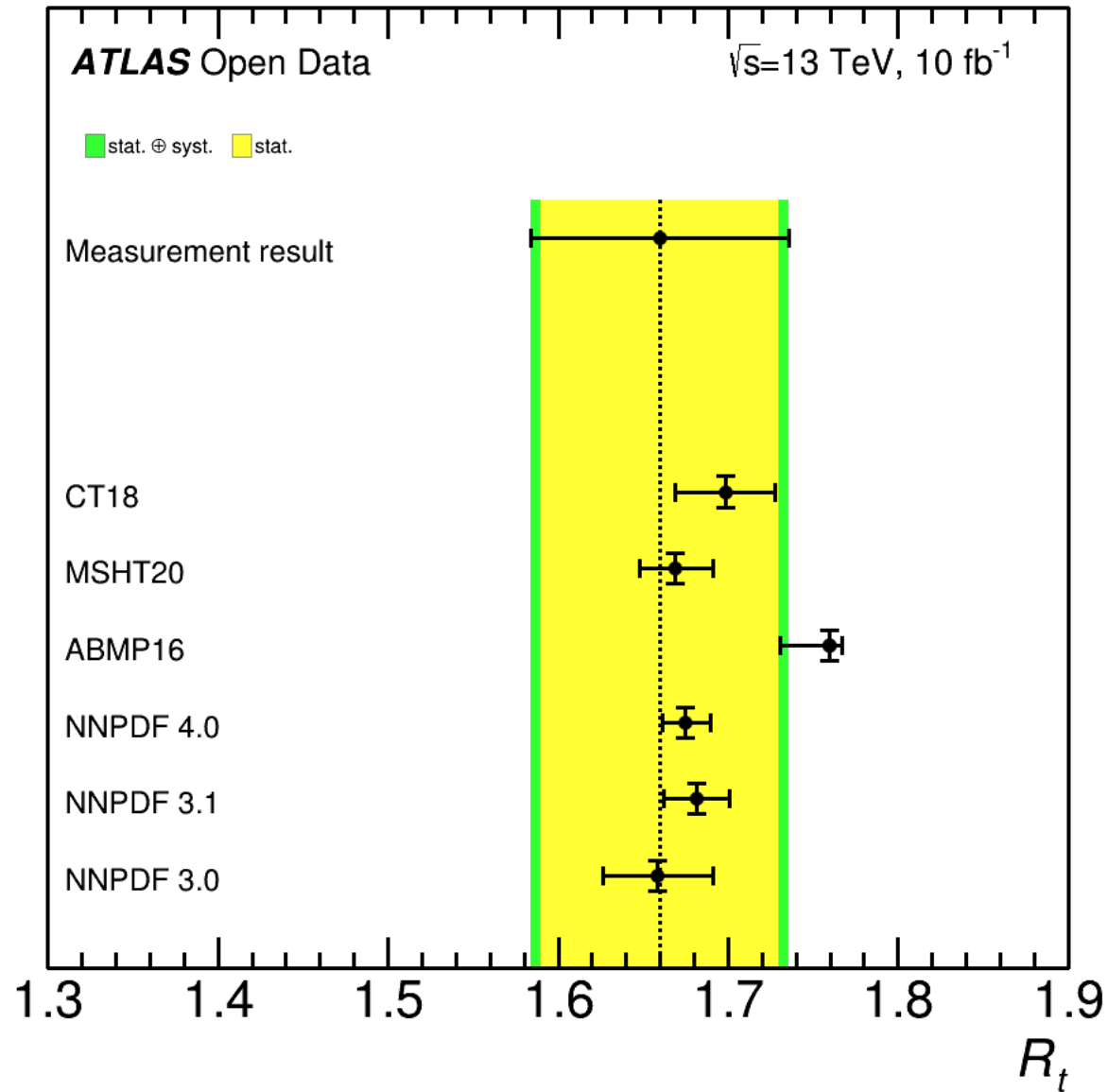


Excellent agreement between the cross-section measured here and the theoretical prediction

Also a good agreement with the other measurements of the collaborations



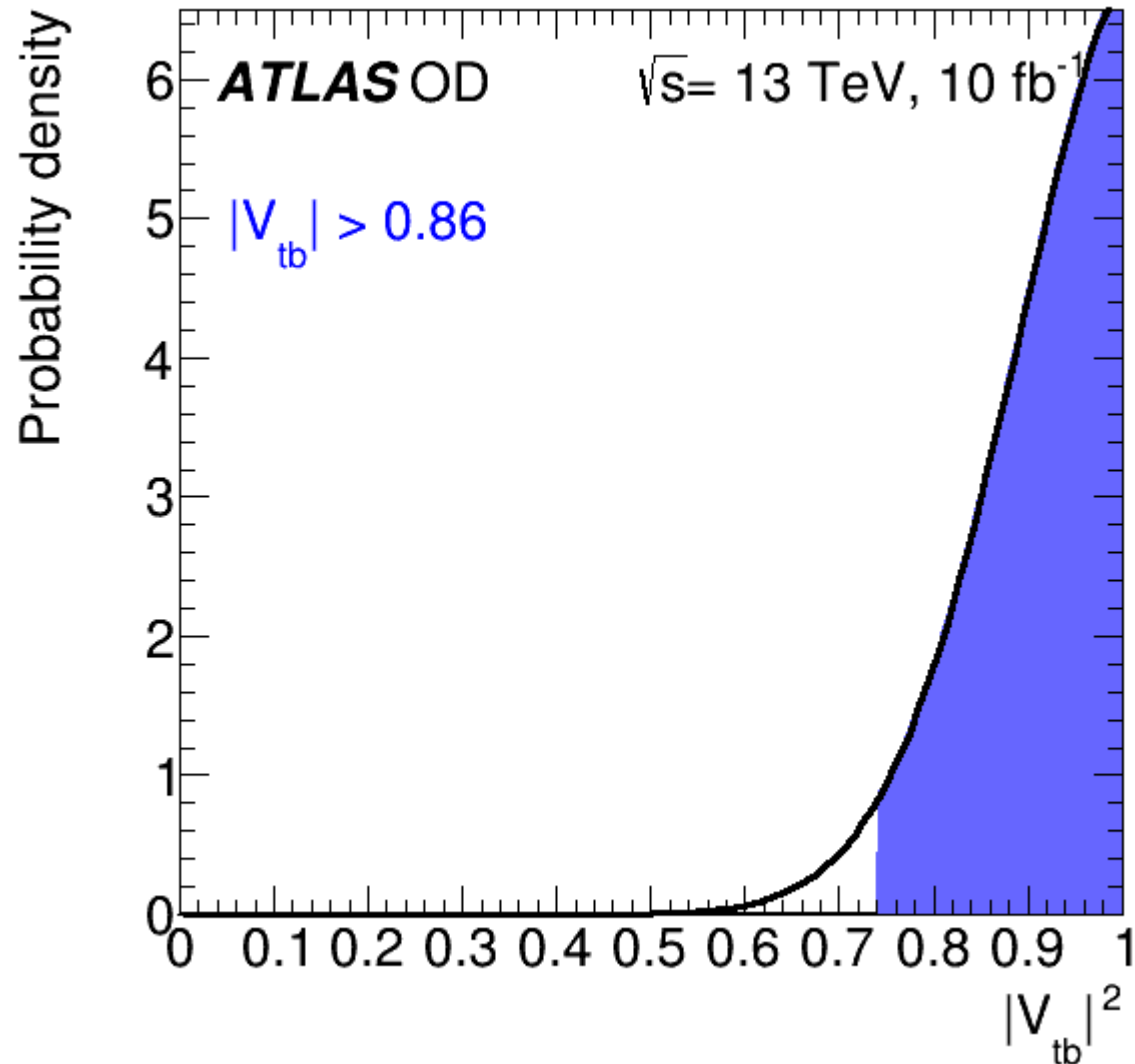
Prozess/Effekt	$\frac{\Delta\sigma(tq)}{\sigma(tq)}$ [%]	$\frac{\Delta\sigma(\bar{t}q)}{\sigma(\bar{t}q)}$ [%]	$\frac{\Delta\sigma(tq+\bar{t}q)}{\sigma(tq+\bar{t}q)}$ [%]	$\frac{\Delta R_T}{R_T}$ [%]
Data statistics	$\pm 2.6$	$\pm 3.3$	$\pm 2.34$	$\pm 4.20$
JES (Jet Energy Scale)	$\pm 11.67$	$\pm 11.04$	$\pm 7.52$	$\pm 0.63$
b-tagging efficiency	$\pm 0.65$	$\pm 0.35$	$\pm 1.31$	$\pm 0.3$
ttbar	$\pm 5.07$	$\pm 5.71$	$\pm 3.80$	$\pm 0.64$
QCD	$\pm 1.18$	$\pm 2.25$	$\pm 1.13$	$\pm 1.07$
wt-channel	$\pm 1.00$	$\pm 0.99$	$\pm 0.70$	$< 0.1$
Z+Jets	$\pm 0.40$	$\pm 0.65$	$\pm 0.37$	$\pm 0.25$
W+Jets	$\pm 2.52$	$\pm 2.46$	$\pm 0.29$	$< 0.1$
Diboson	$\pm 0.35$	$\pm 0.55$	$< 0.1$	$\pm 0.2$
s-channel	$\pm 0.37$	$\pm 0.58$	$< 0.1$	$\pm 0.35$
Luminosity	$\pm 1.8$	$\pm 1.8$	$\pm 1.8$	$\pm 2.55$
Insgesamt:	$\pm 13.47$	$\pm 13.49$	$\pm 9.13$	$\pm 5.14$



Good Agreement  
with the different  
PDFs. Low systematic  
error as expected

Improvement of  
NNPDF clearly visible





Excellent lower limit  
for  $V_{tb}$  (at 95%  
confidence)  $\rightarrow$  good  
check of the SM

$$V_{tb} = 1.02^{+0.068}_{-0.073}$$

14.10.2021

Thanks for your attention!





# Backup Slides



# ATLAS Open Data 13 TeV Datensatz



Final-state categories	Leading object $p_T$ (min) [GeV]	Collection name
$N_\ell = 1$	25	1lep
$N_\ell \geq 2$	25	2lep
$N_\ell = 3$	25	3lep
$N_\ell \geq 4$	25	4lep
$N_{\text{largeRjet}} \geq 1 \ \& \ N_\ell = 1$	250 (large- $R$ jet), 25 (lepton)	1largeRjet1lep
$N_{\tau\text{-had}} = 1 \ \& \ N_\ell = 1$	20 ( $\tau_h$ ), 25 (lepton)	1lep1tau
$N_\gamma \geq 2$	35	GamGam



Electron ( $e$ )	Muon ( $\mu$ )	Photon ( $\gamma$ )
InDet & EMCAL rec. loose identification loose isolation $p_T > 7 \text{ GeV}$ $ \eta  < 2.47$	InDet & MS rec. loose identification loose isolation $p_T > 7 \text{ GeV}$ $ \eta  < 2.5$	InDet & EMCAL rec. tight identification loose isolation $E_T > 25 \text{ GeV}$ $ \eta  < 2.37$
Hadronically decaying $\tau$ -leptons ( $\tau_h$ )	Small- $R$ jets	Large- $R$ jets
InDet & EMCAL rec. medium identification $p_T > 20 \text{ GeV}$ $ \eta  < 2.5$ 1 or 3 associated tracks	EMCAL & HCAL rec. anti- $k_t$ , $R = 0.4$ $p_T > 20 \text{ GeV}$ $ \eta  < 2.5$ $b$ -tagging (MV2c10)	EMCAL & HCAL rec. anti- $k_t$ , $R = 1.0$ $p_T > 250 \text{ GeV}$ $ \eta  < 2.0$ trimming: $R_{\text{sub}} = 0.2$ , $f_{\text{cut}} = 0.05$

# MC simulation samples



Process	Unique “channelNumber”	Generator, hadronisation	Additional information
<i>Top-quark production</i>			
$t\bar{t}$ +jets	410000	POWHEG-BOX v2 [68] + PYTHIA 8 [69]	only $1\ell$ and $2\ell$ decays of $t\bar{t}$ -system
single (anti)top $t$ -channel	(410012) 410011	POWHEG-BOX v1 + PYTHIA 6 [70]	
single (anti)top $Wt$ -channel	(410014) 410013	POWHEG-BOX v2 + PYTHIA 6	
single (anti)top $s$ -channel	(410026) 410025	POWHEG-BOX v2 + PYTHIA 6	
<i>W/Z (+ jets) production</i>			
$Z \rightarrow ee, \mu\mu, \tau\tau$	361106 – 361108	POWHEG-BOX v2 + PYTHIA 8	LO accuracy up to $N_{\text{jets}} = 1$
$W \rightarrow e\nu, \mu\nu, \tau\nu$	361100 – 361105	POWHEG-BOX v2 + PYTHIA 8	LO accuracy up to $N_{\text{jets}} = 1$
$W \rightarrow e\nu, \mu\nu, \tau\nu + \text{jets}$	364156 – 364197	SHERPA 2.2 [71]	LO accuracy up to 3-jets final states
$Z \rightarrow ee, \mu\mu, \tau\tau + \text{jets}$	364100 – 364141	SHERPA 2.2	LO accuracy up to 3-jets final states
<i>Diboson production</i>			
WW	363359, 363360	SHERPA 2.2	$qq'\ell\nu$ final states
WW	363492	SHERPA 2.2	$lv\ell'\nu'$ final states
ZZ	363356	SHERPA 2.2	$qq'\ell^+\ell^-$ final states
ZZ	363490	SHERPA 2.2	$\ell^+\ell^-\ell'^+\ell'^-$ final states
WZ	363358	SHERPA 2.2	$qq'\ell^+\ell^-$ final states
WZ	363489	SHERPA 2.2	$lvqq'$ final states
WZ	363491	SHERPA 2.2	$lv\ell^+\ell^-$ final states
WZ	363493	SHERPA 2.2	$lv\nu\nu'$ final states
<i>SM Higgs production (<math>m_H = 125</math> GeV)</i>			
ggF, $H \rightarrow WW$	345324	POWHEG-BOX v2 + PYTHIA 8	$lv\ell'\nu'$ final states
VBF, $H \rightarrow WW$	345323	POWHEG-BOX v2 + PYTHIA 8	$lv\ell'\nu'$ final states
ggF, $H \rightarrow ZZ$	345060	POWHEG-BOX v2 + PYTHIA 8	$\ell^+\ell^-\ell'^+\ell'^-$ final states
VBF, $H \rightarrow ZZ$	344235	POWHEG-BOX v2 + PYTHIA 8	$\ell^+\ell^-\ell'^+\ell'^-$ final states
ZH, $H \rightarrow ZZ$	341947	PYTHIA 8	$\ell^+\ell^-\ell'^+\ell'^-$ final states
WH, $H \rightarrow ZZ$	341964	PYTHIA 8	$\ell^+\ell^-\ell'^+\ell'^-$ final states
ggF, $H \rightarrow \gamma\gamma$	343981	POWHEG-BOX v2 + PYTHIA 8	
VBF, $H \rightarrow \gamma\gamma$	345041	POWHEG-BOX v2 + PYTHIA 8	
WH(ZH), $H \rightarrow \gamma\gamma$	345318, 345319	POWHEG-BOX v2 + PYTHIA 8	
$t\bar{t}H$ , $H \rightarrow \gamma\gamma$	341081	aMC@NLO [72] + PYTHIA 8	
<i>BSM production</i>			
$Z' \rightarrow t\bar{t}$	301325	PYTHIA 8	$m_{Z'} = 1$ TeV
$\tilde{\ell}\tilde{\ell}' \rightarrow \ell\tilde{\chi}_1^0\ell'\tilde{\chi}_1^{0'}$	392985	aMC@NLO + PYTHIA 8	$m_{\tilde{\ell}} = 600$ GeV, $m_{\tilde{\chi}_1^0} = 300$ GeV

# MC simulation samples



Tuple branch name	C++ type	Variable description
runNumber	int	number uniquely identifying ATLAS data-taking run
eventNumber	int	event number and run number combined uniquely identifies event
channelNumber	int	number uniquely identifying ATLAS simulated dataset
mcWeight	float	weight of a simulated event
XSection	float	total cross-section, including filter efficiency and higher-order correction factor
SumWeights	float	generated sum of weights for MC process
scaleFactor_PILEUP	float	scale-factor for pileup reweighting
scaleFactor_ELE	float	scale-factor for electron efficiency
scaleFactor_MUON	float	scale-factor for muon efficiency
scaleFactor_PHOTON	float	scale-factor for photon efficiency
scaleFactor_TAU	float	scale-factor for tau efficiency
scaleFactor_BTAG	float	scale-factor for $b$ -tagging algorithm @70% efficiency
scaleFactor_LepTRIGGER	float	scale-factor for lepton triggers
scaleFactor_PhotonTRIGGER	float	scale-factor for photon triggers
trigE	bool	boolean whether event passes a single-electron trigger
trigM	bool	boolean whether event passes a single-muon trigger
trigP	bool	boolean whether event passes a diphoton trigger
lep_n	int	number of pre-selected leptons
lep_truthMatched	vector<bool>	boolean indicating whether the lepton is matched to a simulated lepton
lep_trigMatched	vector<bool>	boolean indicating whether the lepton is the one triggering the event
lep_pt	vector<float>	transverse momentum of the lepton
lep_eta	vector<float>	pseudo-rapidity, $\eta$ , of the lepton
lep_phi	vector<float>	azimuthal angle, $\phi$ , of the lepton
lep_E	vector<float>	energy of the lepton
lep_z0	vector<float>	$z$ -coordinate of the track associated to the lepton wrt. primary vertex
lep_charge	vector<int>	charge of the lepton
lep_type	vector<int>	number signifying the lepton type ( $e$ or $\mu$ )
lep_isTightID	vector<bool>	boolean indicating whether lepton satisfies tight ID reconstruction criteria
lep_ptcone30	vector<float>	scalar sum of track $p_T$ in a cone of $R=0.3$ around lepton, used for tracking isolation
lep_etcone20	vector<float>	scalar sum of track $E_T$ in a cone of $R=0.2$ around lepton, used for calorimeter isolation
lep_trackd0pvunbiased	vector<float>	$d_0$ of track associated to lepton at point of closest approach (p.c.a.)
lep_tracksigd0pvunbiased	vector<float>	$d_0$ significance of the track associated to lepton at the p.c.a.
met_et	float	transverse energy of the missing momentum vector
met_phi	float	azimuthal angle of the missing momentum vector
jet_n	int	number of pre-selected jets
jet_pt	vector<float>	transverse momentum of the jet
jet_eta	vector<float>	pseudo-rapidity, $\eta$ , of the jet
jet_phi	vector<float>	azimuthal angle, $\phi$ , of the jet
jet_E	vector<float>	energy of the jet
jet_jvt	vector<float>	jet vertex tagger discriminant [21] of the jet
jet_trueflav	vector<int>	flavour of the simulated jet
jet_truthMatched	vector<bool>	boolean indicating whether the jet is matched to a simulated jet
jet_MV2c10	vector<float>	output from the multivariate $b$ -tagging algorithm [22] of the jet

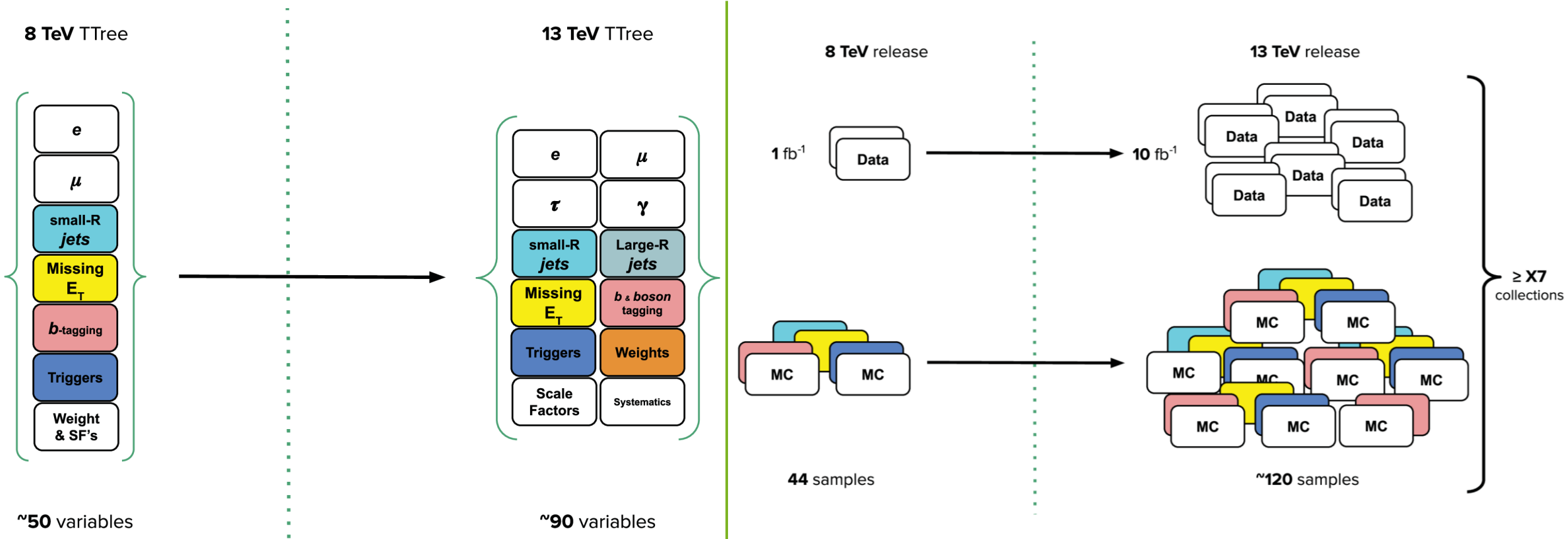


# MC simulation samples



Tuple branch name	C++ type	Variable description
photon_n	int	number of pre-selected photons
photon_truthMatched	vector<bool>	boolean indicating whether the photon is matched to a simulated photon
photon_trigMatched	vector<bool>	boolean indicating whether the photon is the one triggering the event
photon_pt	vector<float>	transverse momentum of the photon
photon_eta	vector<float>	pseudo-rapidity of the photon
photon_phi	vector<float>	azimuthal angle of the photon
photon_E	vector<float>	energy of the photon
photon_isTightID	vector<bool>	boolean indicating whether photon satisfies tight identification reconstruction criteria
photon_ptcone30	vector<float>	scalar sum of track $p_T$ in a cone of $R=0.3$ around photon
photon_etcone20	vector<float>	scalar sum of track $E_T$ in a cone of $R=0.2$ around photon
photon_convType	vector<int>	information whether and where the photon was converted
largeRjet_n	int	number of pre-selected large- $R$ jets
largeRjet_pt	vector<float>	transverse momentum of the large- $R$ jet
largeRjet_eta	vector<float>	pseudo-rapidity of the large- $R$ jet
largeRjet_phi	vector<float>	azimuthal angle of the large- $R$ jet
largeRjet_E	vector<float>	energy of the large- $R$ jet
largeRjet_m	vector<float>	invariant mass of the large- $R$ jet
largeRjet_truthMatched	vector<int>	information whether the large- $R$ jet is matched to a simulated large- $R$ jet
largeRjet_D2	vector<float>	weight from algorithm [57] for $W/Z$ -boson tagging
largeRjet_tau32	vector<float>	weight from algorithm [57] for top-quark tagging
tau_n	int	number of pre-selected hadronically decaying $\tau$ -lepton
tau_pt	vector<float>	transverse momentum of the hadronically decaying $\tau$ -lepton
tau_eta	vector<float>	pseudo-rapidity of the hadronically decaying $\tau$ -lepton
tau_phi	vector<float>	azimuthal angle of the hadronically decaying $\tau$ -lepton
tau_E	vector<float>	energy of the hadronically decaying $\tau$ -lepton
tau_charge	vector<int>	charge of the hadronically decaying $\tau$ -lepton
tau_isTightID	vector<bool>	boolean indicating whether hadronically decaying $\tau$ -lepton satisfies tight ID reconstruction criteria
tau_truthMatched	vector<bool>	boolean indicating whether the hadronically decaying $\tau$ -lepton is matched to a simulated $\tau$ -lepton
tau_trigMatched	vector<bool>	boolean signifying whether the $\tau$ -lepton is the one triggering the event
tau_nTracks	vector<int>	number of tracks in the hadronically decaying $\tau$ -lepton decay
tau_BDTid	vector<float>	output of the multivariate algorithm [24] discriminating hadronically decaying $\tau$ -leptons from jets
ditau_m	float	di- $\tau$ invariant mass using the missing-mass calculator [54]
lep_pt_syst	vector<float>	single component syst. uncert. (lepton momentum scale and resolution [36,15]) affecting lep_pt
met_et_syst	float	single component syst. uncert. ( $E_T^{\text{miss}}$ scale and resolution [30]) affecting met_pt
jet_pt_syst	vector<float>	single component syst. uncert. (jet energy scale [37]) affecting jet_pt
photon_pt_syst	vector<float>	single component syst. uncert. (photon energy scale and resolution [16]) affecting photon_pt
largeRjet_pt_syst	vector<float>	single component syst. uncert. (large- $R$ jet energy resolution [37]) affecting largeRjet_pt
tau_pt_syst	vector<float>	single component syst. uncert. ( $\tau$ -lepton reconstruction and energy scale [24]) affecting tau_pt

# Evolution of ATLAS Open Data





# Rekonstruktion der B-Jets

mv2c10 Algorithmus

# Rekonstruktion der B-Jets



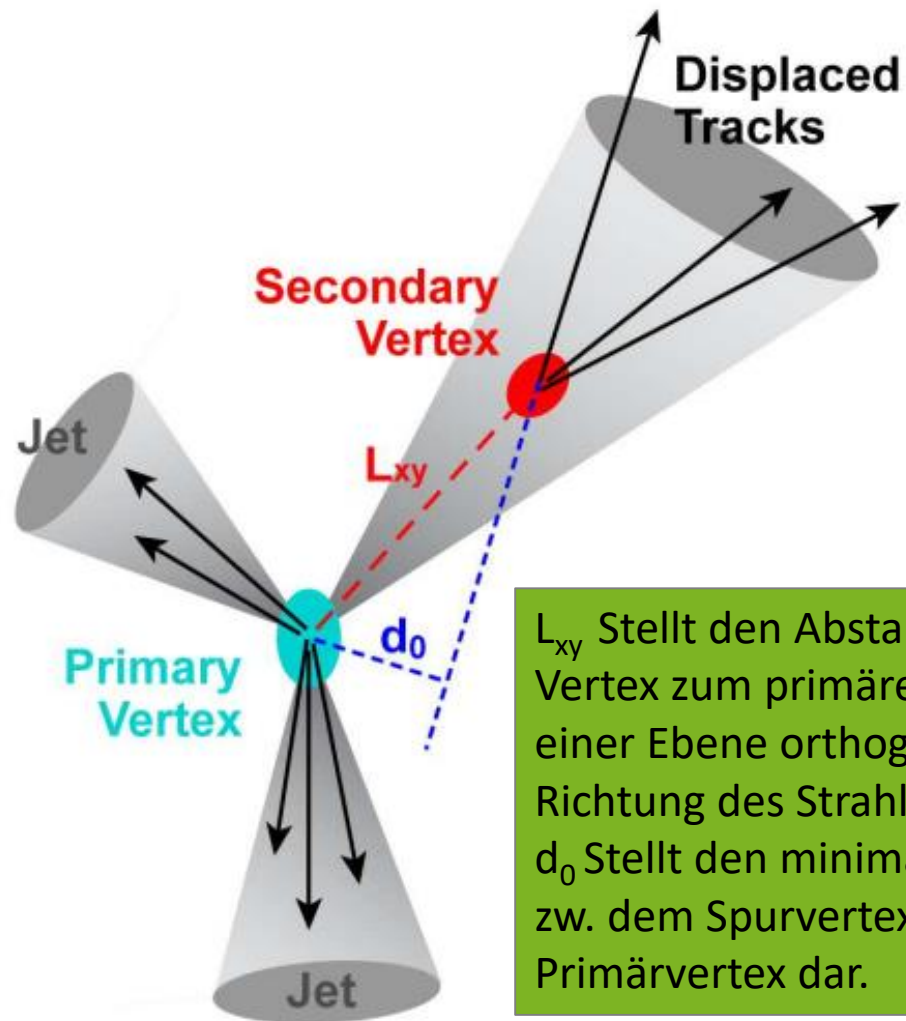
Die sogenannten B-Jets haben spezifische Eigenschaften:

- lange Lebensdauer
- große B-Hadron-Masse
- ein großes Verzweigungsverhältnis in Leptonen.

→ Diese Methode wird als B-Tagging bezeichnet.

Das Tagging von Jets aus schweren Quarks (b, c) kann in drei verschiedenen Weisen durchgeführt werden:

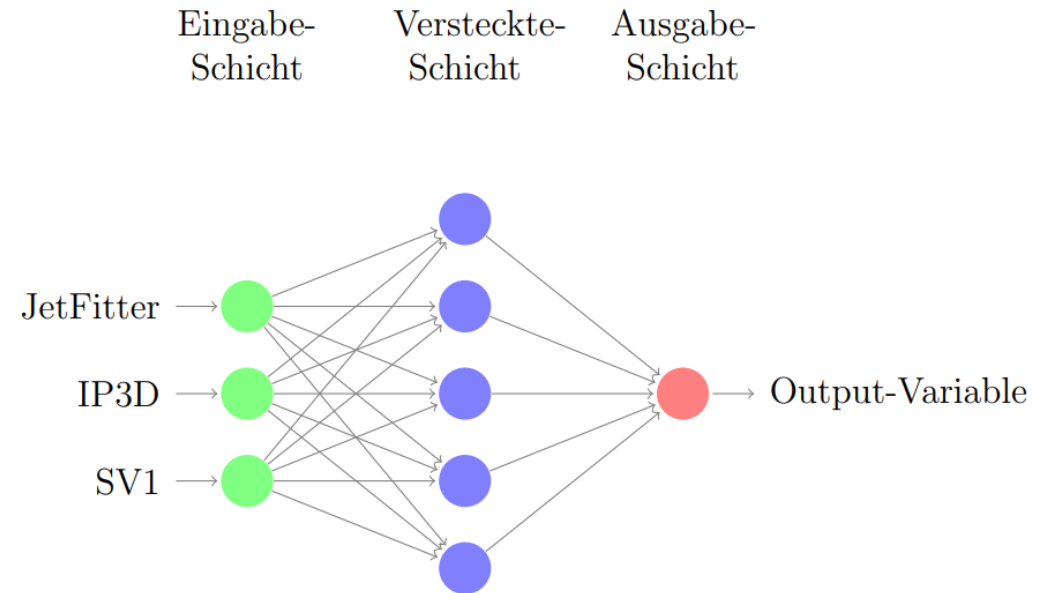
- Durch die Identifikation von Myonen oder Elektronen, die aus den schwachen Zerfall des Bottom oder Charm-Quarks innerhalb des Jets entstanden sind
- Durch die Rekonstruktion eines sekundären Vertex in einem Jet, aufgrund des Zerfalls von schweren Hadronen
- Durch die Identifikation der Spuren innerhalb der Jets, die den primären Vertex nicht kreuzen.



$L_{xy}$  Stellt den Abstand des sek. Vertex zum primären Vertex in einer Ebene orthogonal zur Richtung des Strahls dar.  $d_0$  Stellt den minimalen Abstand zw. dem Spurvertex und dem Primärvertex dar.



- Um die B-Jets zu rekonstruieren wird eine Kombination aus drei B-Tagging-Algorithmen verwendet
- Der mv2c10 Algorithmus basiert auf einem Neuronen Netzwerk, das die Ausgangs-Gewichte der drei B-Tagging-Algorithmen als Input-Variable verwendet



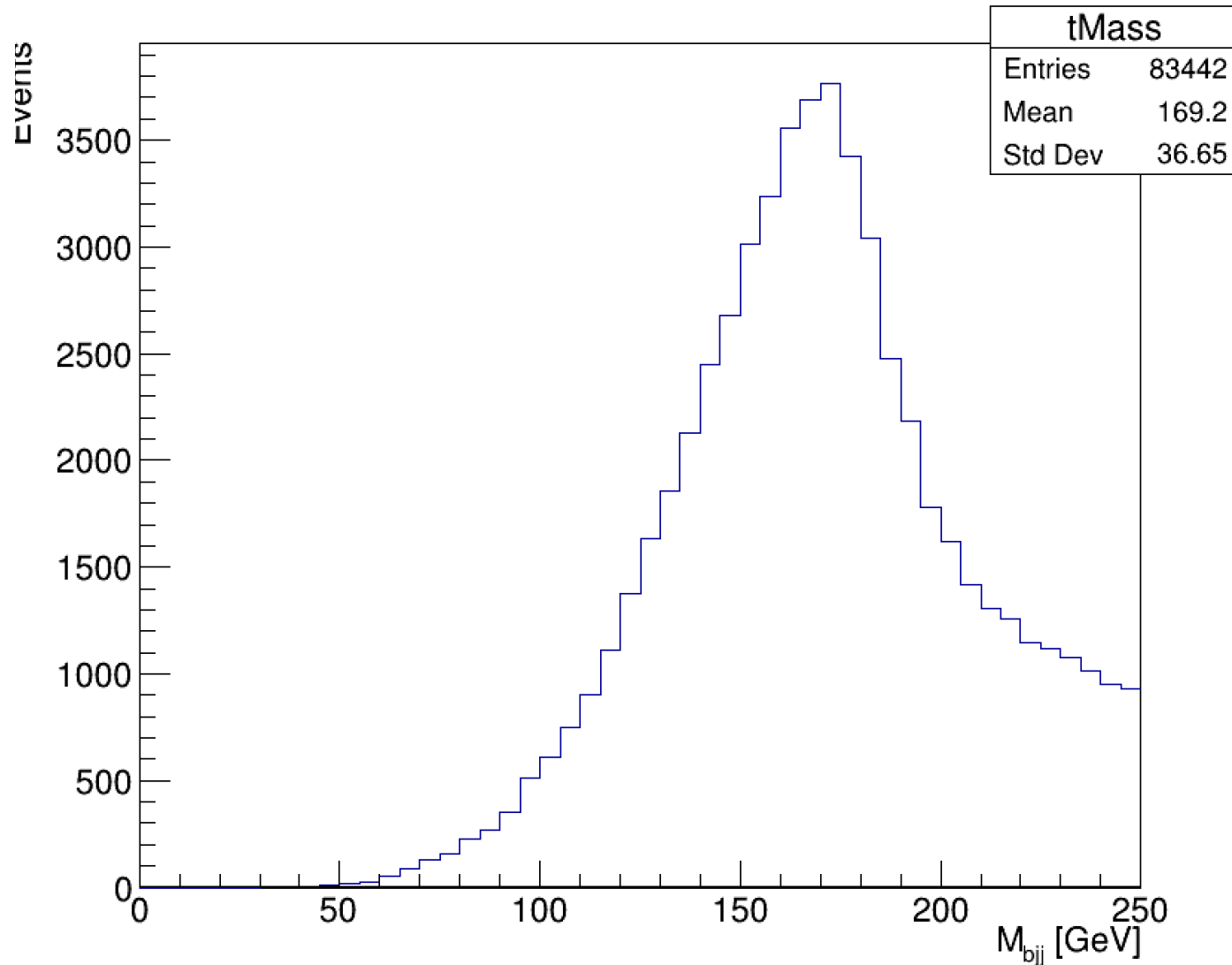
Der mv2c10-Tagger besitzt die beste Performance unter den Tagger-Algorithmen beim ATLAS-Detektor



# Monte-Carlo Simulationen



## Invariant Mass of the t Candidate



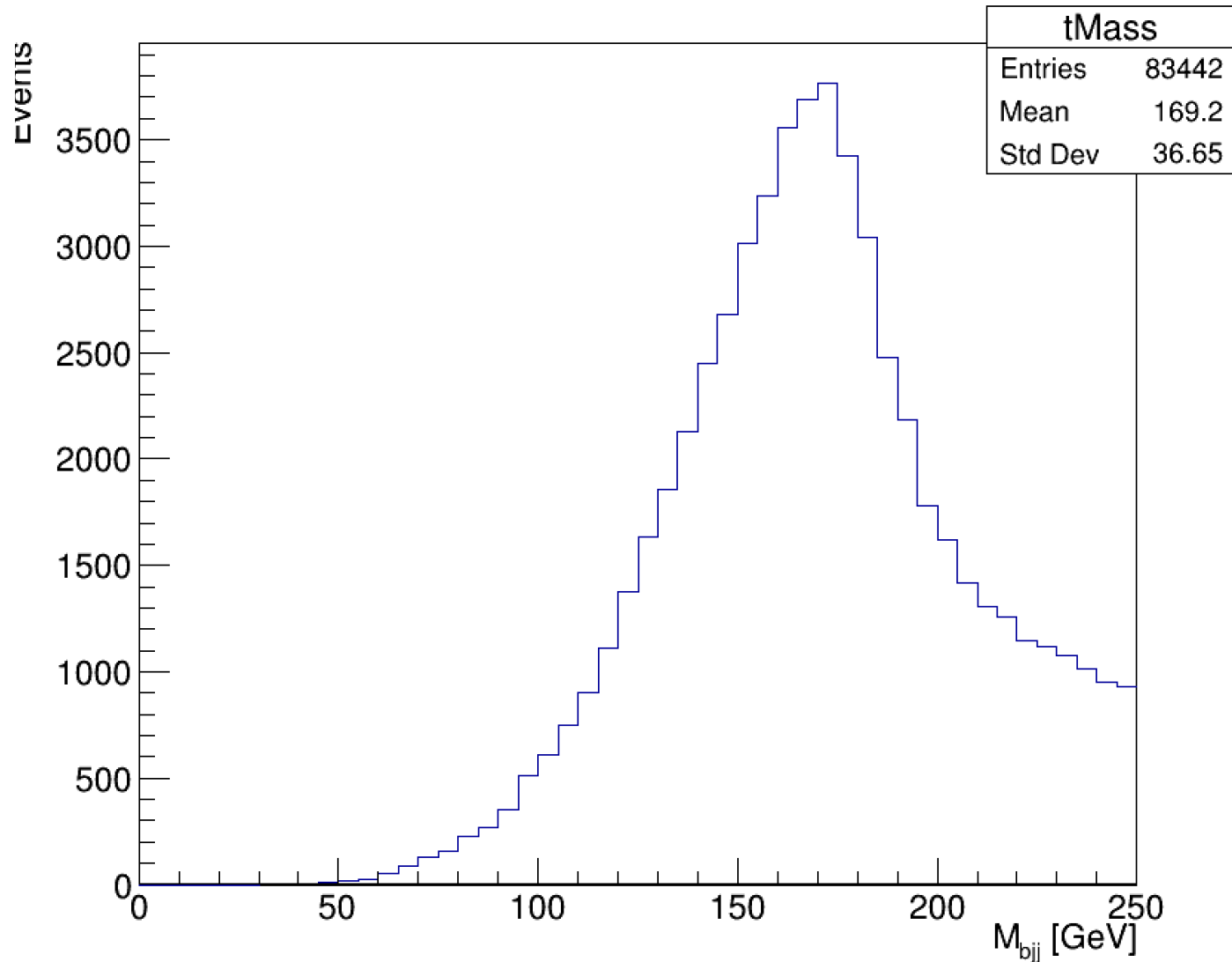
Das sind die rohen Daten, wenn man noch keine Monte-Carlo Simulationen im Histogramm hinzugefügt hat. Sieht ja schonmal gut aus, schöner Peak bei gewünschter Masse! Doch wir wissen ja, dass wir nicht nur unser Signalereignis gefunden haben sondern auch Untergrundprozesse!

Wie trennt man also zwischen den Untergrundprozessen und den Signalereignissen?





## Invariant Mass of the t Candidate



Simulationen (Monte-Carlo)  
Wir simulieren, wie viele Ereignisse welchen Typs wir erwarten und können so sehen, ob unsere Messungen die Simulationen widerspiegeln!





## ATLAS Monte Carlo Event Simulation

Event Generation

Detector Simulation

Digitisation

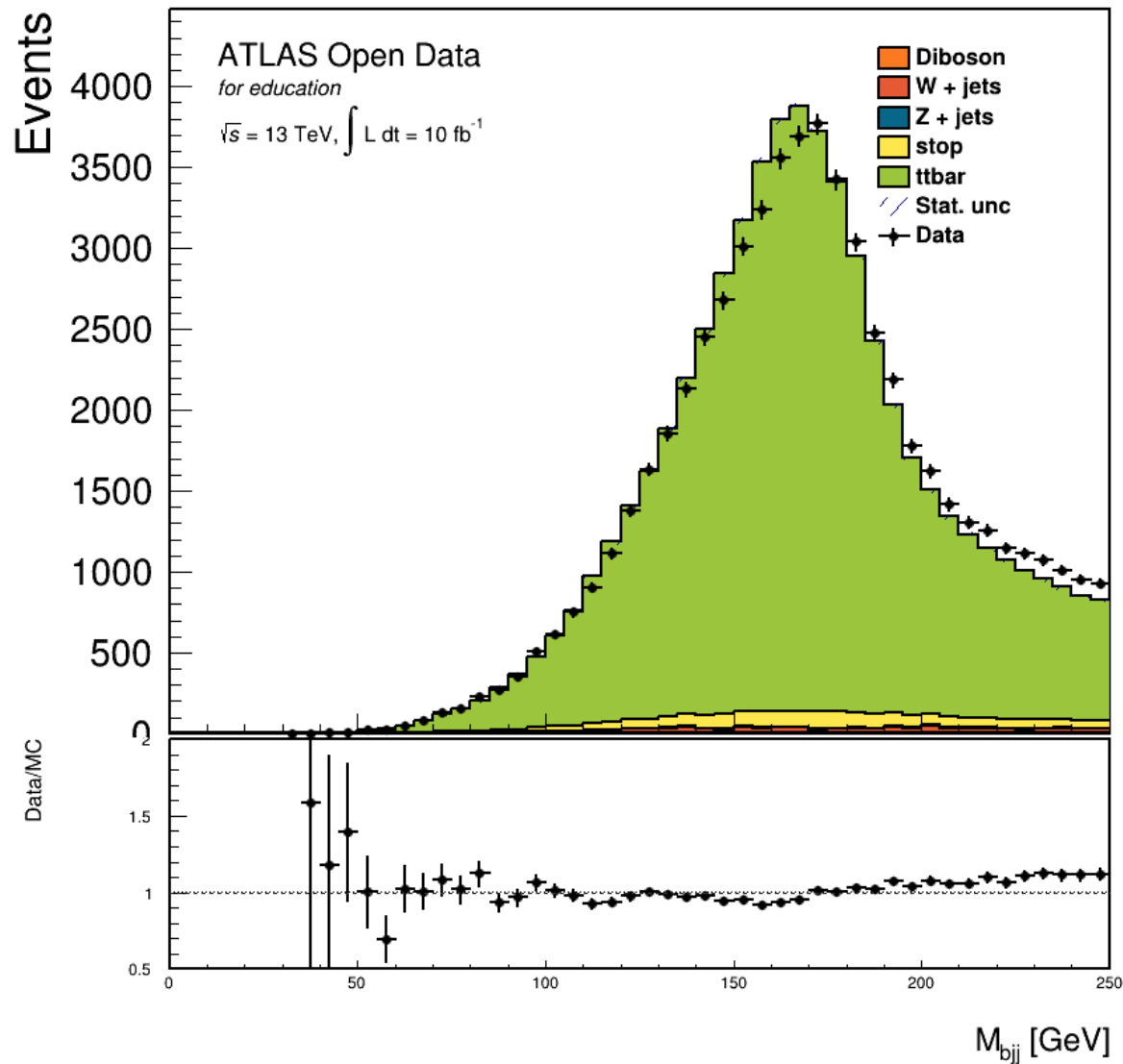
Reconstruction

- Hauptaufgabe der ATLAS-Simulationskette: eine realistische Schätzung der Materialeigenschaften des ATLAS-Detektors und der Reaktion auf die erzeugten Ereignisse
- besteht aus vier genau definierten Schritten
- Die Kette simuliert auch eine Vielzahl von Signal- und Hintergrundphysikprozessen, die am LHC erwartet werden
- Zunächst Ereigniserzeugung mit einem MC-Generator, der die anfängliche pp-Kollision nachahmt und deren Fragmentierungs- und Hadronisierungsstufen umfasst
- Danach folgt die Simulation der Geometrie und der Materialeigenschaften des ATLAS-Detektors
- Sowohl für Daten- als auch für MC-erzeugte Ereignisse wandelt der Digitalisierungsschritt (im echten oder simulierten Detektor) die Ströme und Spannungen in eine Antwort des Auslesesystems Detektors um
- Am Ende werden die Kollisionen rekonstruiert



- Hadronen sind Mesonen (bestehen aus einem Quark-Antiquark-Paar) und Baryonen (bestehen aus drei Quarks oder aus drei Antiquarks [Antibaryonen])
- Auch die Protonen, die im LHC zur Kollision gebracht werden sind Hadronen, insbesondere sind sie Baryonen
- Hadronisierung ist der Vorgang, bei dem sich die Quarks hadronisch binden und sich in Mesonen gruppieren





Das sieht doch schon deutlich besser aus!  
Jetzt können wir also auch sehen, was für  
Untergrundprozesse mitgemessen wurden  
(tatsächlich nicht sehr viele).



# Der Large Hadron Collider

# Der Large Hadron Collider



Der LHC befindet sich am CERN in der Nähe von Genf und ist das größte je von Menschen konstruierte Experiment

Übrigens: CERN steht für *Conseil européen pour la recherche nucléaire*

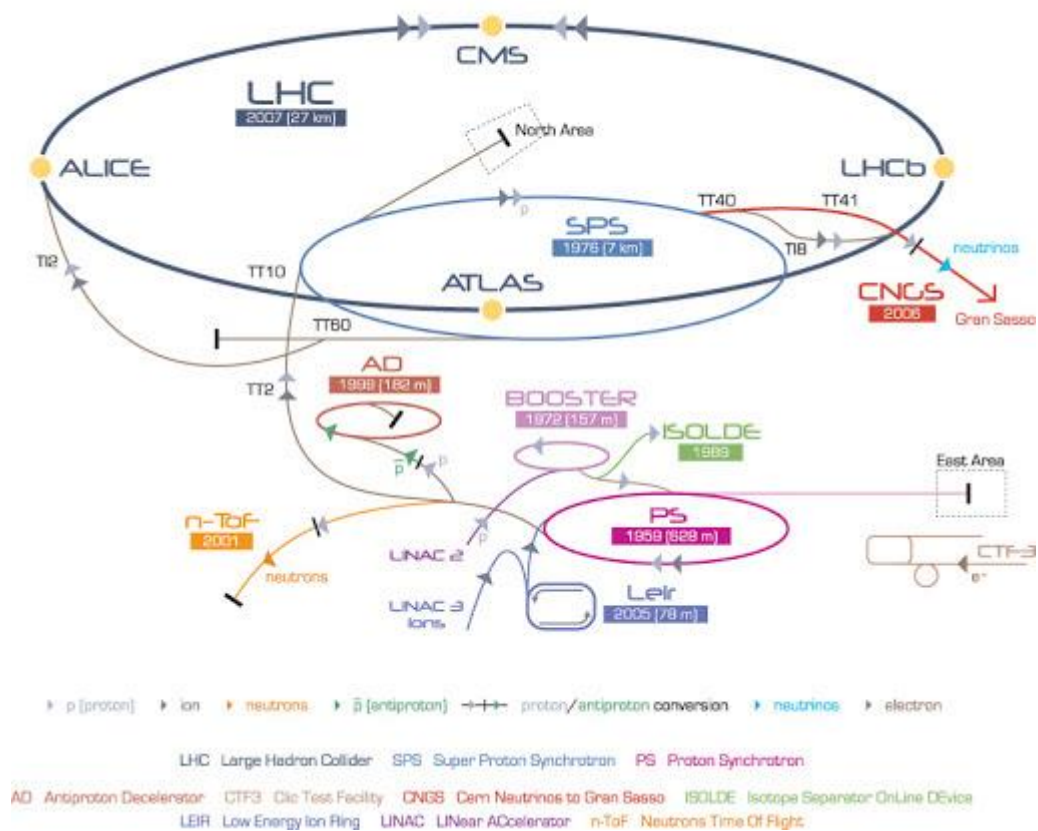
Weil ich kein Französisch spreche nutze ich aber auch gerne den englischen Begriff: European Organization for Nuclear Research



# Der Large Hadron Collider



CERN Accelerator Complex

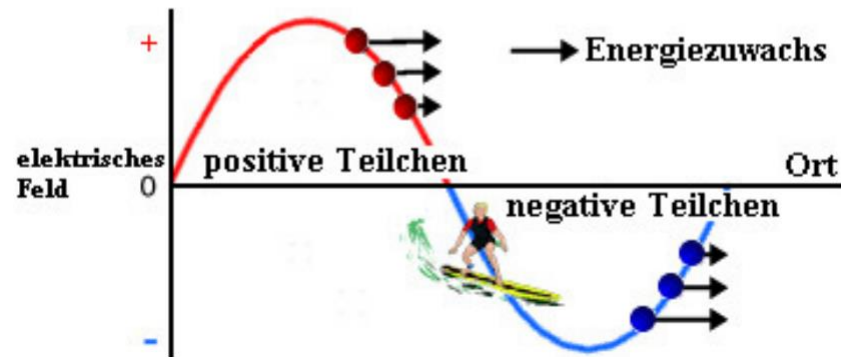


- Der LHC befindet sich ca. 100m unter der Erde
- Mit einem Umfang von ca. 27 Kilometern ist der LHC eine wirklich gigantische Maschine
- Im LHC kreisen Protonen oder Bleiatomkerne mit einer enormen Energie (aktuell mit ca. 13 TeV) und werden dabei beinahe auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt (10.000 Runden pro Sekunde) und an vier Punkten zur Kollision gebracht
- Diese enorme Energiedichte reicht zeitlich sehr nah an den Urknall heran ( $10^{-13}$  bis  $10^{-14}$  s), bei diesen Energien entstehen Teilchen, die in unserer Alltagswelt nicht entstehen
- Aufgrund der Größe kreisen nicht einzelne Protonen sondern „Bunches“, jeder Strahl hat ca. 2800 dieser „Bunches“ und jedes dieser „Bunches“ hat ca. 100 Milliarden Protonen (klingt viel aber:  $1 \text{ mol} = 6,022 \cdot 10^{23}$ )

Wenn zwei Teilchenpakete kollidieren, geschehen jeweils ca. 30 Kollisionen, da sich nicht alle Protonen treffen . Dabei entstehen aus der Energie der Protonen viele neue Teilchen, deren Eigenschaften in Detektoren vermessen werden können (in meinem Fall der ATLAS-Detektor)!



Beschleunigt werden die Teilchen in den sogenannten  
Hohlraumresonatoren



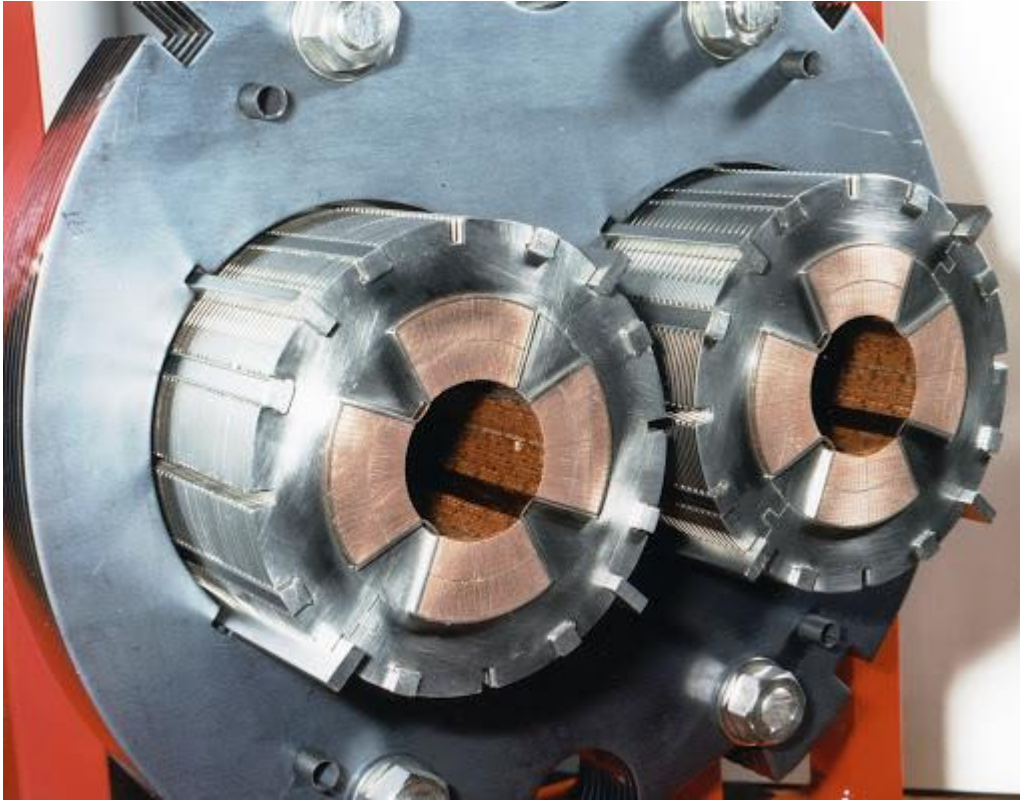


Beschleunigt werden die Teilchen in den sogenannten Hohlraumresonatoren

Auf die Kreisbahn des LHC werden die Teilchen von den Dipol-Magneten gelenkt (werden auf  $-271^{\circ}\text{C}$  gekühlt)







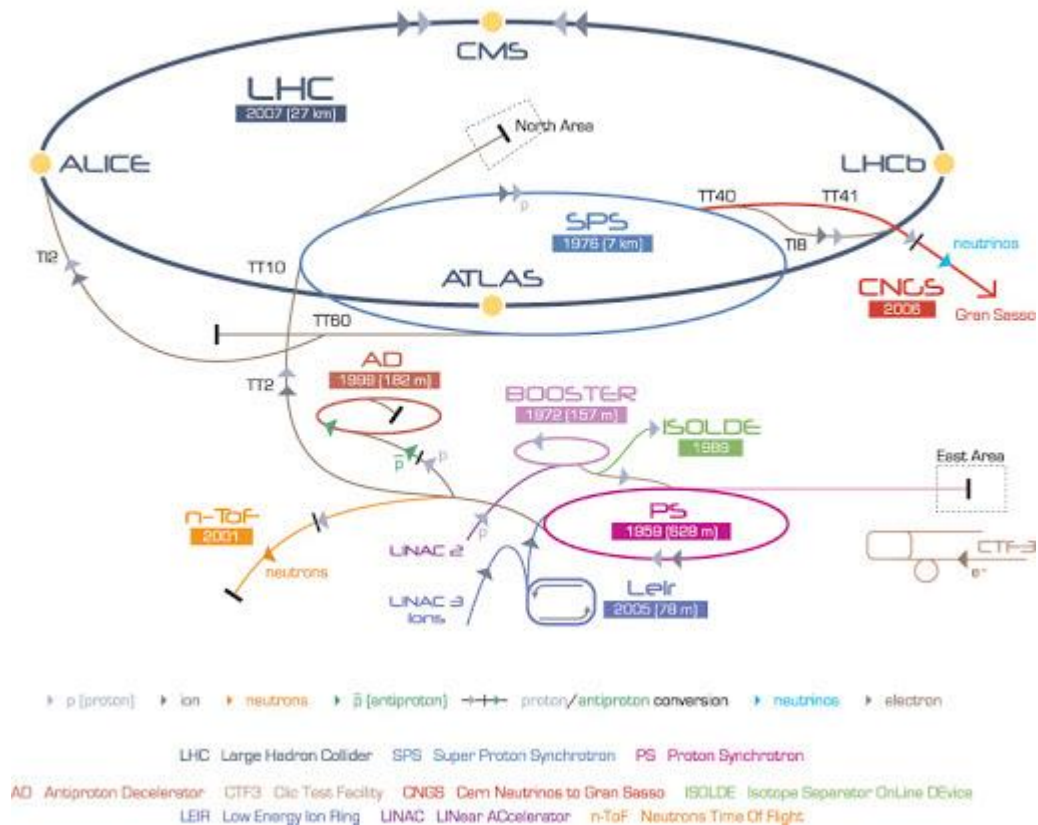
Beschleunigt werden die Teilchen in den sogenannten Hohlraumresonatoren

Auf die Kreisbahn des LHC werden die Teilchen von den Dipol-Magneten gelenkt (werden auf  $-271^{\circ}\text{C}$  gekühlt)

Die Quadropol-Magnete fokussieren den Teilchenstrahl auf wenige tausendstel Millimeter



CERN Accelerator Complex



Beschleunigt werden die Teilchen in den sogenannten Hohlraumresonatoren

Auf die Kreisbahn des LHC werden die Teilchen von den Dipol-Magneten gelenkt (werden auf  $-271^{\circ}\text{C}$  gekühlt)

Die Quadropol-Magnete fokussieren den Teilchenstrahl auf wenige tausendstel Millimeter

Wäre der LHC „noch kleiner“ müssten die Magnete noch stärker sein, was nach dem heutigen Stand der Technik schlicht nicht möglich ist.

Aber ein noch größerer und Energiereicherer Beschleuniger der FCC (Future Circular Collider) ist bereits in Planung und teilweise im Bau.



Bei den Kollisionen entstehen so viele Daten, dass aussortiert werden muss. Die Daten müssen bestimmte Qualitätskriterien erfüllen und zudem werden nicht interessante Daten aussortiert. (Trigger etc.)



Dennoch produziert der LHC jedes Jahr ca. 15 Millionen Gigabyte an Daten, die auf das weltweite Rechnernetz verteilt werden und dann den Wissenschaftlern zur Analyse bereitgestellt werden.

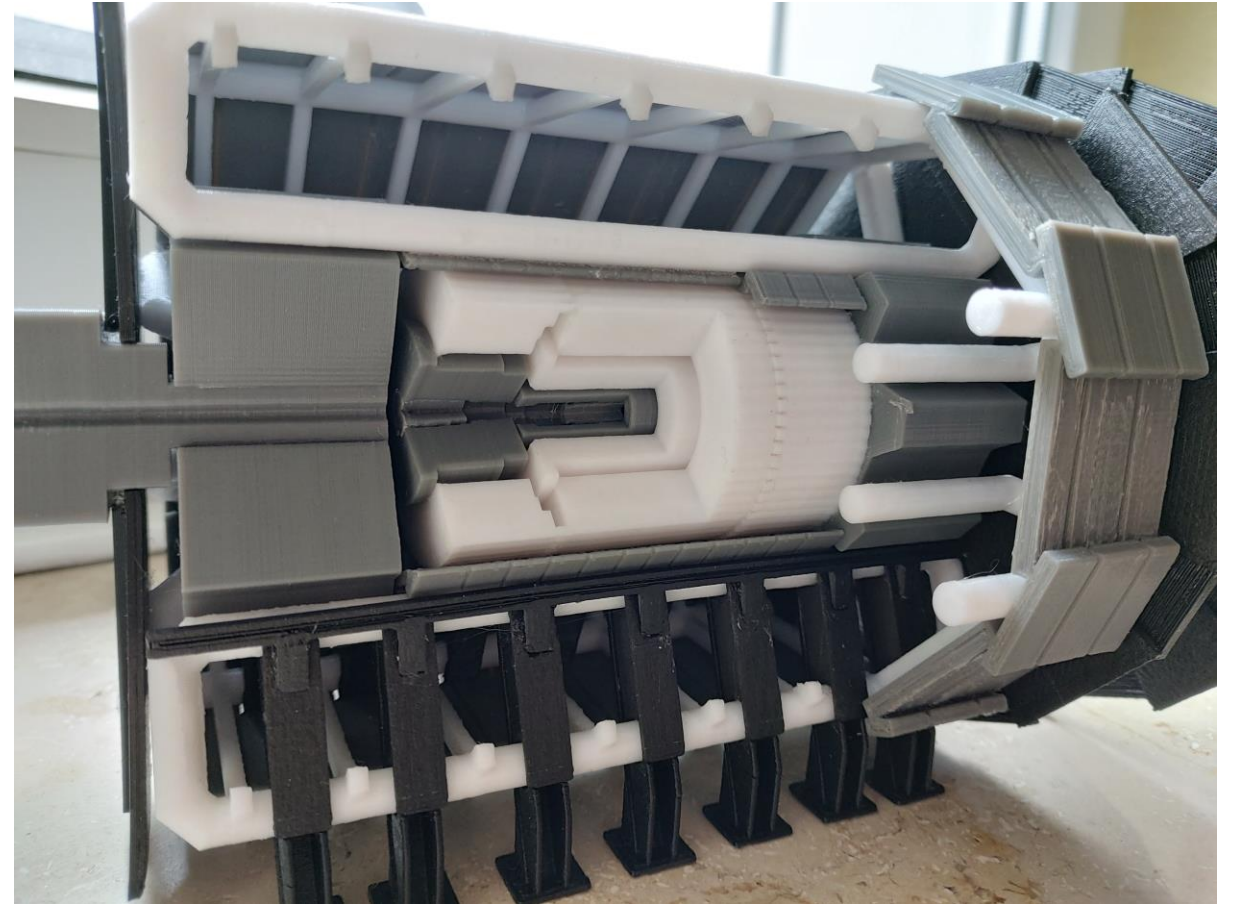
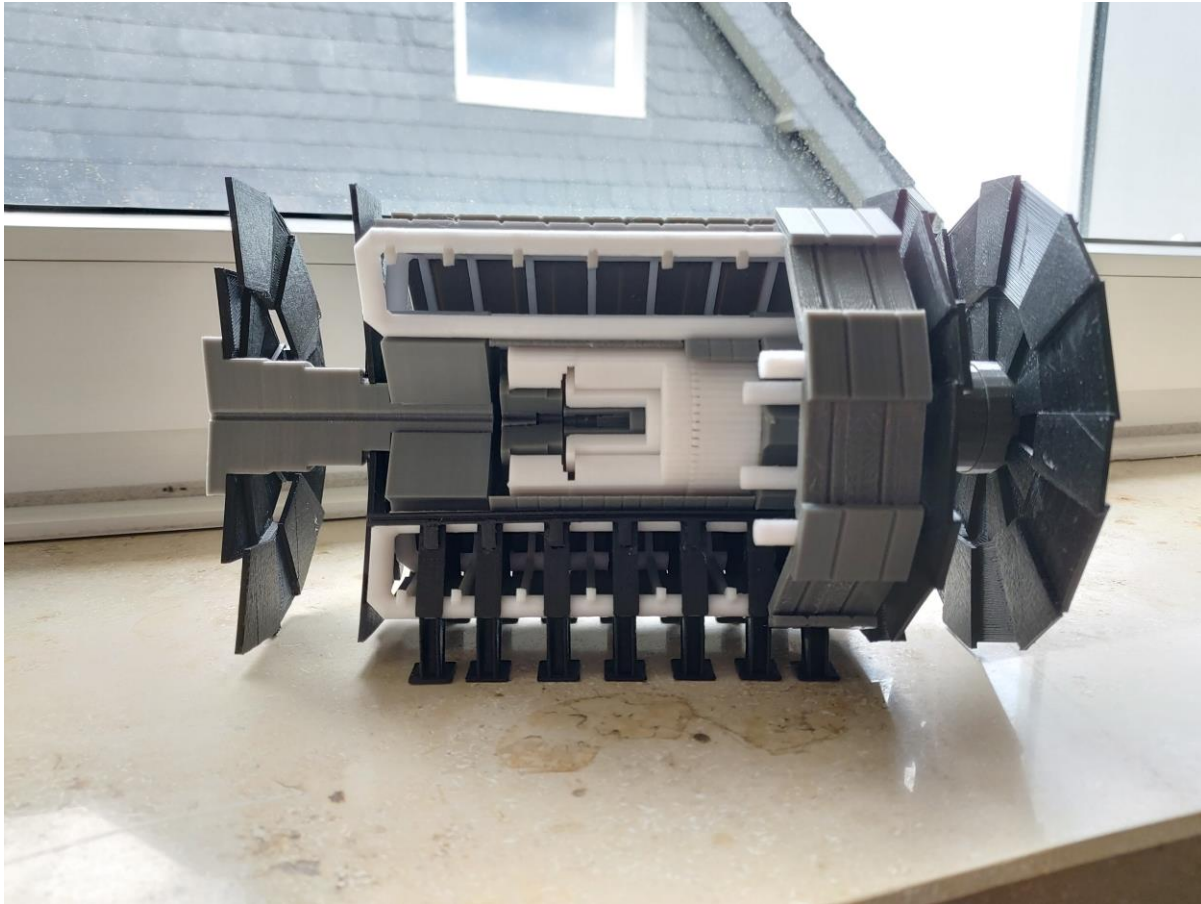




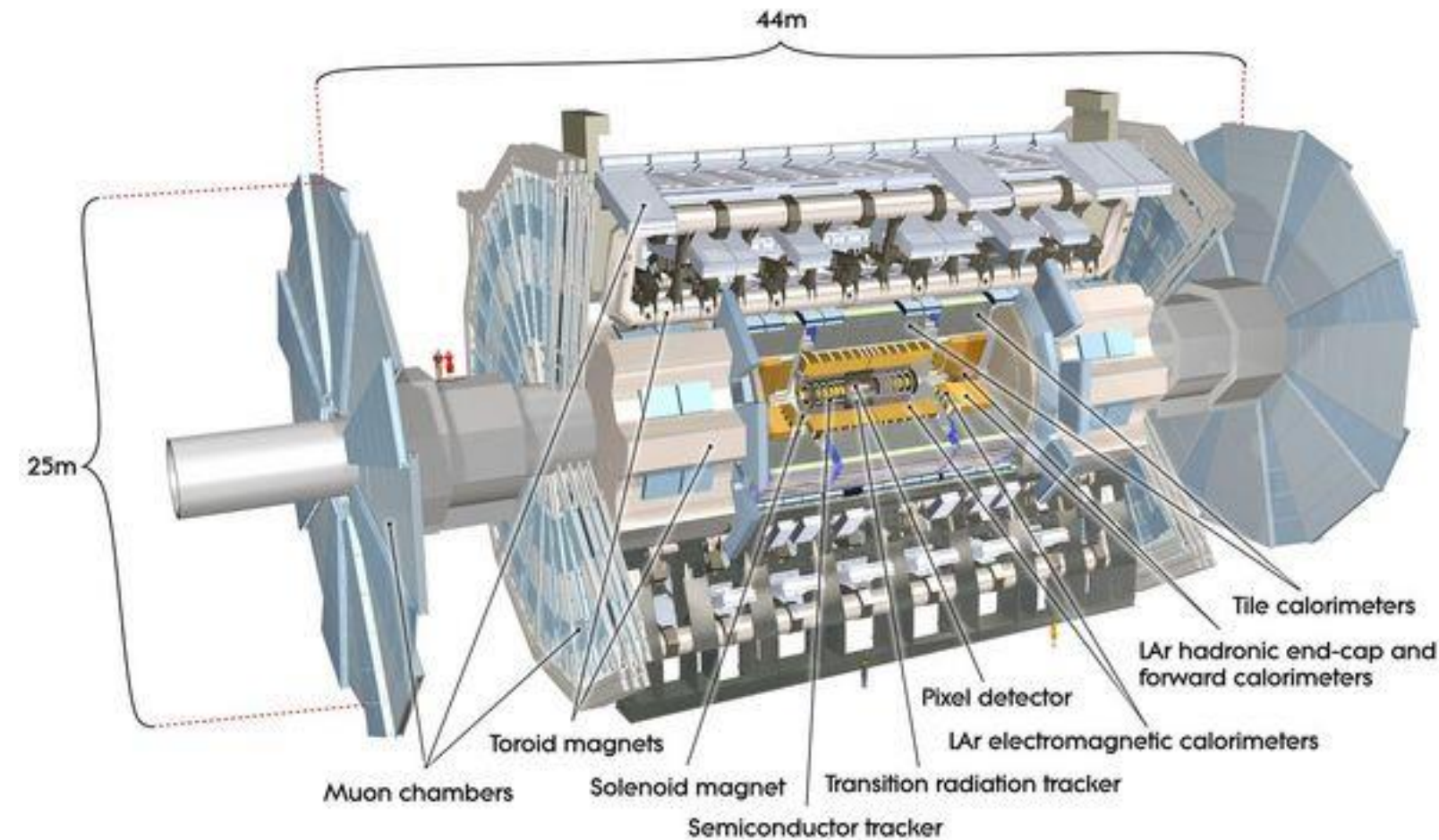
# Der ATLAS-Detektor



# Der ATLAS-Detektor



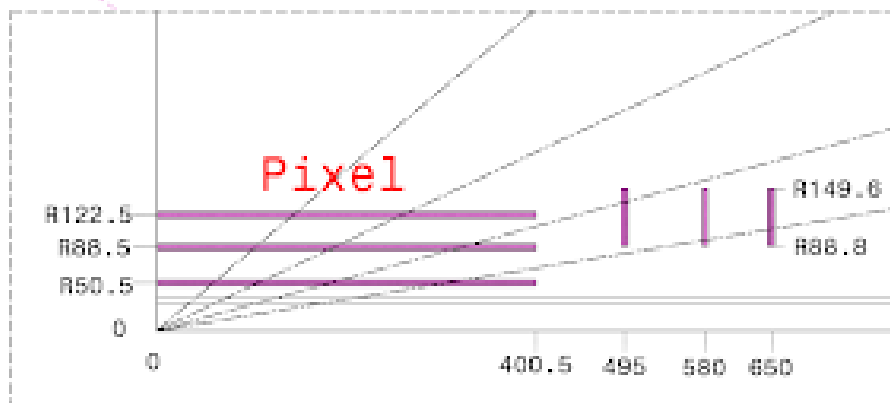
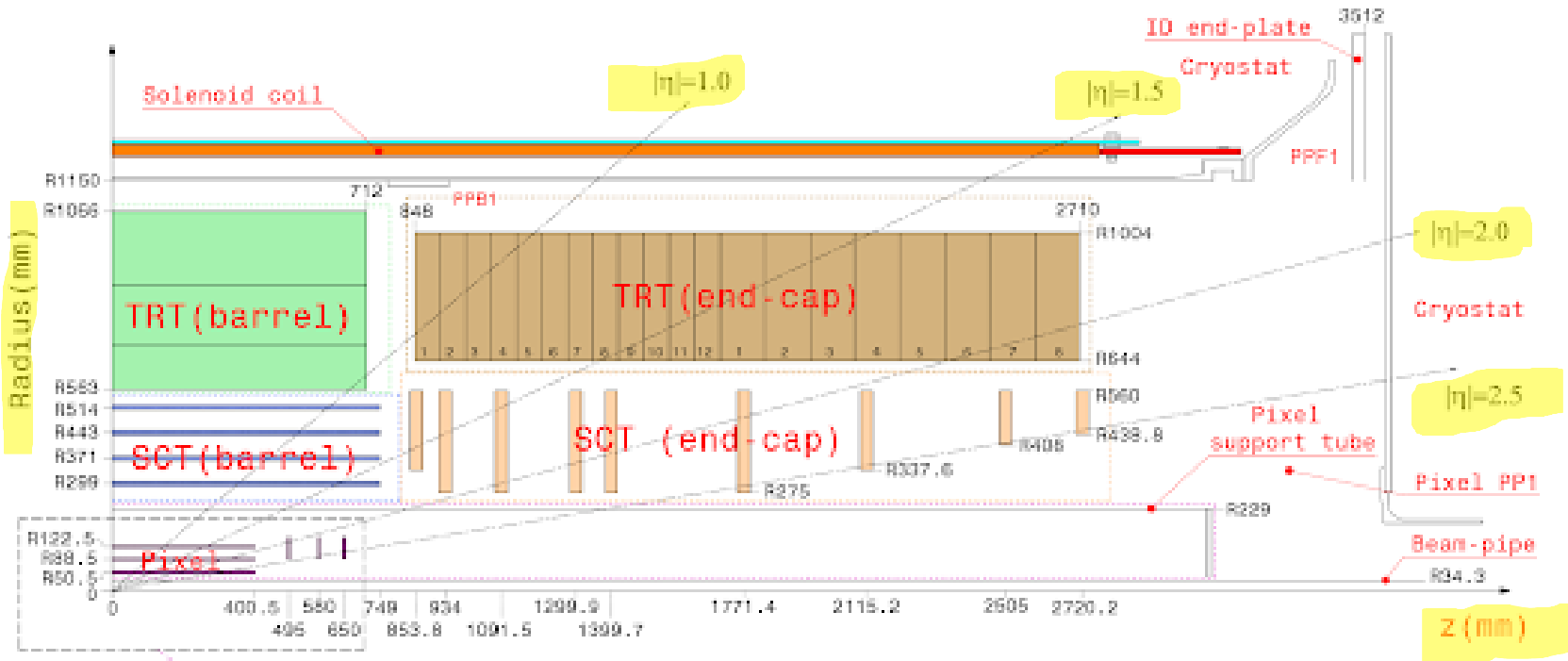
# Der ATLAS-Detektor



ATLAS  
=  
A Toroidal LHC ApparatuS

Grundlegend ist der ATLAS-Detektor nach dem Zwiebelschalenprinzip aufgebaut

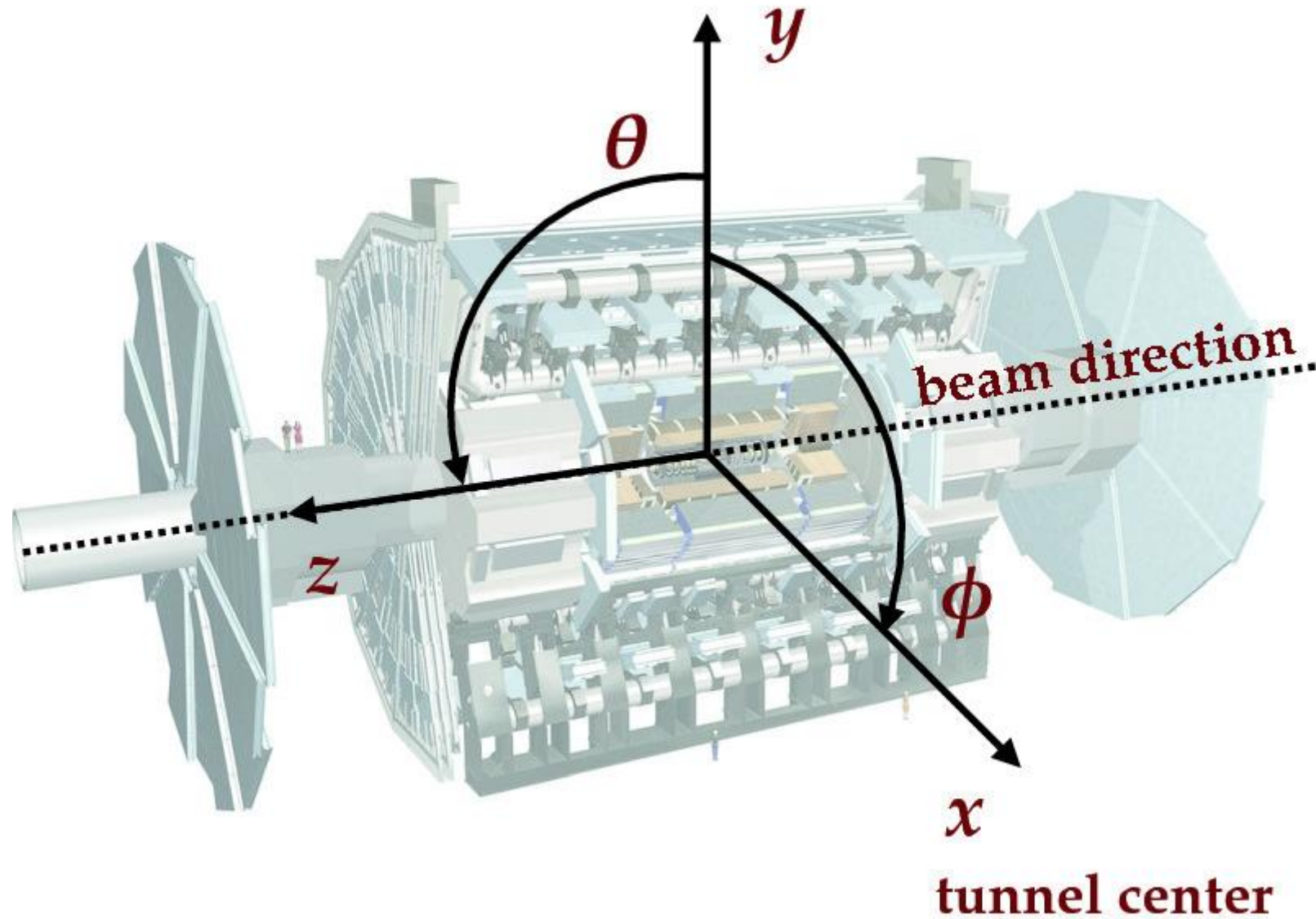
# Der ATLAS-Detektor



Envelopes

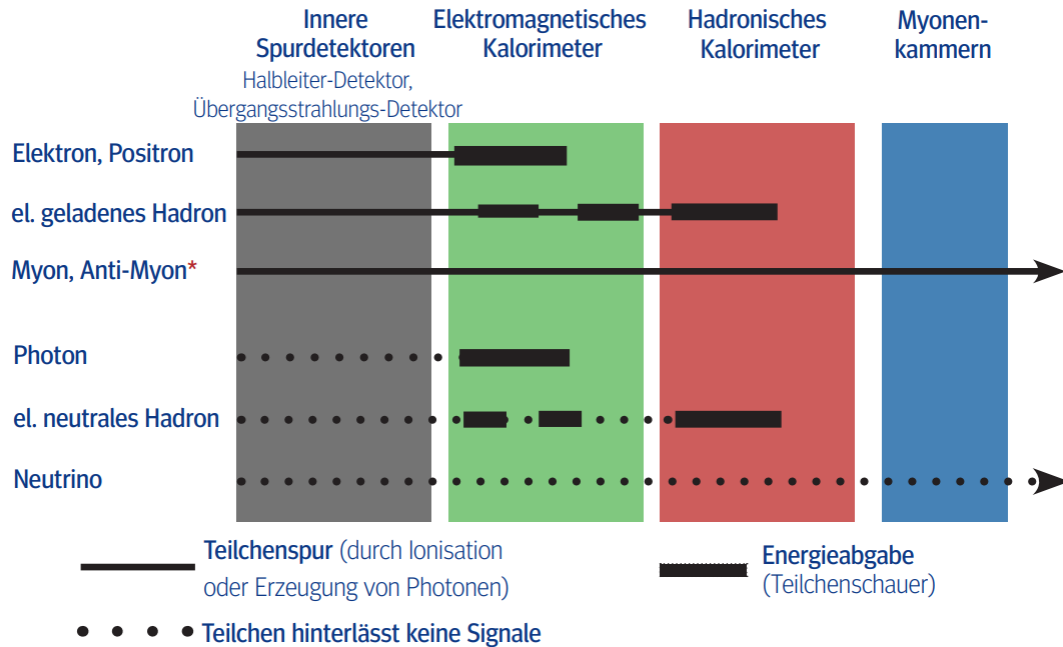
Pixel		45.5 < R < 242 mm  Z  < 3002 mm
SCT barrel		255 < R < 549 mm  Z  < 805 mm
SCT end-cap		251 < R < 810 mm 810 <  Z  < 2797 mm
TRT barrel		554 < R < 1082 mm  Z  < 780 mm
TRT end-cap		517 < R < 1108 mm 827 <  Z  < 2744 mm







# Der ATLAS-Detektor



Die innenliegenden Detektoren messen die Spuren von elektrisch geladenen Teilchen und werden daher als Spurdetektoren bezeichnet. Zu ihnen gehören die Halbleiter Spurdetektoren (Pixel- und Streifendetektor) und der Übergangsstrahlungsdetektor.

Die nächsten Schichten sind das elektromagnetische Kalorimeter und das hadronische Kalorimeter. In diesen wird die Energie von Teilchen gemessen.

In der äußersten Lage befinden sich die Myonenkammern, in denen die Spur und der Impuls der Teilchen gemessen wird.



## Spurdetektor:

Mit Spurdetektoren (z.B. Siliziumstreifendetektor) bestimmt man die Spuren von elektrisch geladenen Teilchen. Dazu werden näherungsweise die Punkte bestimmt, an denen das Teilchen den Detektor durchquert. (die Teilchen ionisieren Atome und dadurch entsteht ein elektrischer Strom)

Kombiniert man viele von diesen Messungen kann man die Bahn des Teilchens rekonstruieren.

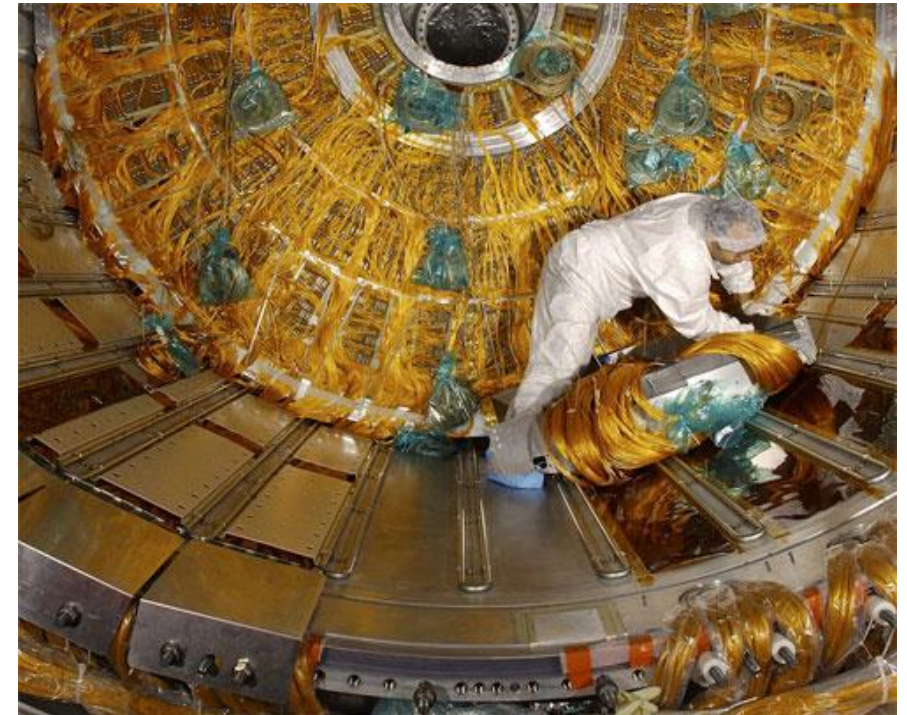




## Elektromagnetisches-Kalorimeter:

Im elektromagnetischen Kalorimeter werden Schichten aus Blei und Stahl als Absorber verwendet. Darin erzeugen Elektronen, Positronen und Photonen einen Teilchenschauer, der wiederum aus all diesen Teilchen besteht.

Durch diese Schauerteilchen werden Atome in flüssigen Argon ionisiert. Die so freigesetzten Elektronen wandern zu Kupferelektroden und können dort als elektrisches Signal registriert werden. Aus der Ladungsmenge lässt sich dann die ursprüngliche Energie des Teilchens berechnen.



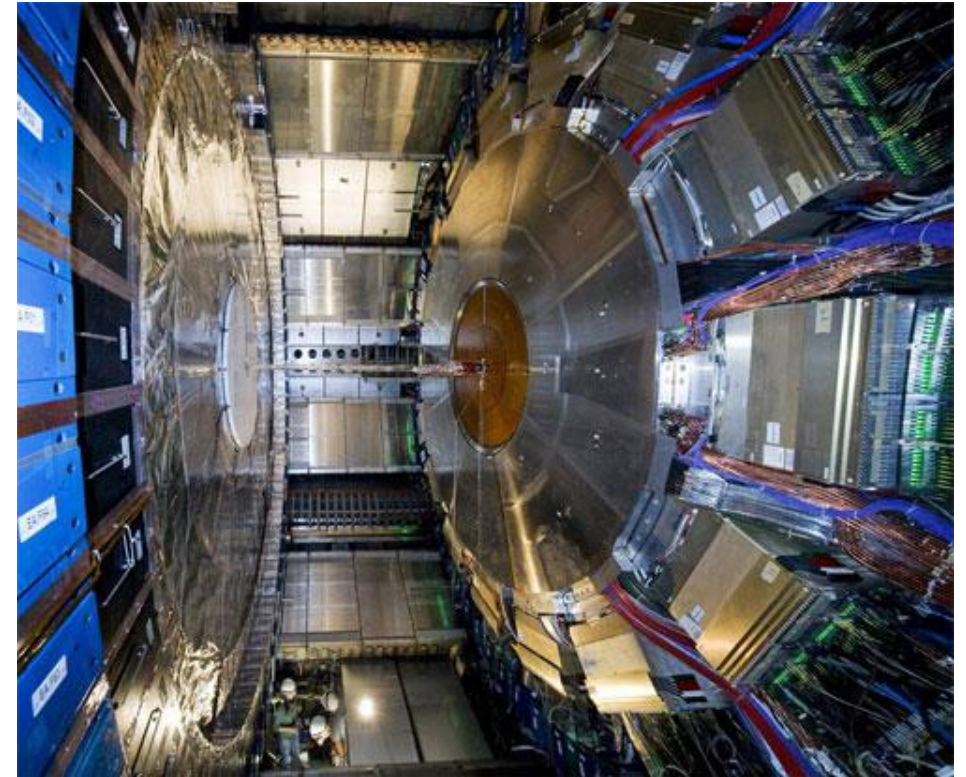


## Hadronisches-Kalorimeter:

Im hadronischen Kalorimeter werden ebenfalls Stahlplatten genutzt, um die Energie der Teilchen zu absorbieren. Durch diese Absorption entstehen Teilchen, die in sogenannten Scintilatoren gemessen werden können. Anhand der Intensität des Signals lässt sich die Energie des Teilchens berechnen.

**Hadronen** (von griech. *hadrós* ›stark‹), zusammenfassender Begriff für [Elementarteilchen](#), die der starken Wechselwirkung unterliegen.  
(Mesonen Quark+Antiquark)  
(Baryonen drei Quarks)

[Hadronen - Lexikon der Physik \(spektrum.de\)](#)







## Myonen-Kammern:

Wenn ein Myon hindurchfliegt, ionisiert es das Gas in den Röhren der Kammern (eine Argon-Kohlendioxid-Mischung).

Freigesetzte Elektronen werden an einem Draht abgeleitet und die Driftzeit wird bestimmt, womit bestimmt werden kann, an welcher Position das Teilchen war. Durch Kombination vieler dieser Röhren kann man eine sehr hohe Auflösung erhalten.

Aus diesen Spuren kann durch die Lorentzkraft des Magnetsystems in ATLAS der Impuls der Myonen berechnet werden.

