

Jagten på universets gåder...

Rejsen til det ukendte...

Standardmodellens herligheder

"Og dens vitale mangler"

Partikelfysikkens Hvorfor? - Hvordan? - Hvad?

Jørgen Beck Hansen
Niels Bohr Institutet/cern
September 2021

Hvor kommer det hele fra ?



Begrebet "Grundelementer"

I Aristoteles verdenbillede var der 4 grundelementer



A historical table of elements titled "ELEMENTS" by John Dalton. The table lists various elements with their atomic weights and symbols. The elements are arranged in two columns. The left column includes Hydrogen (1), Azote (5), Carbon (5), Oxygen (7), Phosphorus (9), Sulphur (16), Magnesia (28), Lime (28), Soda (28), and Potash (40). The right column includes Strontian (88), Barytes (68), Iron (56), Zinc (56), Copper (56), Lead (90), Silver (190), Gold (190), Platina (190), and Mercury (167). Each element is accompanied by a unique symbol, often a circle with a specific internal pattern or letter.

Element	Weight	Element	Weight
Hydrogen	1	Strontian	88
Azote	5	Barytes	68
Carbon	5	Iron	56
Oxygen	7	Zinc	56
Phosphorus	9	Copper	56
Sulphur	16	Lead	90
Magnesia	28	Silver	190
Lime	28	Gold	190
Soda	28	Platina	190
Potash	40	Mercury	167

I 1808 opskrev John Dalton (1808) mange af de kendte elementer ordnet efter deres egenskaber (vægt- masse)

Det Periodiske System

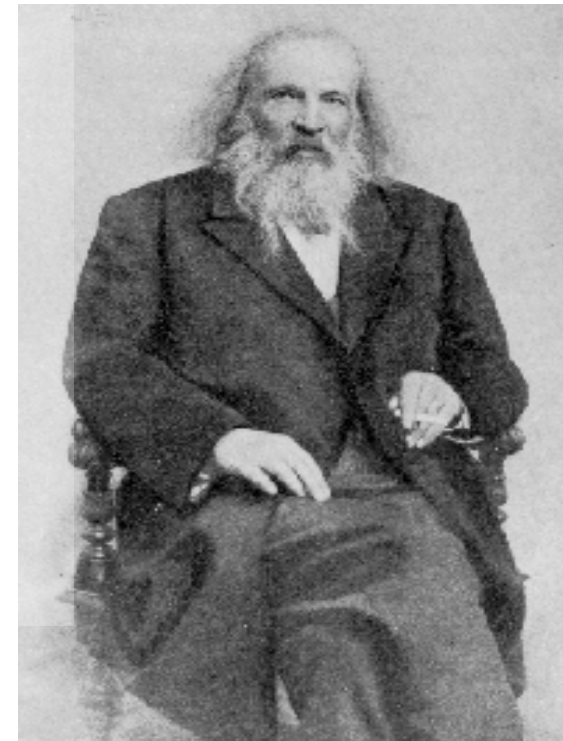
Grundstofferne grupperes i familier med lignende egenskaber (f.eks. ædelgasser He, Ne etc.).

Det Periodiske System:
Mendeleev (1869)

Periodic Table of the Elements

1 1A H																	2 0 He
2 3 Li	4 IIA Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3 11 Na	12 Mg											13 III A Al	14 IVA Si	15 VA P	16 VIA S	17 VIIA Cl	18 Ar
4 19 K	20 IIA Ca	21 IIIB Sc	22 IVB Ti	23 VB V	24 VIB Cr	25 VIIB Mn	26 VIII Fe	27 VIII Co	28 VIII Ni	29 VIII Cu	30 IIB Zn	31 IIIA Ga	32 IIIA Ge	33 IVA As	34 IVA Se	35 VA Br	36 VIA Kr
5 37 Rb	38 IIA Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6 55 Cs	56 IIA Ba	57 *La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7 87 Fr	88 IIA Ra	89 +Ac	104 Rf	105 Ha	106	107	108	109	110								

* Lanthanide Series	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
+ Actinide Series	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr



Familier/periodicitet

Indre struktur med simple byggesten

Jagten på Demokrit's atom...

Atomisme: Ideen om at alle objekter i universet er opbygget af meget små udelelige byggestene - **atomer**. Atom stammer fra det græske ord **atomos**, som betyder udelelig.



Navn	Demokritos
Født	ca. 460 f.k.
Død	ca. 370 f.k.

"Men: Kan stof deles uendeligt?"

Partikelfysikkens paradigme: Foreningen af teorier

- Op gennem tiden er der sket en stadig forening af teorier

Elektricitet

Magnetisme

- Maxwell forenede elektricitet og magnetisme med sine berømte ligninger (1873)



$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

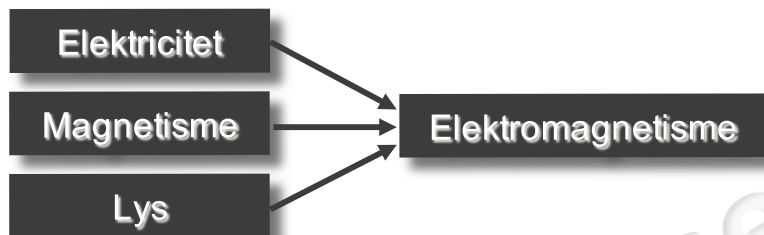
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Partikelfysikkens paradigme: Foreningen af teorier

- Op gennem tiden er der sket en stadig forening af teorier

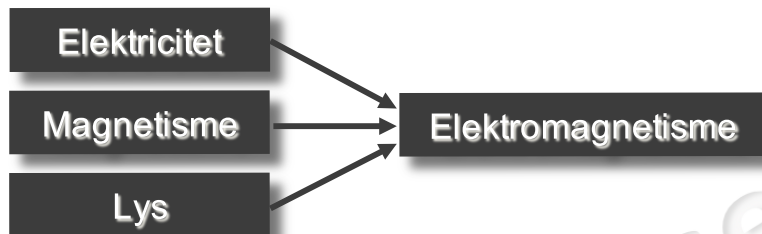


- Dirac introducerede elektronteori (1926)
- Teoretisk arbejde af Feynman, Schwinger og Tomonga resulterede i en teori for elektroner og fotoner med meget præcise forudsigelser

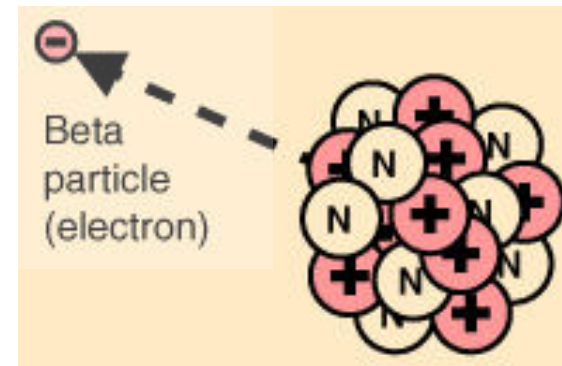
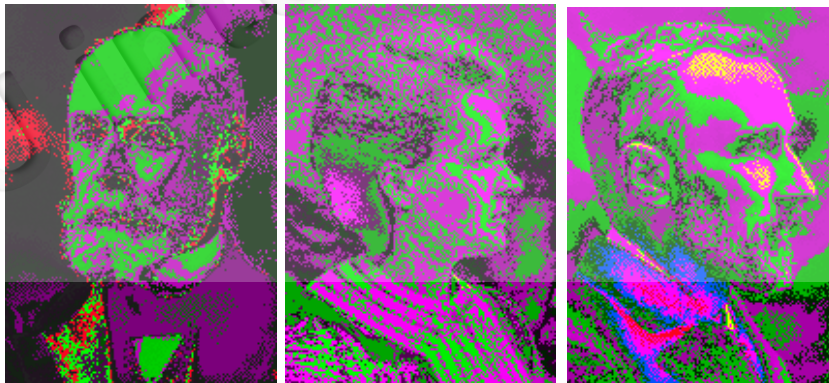


Partikelfysikkens paradigme: Foreningen af teorier

- Op gennem tiden er der sket en stadig forening af teorier

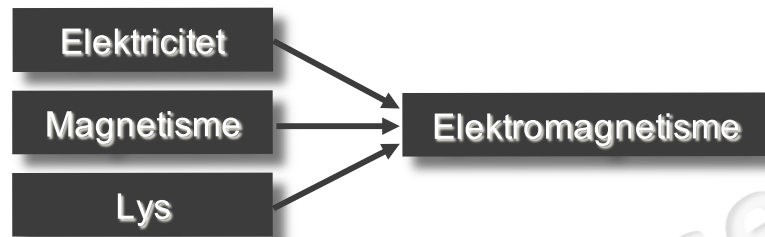


- Opdagelsen af radioaktivt henfald
 - Becquerel: uranium (1896)
 - Marie og Pierre Curie: radium (1898)



Partikelfysikkens paradigme: Foreningen af teorier

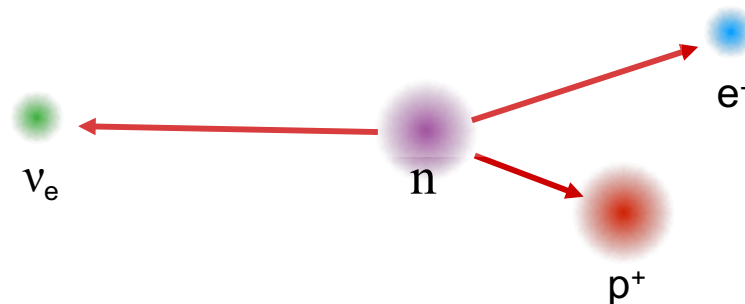
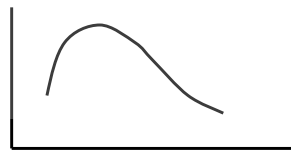
- Op gennem tiden er der sket en stadig forening af teorier



- Beskrevet ved indførelsen af neutrinoen

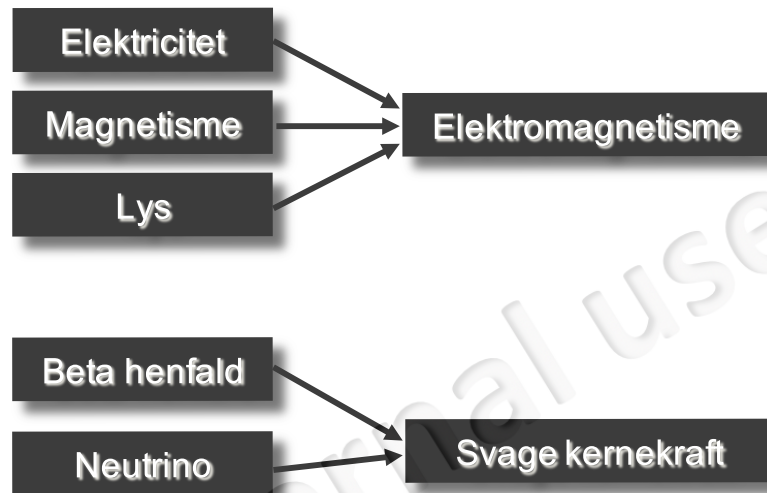


beta
Energi:



Partikelfysikkens paradigme: Foreningen af teorier

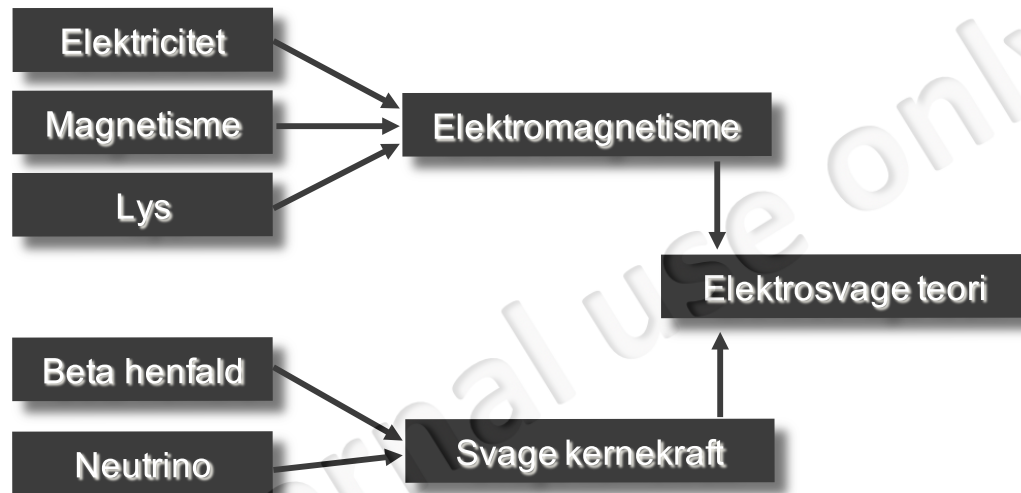
- Op gennem tiden er der sket en stadig forening af teorier



- Glashow, Weinberg og Salam (1967/1968) beskrev hvorledes elektromagnetismen (formidlet af fotonen) og den svage kernekraft kunne forenes
- Dette krævede en teori, hvor den svage kernekraft blev formidlet af tre partikler: W^+ , W^- og Z^0
- Disse partikler blev observeret ved CERN i 1983

Partikelfysikkens paradigme: Foreningen af teorier

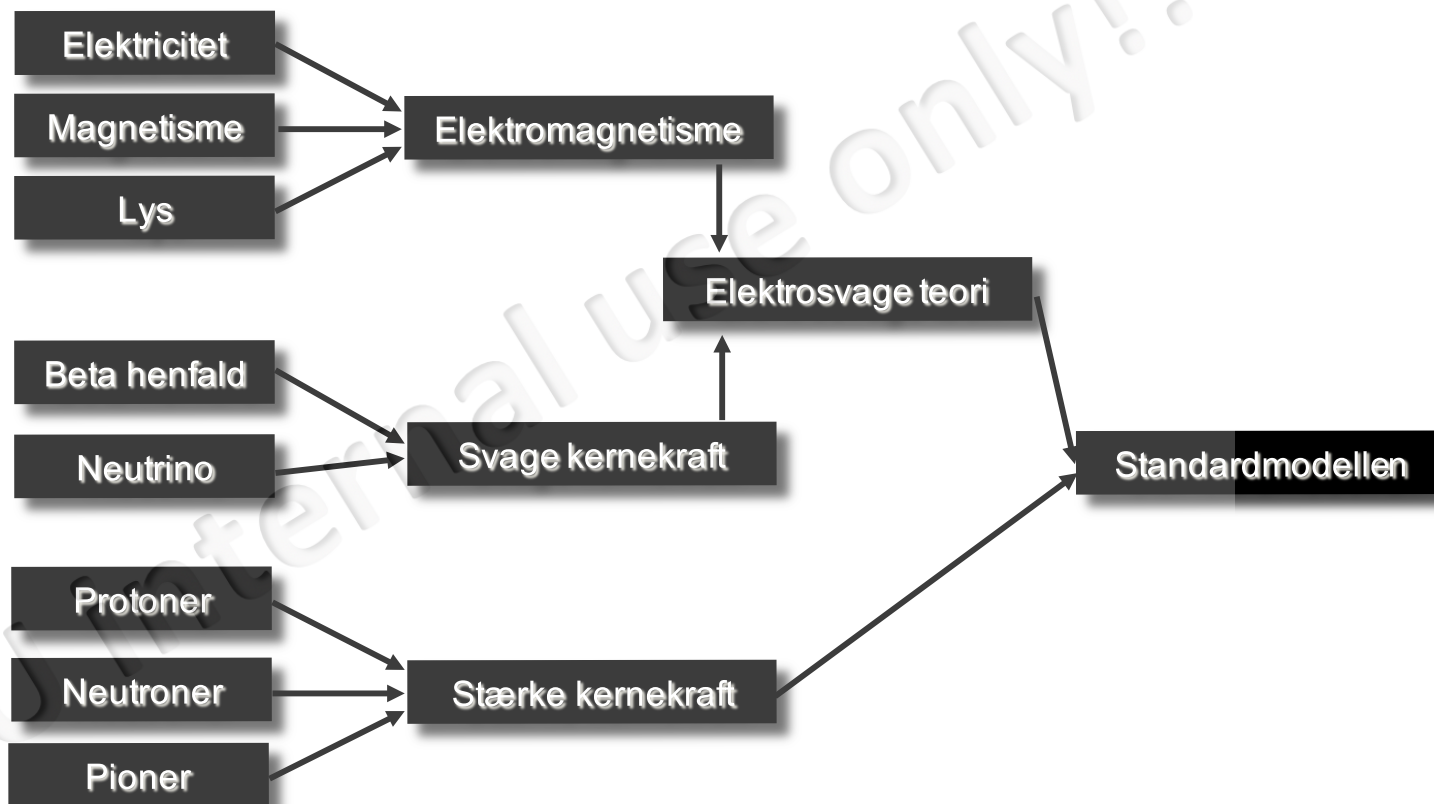
- Op gennem tiden er der sket en stadig forening af teorier

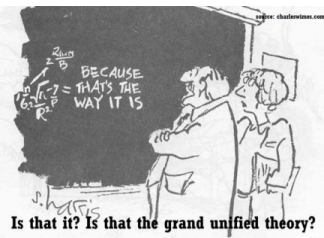


- Glashow, Weinberg og Salam (1967/1968) beskrev hvorledes elektromagnetismen (formidlet af fotonen) og den svage kernekraft kunne forenes
- Dette krævede en teori, hvor den svage kernekraft blev formidlet af tre partikler: W^+ , W^- og Z^0
- Disse partikler blev observeret ved CERN i 1983

Partikelfysikkens paradigme: Foreningen af teorier

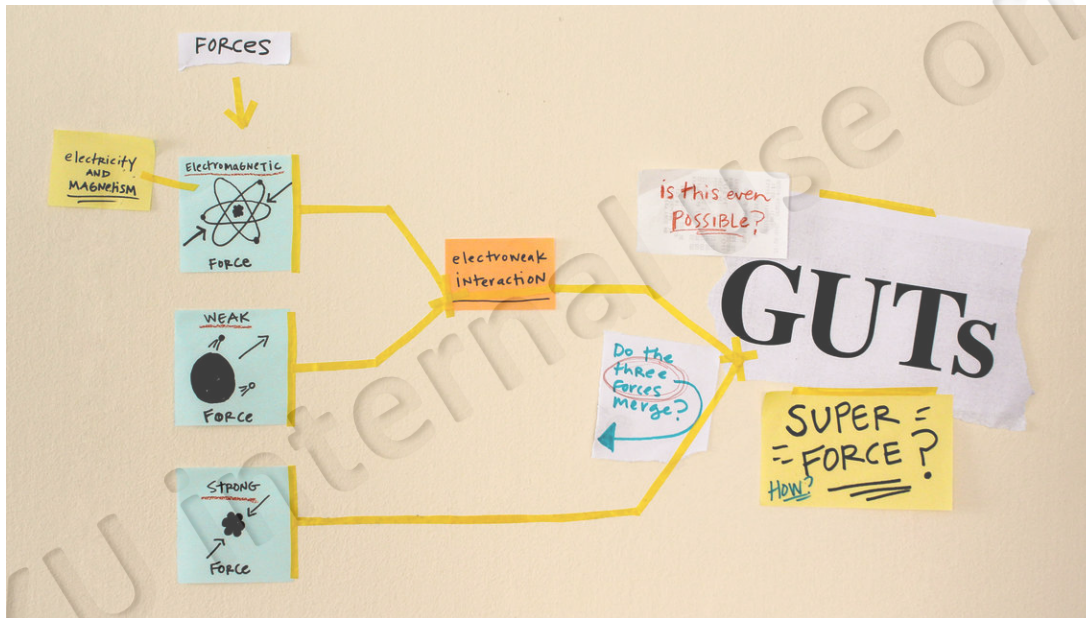
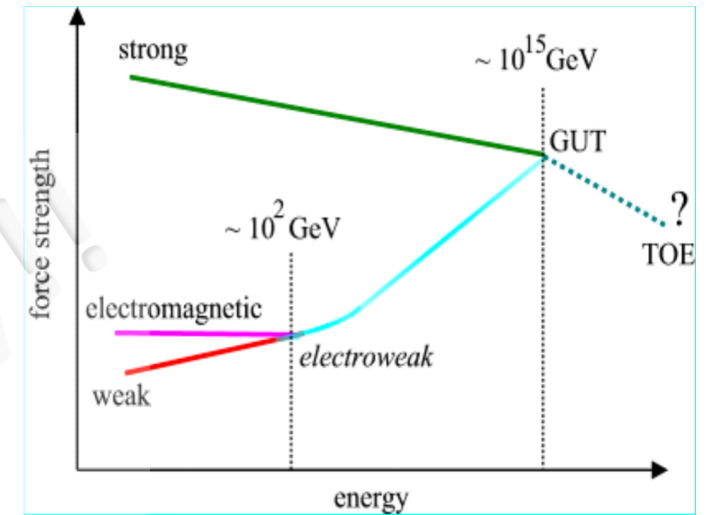
- Op gennem tiden er der sket en stadig forening af teorier





No GUT, no glory

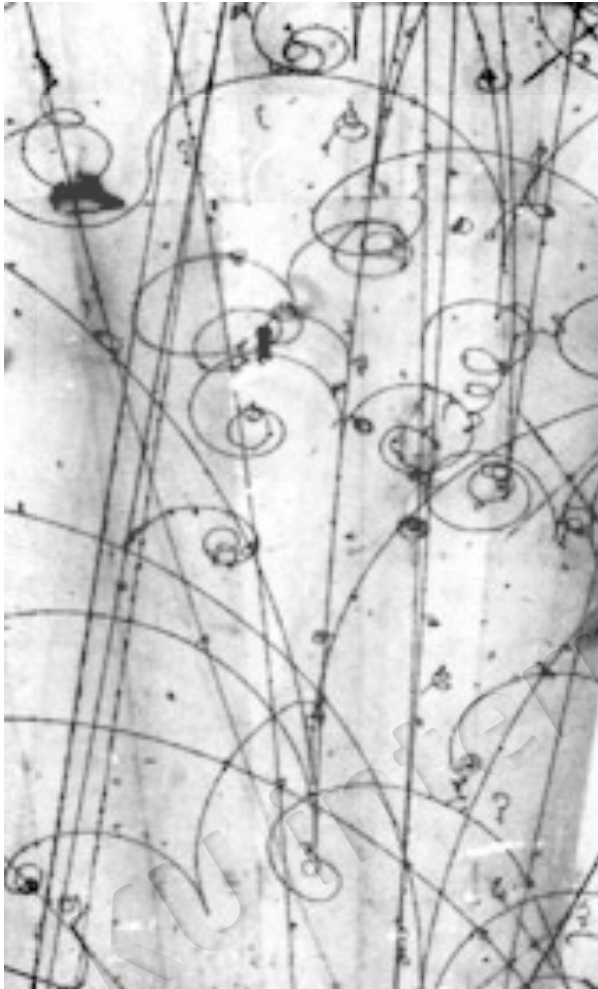
- Kræfternes styrkeforhold er ikke konstant!
- Antyder at der findes en **forenet kraft** som virkede umiddelbart efter Universets fødsel:



- Men så lever stof ikke evigt!
Protoner går i stykker
Diamanter varer ikke evigt

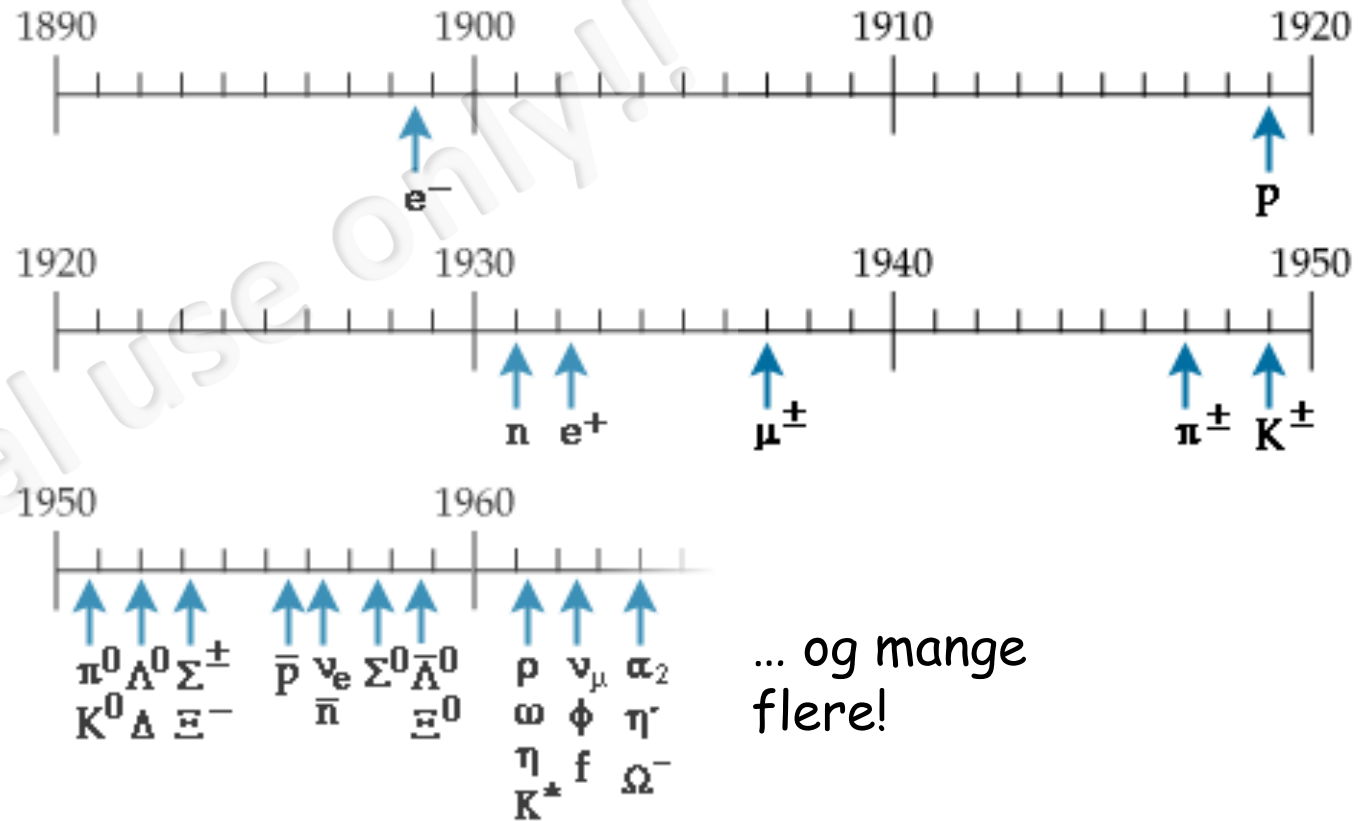


Historien om Stof...



Fermilab: Bubble Chamber Photo

Et væld af partikler er opdaget igennem tiden...



... og mange flere!

Mere end 200 partikler...

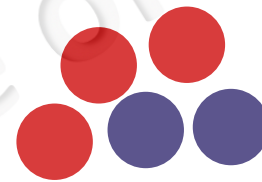
Der må være et system...

Standardmodellen: Det nye periodiske system

Vores forståelse af universets opbygning og virkemåde på den mindste skala er idag samlet i partikelfysikkens Standardmodel

Kvarker	u	c	t
	d	s	b
Leptoner	e	μ	τ
	ν_e	ν_μ	ν_τ
Stof partikler (fermioner - spin $\frac{1}{2}$)			

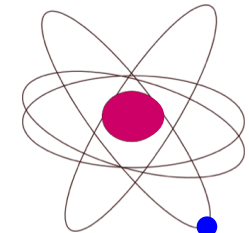
Atomer består af protoner, neutroner og elektroner



Protoner og neutroner

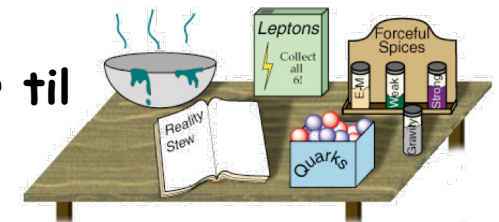


Atomkerne



Atom

Vi har nu alle ingredienser til at opbygge vores verden!



"Hvem bad om det?" - Isidor I. Rabi (1936)

Partiklernes egenskaber - Kvantetal

- Historisk bestemt ud fra reaktioner mellem partiklerne

- Elektrisk Ladning
- Baryontal (B)
- Strangeness (S)
- Charmness (C)
- Beauty (B')
- Truth (T)

Nul for Leptoner

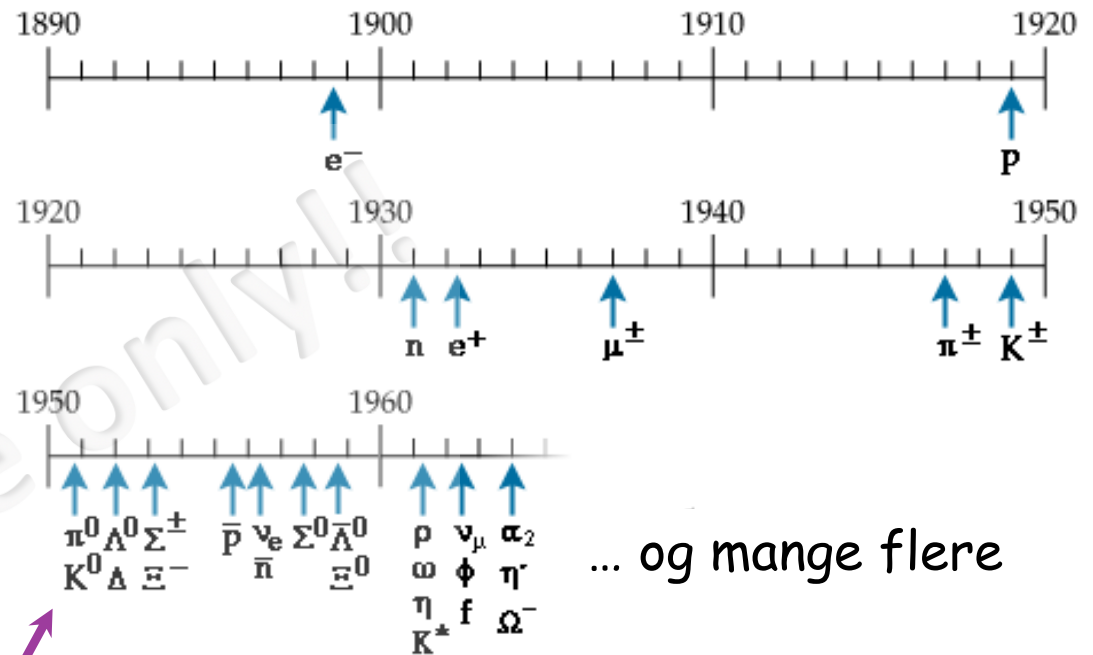
- Elektron-leptontal (L_e)
- Muon-leptontal (L_μ)
- Tau(on)-leptontal (L_τ)

Nul for kvarker

- Elektrisk ladning, Baryontal og alle Leptontal er bevaret i **ALLE** kendte vekselvirninger og processer
- Strangeness, Charm, Beauty og truth er **IKKE** bevaret i den svage vekselvirkning
- Anti-partiklerne har **modsat fortegn!**

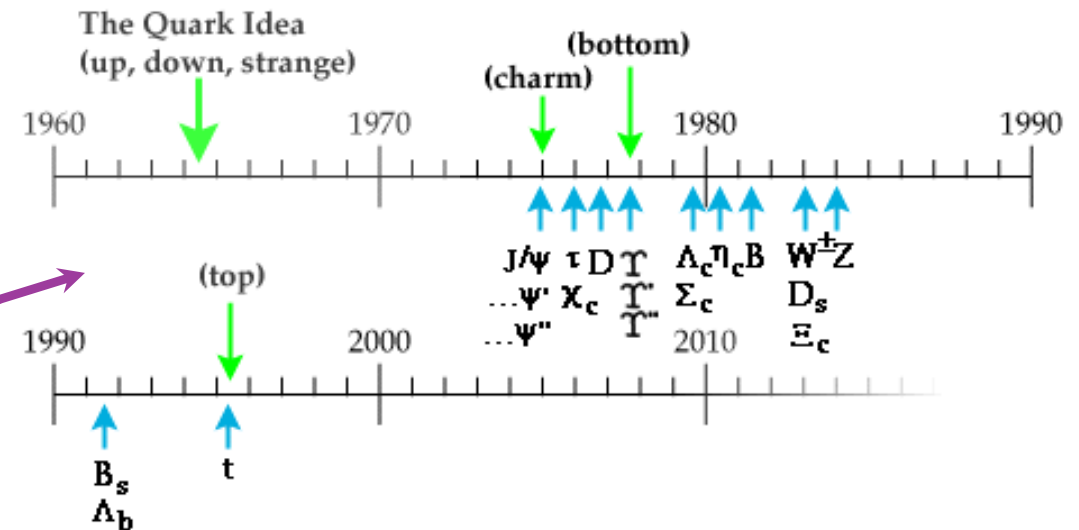
Tilbage til: Zoo af nye partikler

- Kollisioner mellem elektroner og kerner i kosmiske stråler og ved partikel-acceleratorer startende i 1930'erne førte til opdagelsen af mange nye partikler



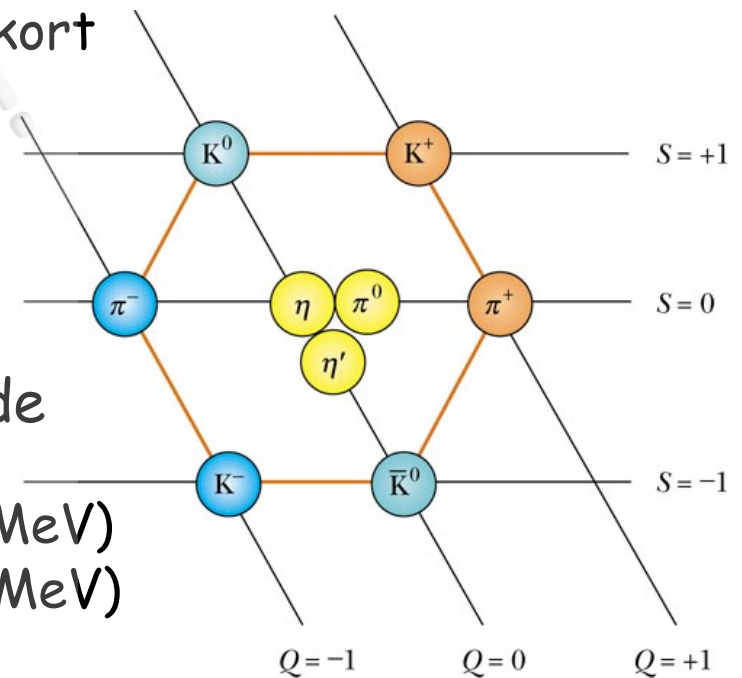
- Nogle var forudsagt; mange andre var uventede
- Først regnede man dem alle for elementære

- Fra 1960'erne forklaring gennem **Kvark-modellen**



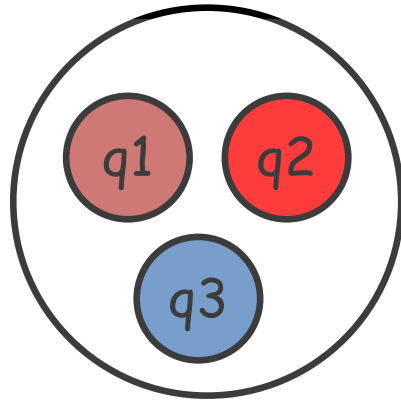
Kvarkmodellen

- Slutning af 1950'erne - begyndelsen af 1960'erne
 - Opdagelse af many nye partikler med meget kort levetid
 - Langt over 100 partikler
 - Kollektivt benævnt "**hadroner**"
- Tidligt indså man at disse nye partikler havde et mønster
 - Pioner: π^+ (140 MeV) π^- (140 MeV) π^0 (135 MeV)
 - Kaoner: k^+ (496 MeV) k^- (496 MeV) k^0 (498 MeV)
- Gell-Mann, Nakano og Nishijima: Partiklernes ladning kunne relateres til andre egenskaber (kvantetal)



Hadroner

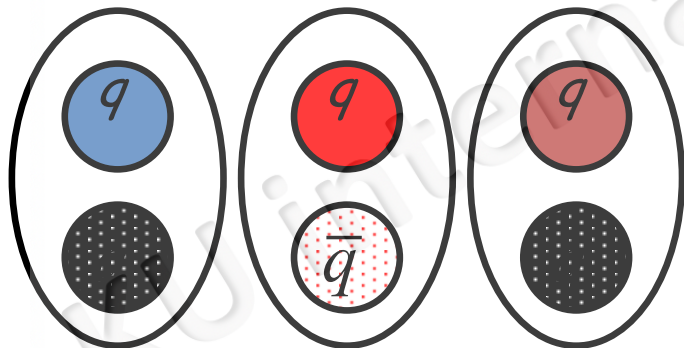
To klasser af hadroner tilladt i kvarkmodellen:



BARYONER

Eksempler:

proton $\equiv uud$; neutron $\equiv udd$



MESONER

Eksempler:

• Pioner

$$\pi^+ \equiv u\bar{d} \quad ; \quad \pi^- \equiv \bar{u}d \quad ; \quad \pi^0 \equiv (d\bar{d} - u\bar{u})/\sqrt{2}$$

• Kaoner

$$K^- \equiv s\bar{u} \quad ; \quad \bar{K}^0 \equiv s\bar{d} \quad ; \quad K^+ \equiv \bar{s}u \quad ; \quad K^0 \equiv \bar{s}d$$

Anti-baryoner består tilsvarende af anti-kvarker

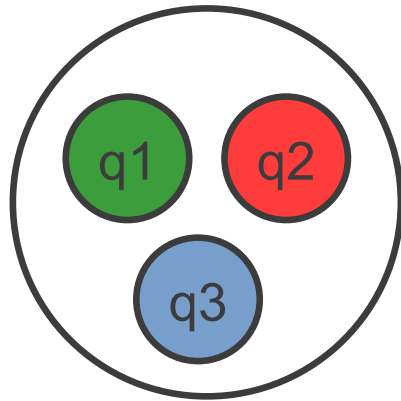
Anti-mesoner får ombyttet kvark \leftrightarrow anti-kvark

Man har søgt efter andre mulige kombinationer

- indtil videre uden succes

Tilbage til kvarkmodellen...

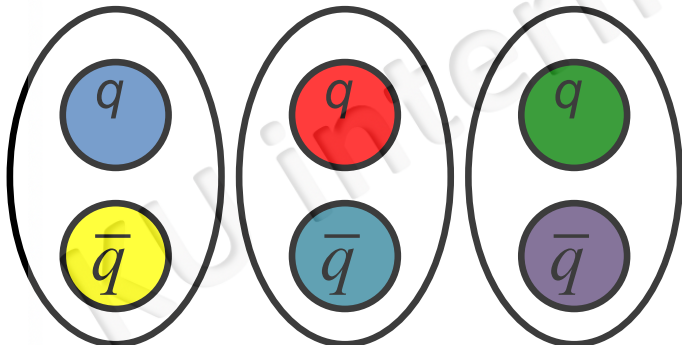
Den stærke kraft - kraften mellem farveladninger - tillader kun "farveløse" frie partikler:



BARYONER

RØD + GRØN + BLÅ = "HVID"
ELLER "FARVELØS"

MESONER



GRØN + ANTIGRØN = "FARVELØS"
RØD + ANTI RØD = "FARVELØS"
BLÅ + ANTIBLÅ = "FARVELØS"

Alle hadroner opdaget til dags dato er farveløse..

Standardmodellen:

Hvad holder det sammen?

Partiklerne er bundet sammen og vekselvirker via forskellige kræfter - det sker gennem udveksling af kraftbærende partikler

Kvarker	u	c	t
	d	s	b
Leptoner	e	μ	τ
	ν_e	ν_μ	ν_τ
Stof partikler (fermioner - spin $\frac{1}{2}$)			



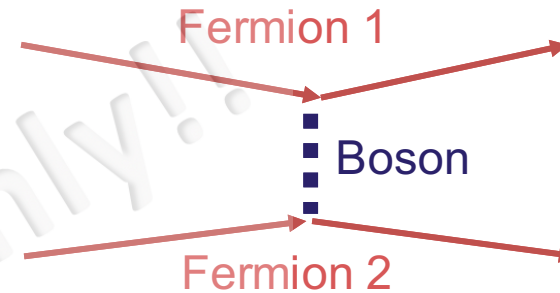
- Komponenter og teori er i det store hele forstået
- Underliggende for al fysik, astronomi, kemi og liv!
- **Næsten alt** er testet med høj præcision gennem 40 år
- Tyngdekraften ignoreres, men tilskrives en uopdaget partikel: Gravitonen

Standardmodellen: Hvad holder det sammen?

Partiklerne er bundet sammen og vekselvirker via forskellige kræfter - det sker gennem udveksling af kraftbærende partikler

Kvarker	u	c	t
	d	s	b
Leptoner	e	μ	τ
	ν_e	ν_μ	ν_τ

Stof partikler
(fermioner - spin $\frac{1}{2}$)



Kraftbærende partikler
(bosoner - spin 1)

- Komponenter og teori er i det store hele forstået
- Underliggende for al fysik, astronomi, kemi og liv!
- **Næsten alt** er testet med høj præcision gennem 40 år
- Tyngdekraften ignoreres, men tilskrives en uopdaget partikel: Gravitonen

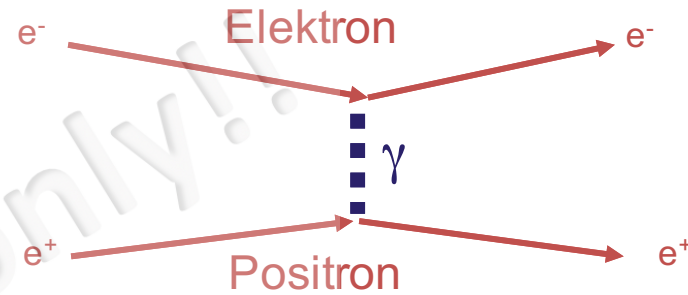
Standardmodellen: Hvad holder det sammen?

Partiklerne er bundet sammen og vekselvirker via forskellige kræfter - det sker gennem udveksling af kraftbærende partikler

Kvarker	u	c	t
	d	s	b
Leptoner	e	μ	τ
	ν_e	ν_μ	ν_τ
Stof partikler (fermioner - spin $\frac{1}{2}$)			



Kraftbærende partikler (bosoner - spin 1)
--

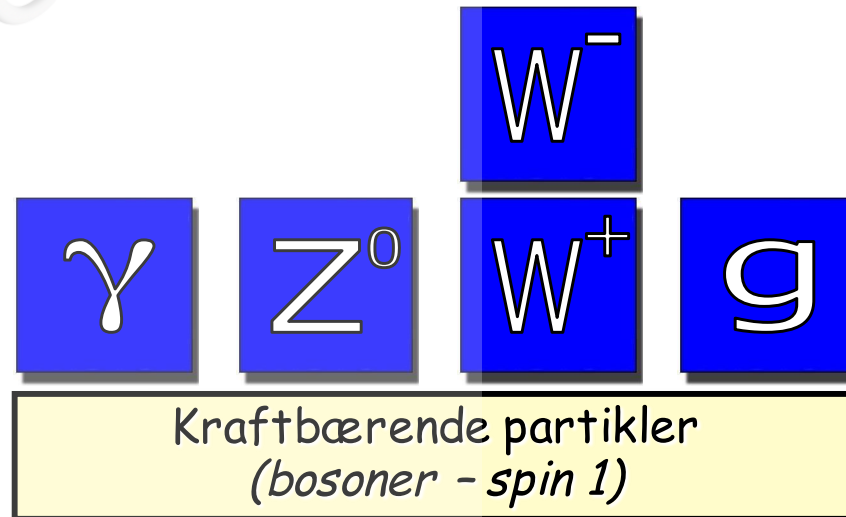
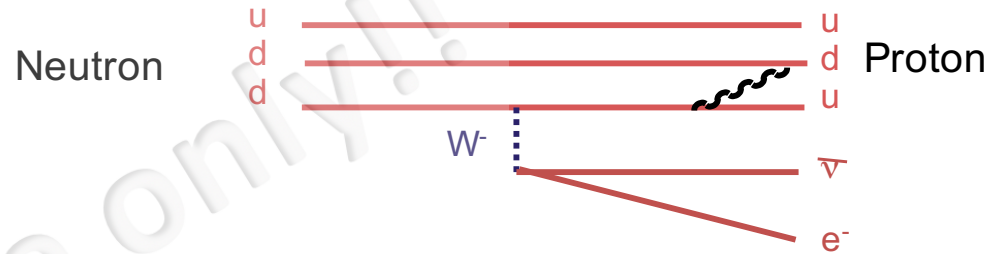
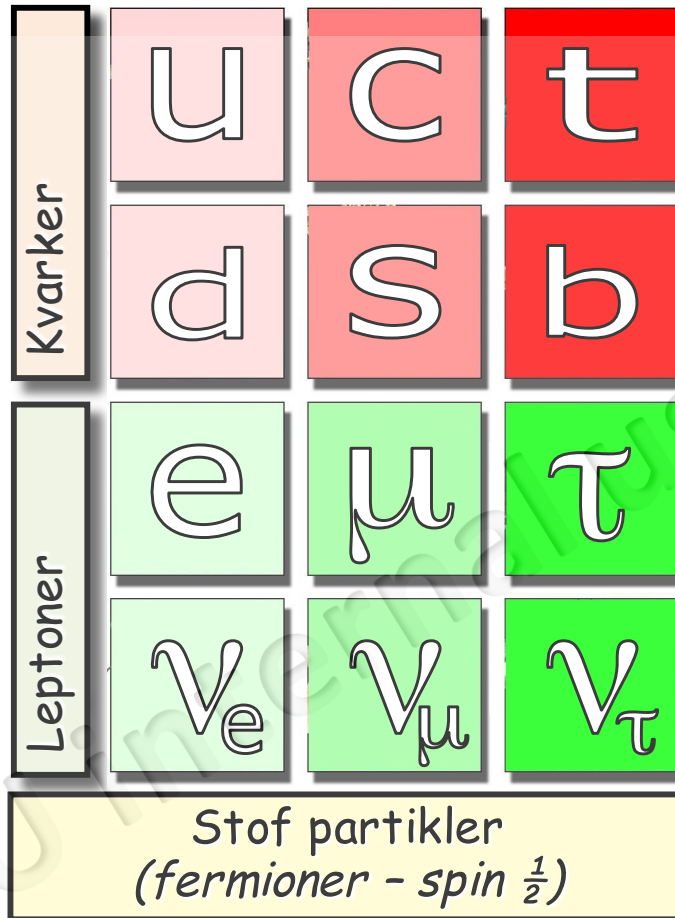


- Komponenter og teori er i det store hele forstået
- Underliggende for al fysik, astronomi, kemi og liv!
- **Næsten alt** er testet med høj præcision gennem 40 år
- Tyngdekraften ignoreres, men tilskrives en uopdaget partikel: Gravitonen

Standardmodellen:

Hvad holder det sammen?

Partiklerne er bundet sammen og vekselvirker via forskellige kræfter - det sker gennem udveksling af kraftbærende partikler










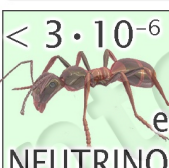




- Komponenter og teori er i det store hele forstået
- Underliggende for al fysik, astronomi, kemi og liv!
- **Næsten alt** er testet med høj præcision gennem 40 år
- Tyngdekraften ignoreres, men tilskrives en uopdaget partikel: Gravitonen

Standardmodellen:



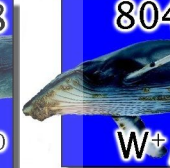
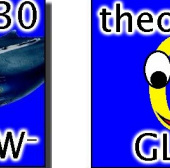
Hvad holder det sammen?

Partiklerne er bundet sammen og vekselvirker via forskellige kræfter - det sker gennem udveksling af kraftbærende partikler

Kvarker	 2.75 UP	 1300 CHARM	 178000 TOP
	 6 DOWN	 110 STRANGE	 4500 BOTTOM
Leptoner	 0.511 ELECTRON	 105.7 MUON	 1777 TAU
	 $< 3 \cdot 10^{-6}$ NEUTRINO e	 < 0.19 NEUTRINO μ	 < 18.2 NEUTRINO τ
	Stof partikler (fermioner - spin $\frac{1}{2}$)		

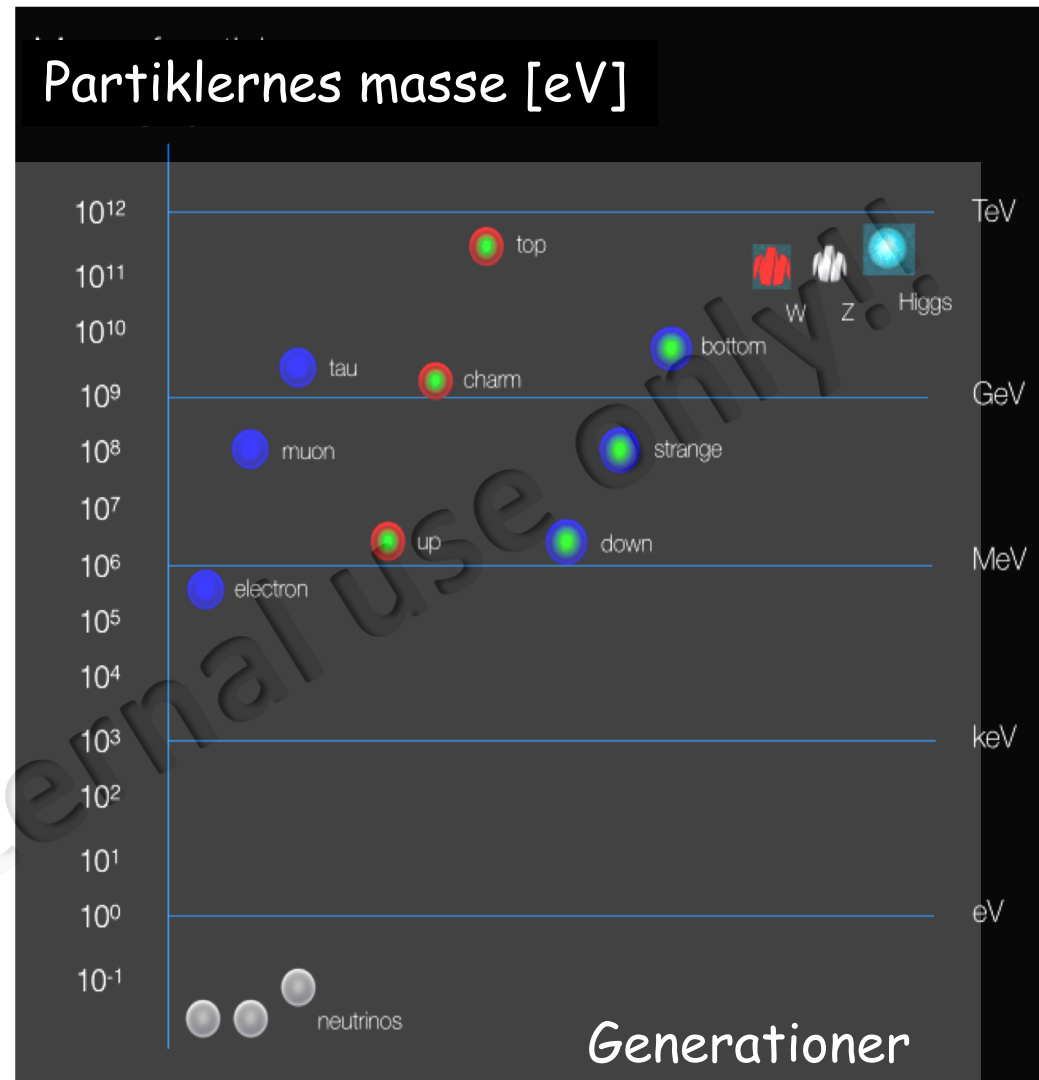
Partiklerne har masse! [MeV]
 → Protonen vejer ca. 1000 MeV

Higgs boson

 $< 10^{-23}$ PHOTON	 91188 Z^0	 80430 W^+ / W^-	 theory: 0 GLUON
Kraftbærende partikler (bosoner - spin 1)			

- Komponenter og teori er i det store hele forstået
- Underliggende for al fysik, astronomi, kemi og liv!
- **Næsten alt** er testet med høj præcision gennem 40 år
- Tyngdekraften ignoreres, men tilskrives en uopdaget partikel: Gravitonen

Men hvad bestemmer partiklernes specifikke masse?



Vi ved det ikke men der er tydeligt et mønster - og kræfterne spiller ind!
Og universet er fin-justeret: Kun disse værdier for masserne virker!

Hvad er masse?

- Ifølge teorien - Standard-modellen - kan partikler ikke have masse. Men det har de altså!
- Løsningen er Higgs-mekanismen:



En fest med mange mennesker

Holger Bech Nielsen kommer og prøver at komme til baren i den anden ende

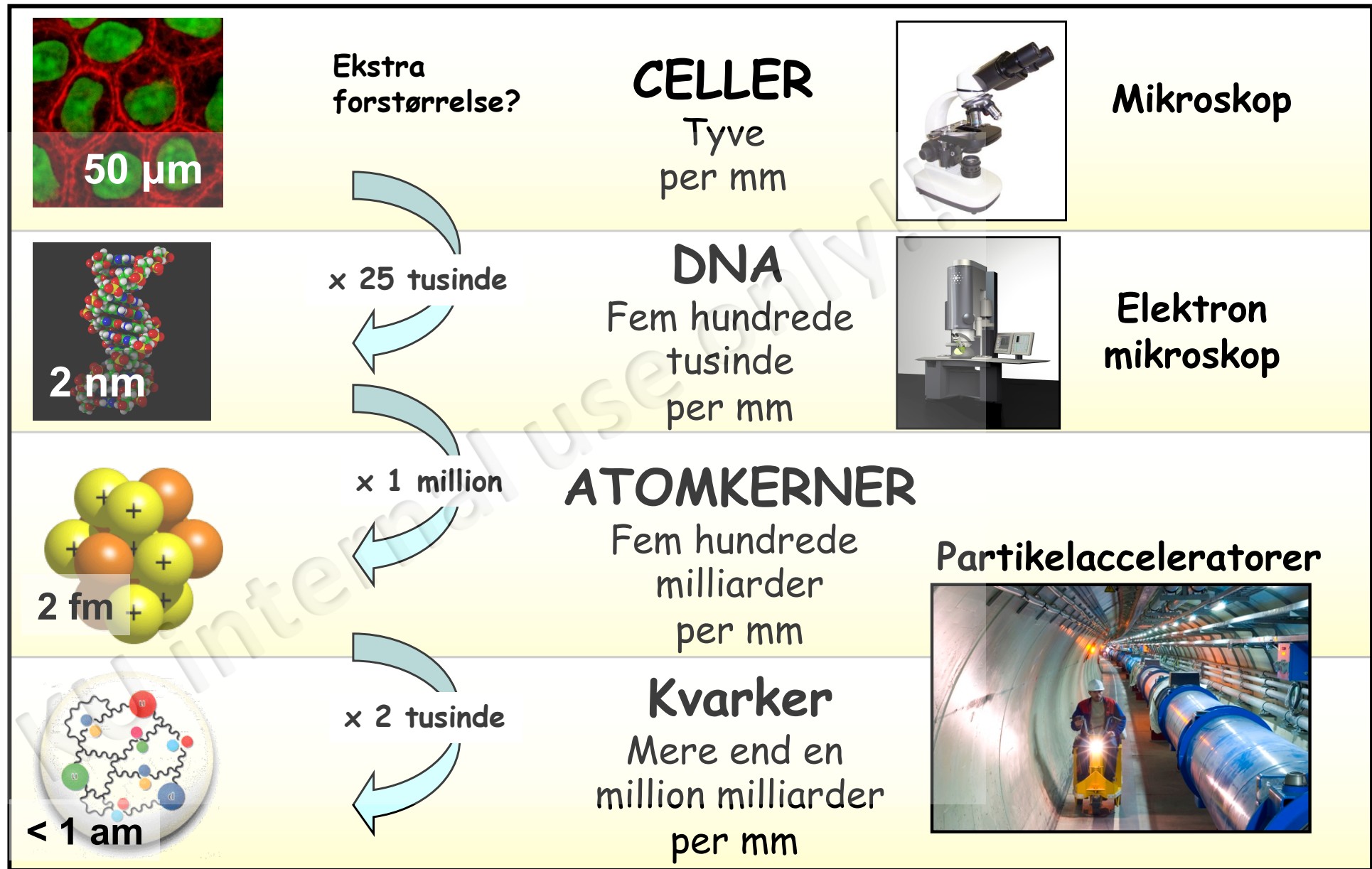


Folk stimler sammen om ham, og han får vanskeligere ved at komme frem; han har fået større masse p.g.a. vekselvirkning med omgivelserne



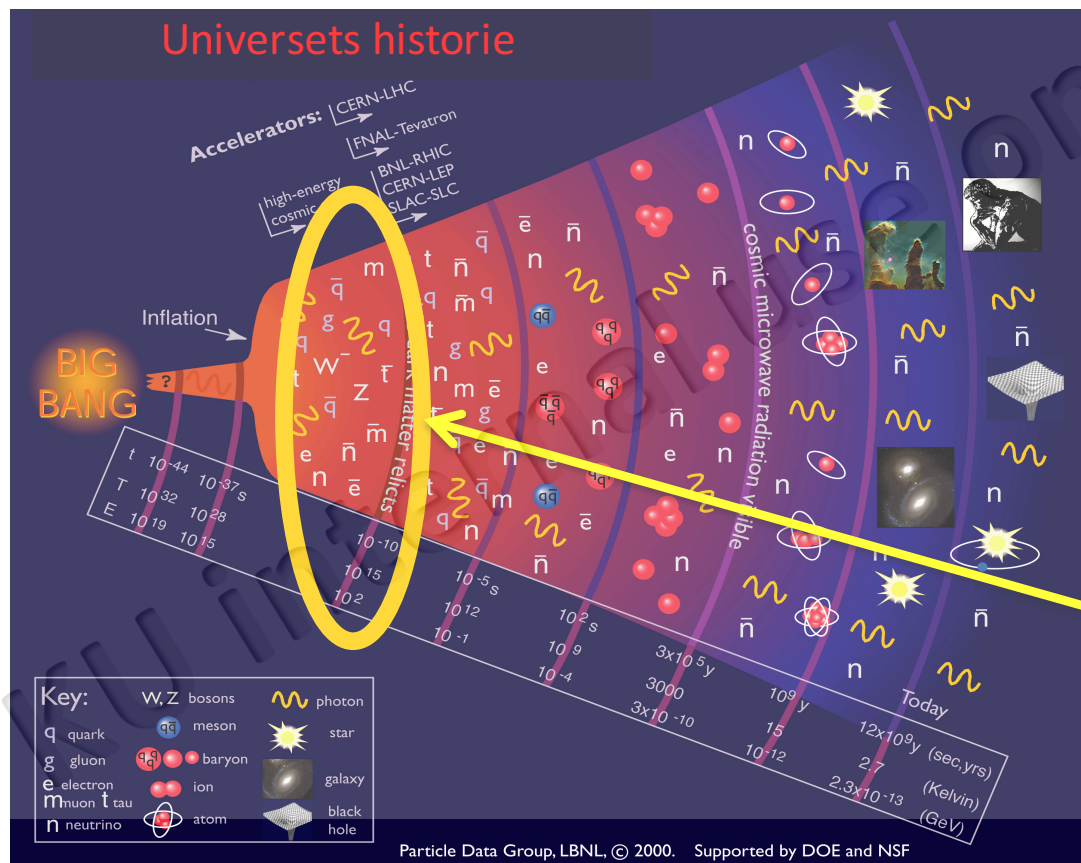
På samme måde er hele universet fyldt med et energifelt: Higgs-feltet som giver partikler masse

Naturens mindste byggestene



Partikelfysik er (NANO)²=ATTO-fysik!

Hvad ved vi om universet? Hvad kan LHC vise os?



Skabt ved "ur-braget" med ekstrem

- Temperatur
- Stoftæthed

Universet består af fundamentale byggestene

Som studeres med **partikelacceleratorer** (i stedet for teleskoper)

LHC er vores mikroskop til at se partiklernes verden

... Og vores teleskop til universet en ti milliardedel af et sekund efter dets fødsel

Ældre.... Større... Koldere... mindre energi

Den Kosmiske forbindelse: Fra Kvarker til Kosmos

Alle de kendte (og ukendte) fundamentale partikler eksisterede i et kort øjeblik efter Big Bang.

Studiet af partikelkollisioner er som at kigge tilbage i tiden og genskabe tilstanden i universet ved dets fødsel.

et sekund efter dets fødsel

Ældre.... Større... Koldere... mindre energi

B
BA

Key

q quark
g gluon
e elektron
m muon
n neutron

det

at

af

Moderne partikelfysik i en
nøddeskal?

KU internal use only!!!

Den magiske ligning

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

($\hbar \approx 10^{-34}$ Js)

The uncertainty
in position...

...times the uncertainty
in momentum...

...cannot be zero: it must be
at least this constant



Werner Heisenberg

Heisenbergs usikkerhedsrelation

- Jo mindre en partikel er
Jo hurtigere bevæger den sig.....
- Giver os kvantemekanik og strengteori

Endnu vigtigere:

Hvad gør naturen der hvor vi ikke kan se?



Den intuitive forståelse af partikelfysik

Tak til: Louis de Broglie

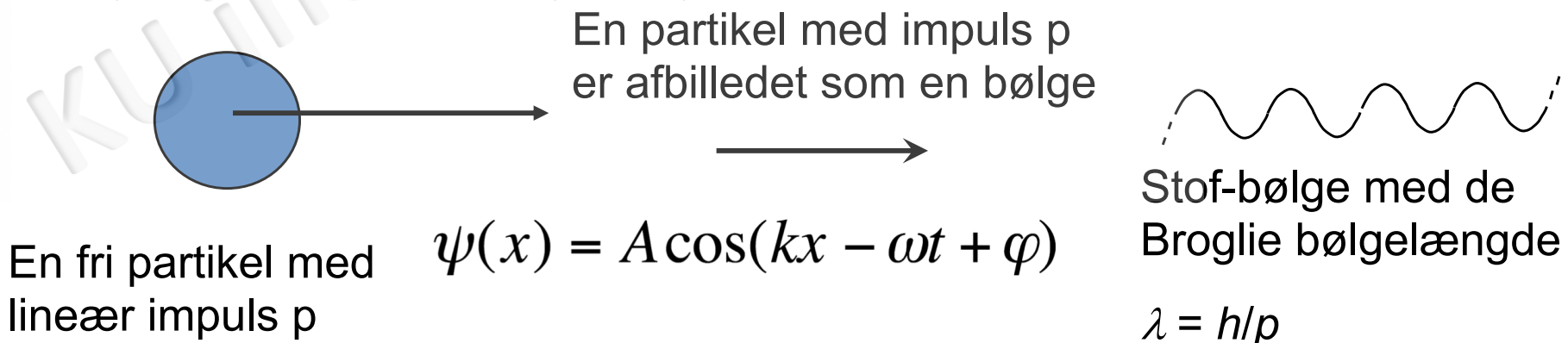


Prince de Broglie, 1892-1987

- Partikler har også bølgenatur
- Den totale energi E og impuls p af en partikel, er relateret til frekvensen ν af den bølge forbundet med dets bevægelse via Plancks konstant

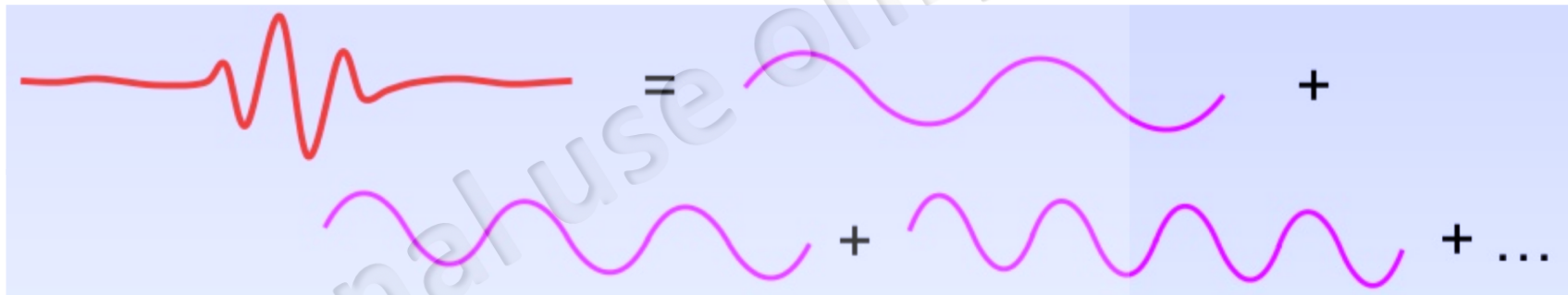
$$E = h\nu; \lambda = h/p$$

- Dette er de Broglie's formel som også forudsiger bølgelængden forbundet med bevægelsen af en partikel med impuls p



Partikler fra bølger

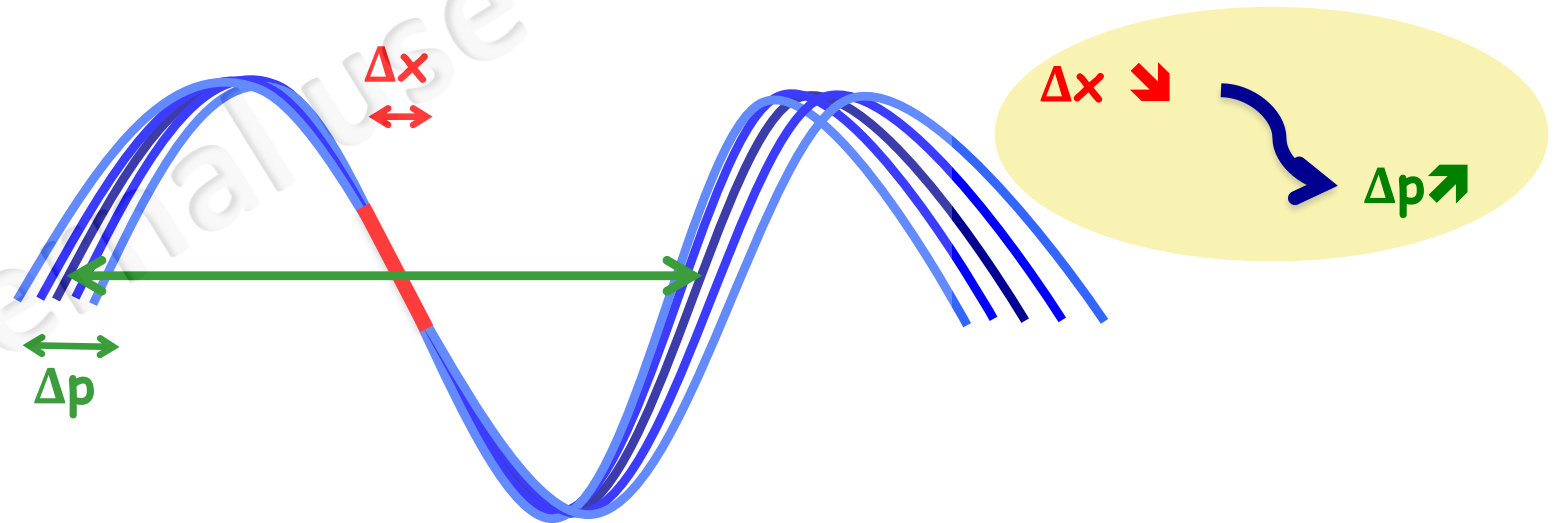
- Opløs et oscillerende felt som en sum af forskellige "modes" - bølgelængder (Fourier transformation):



- Hver mode er en simpel bølge (fast frekvens)
- Energien er bestemt af bølgelængde og antal partikler
- Kvante-felt-teori beskriver en partikel som en sum af elementære svingninger.

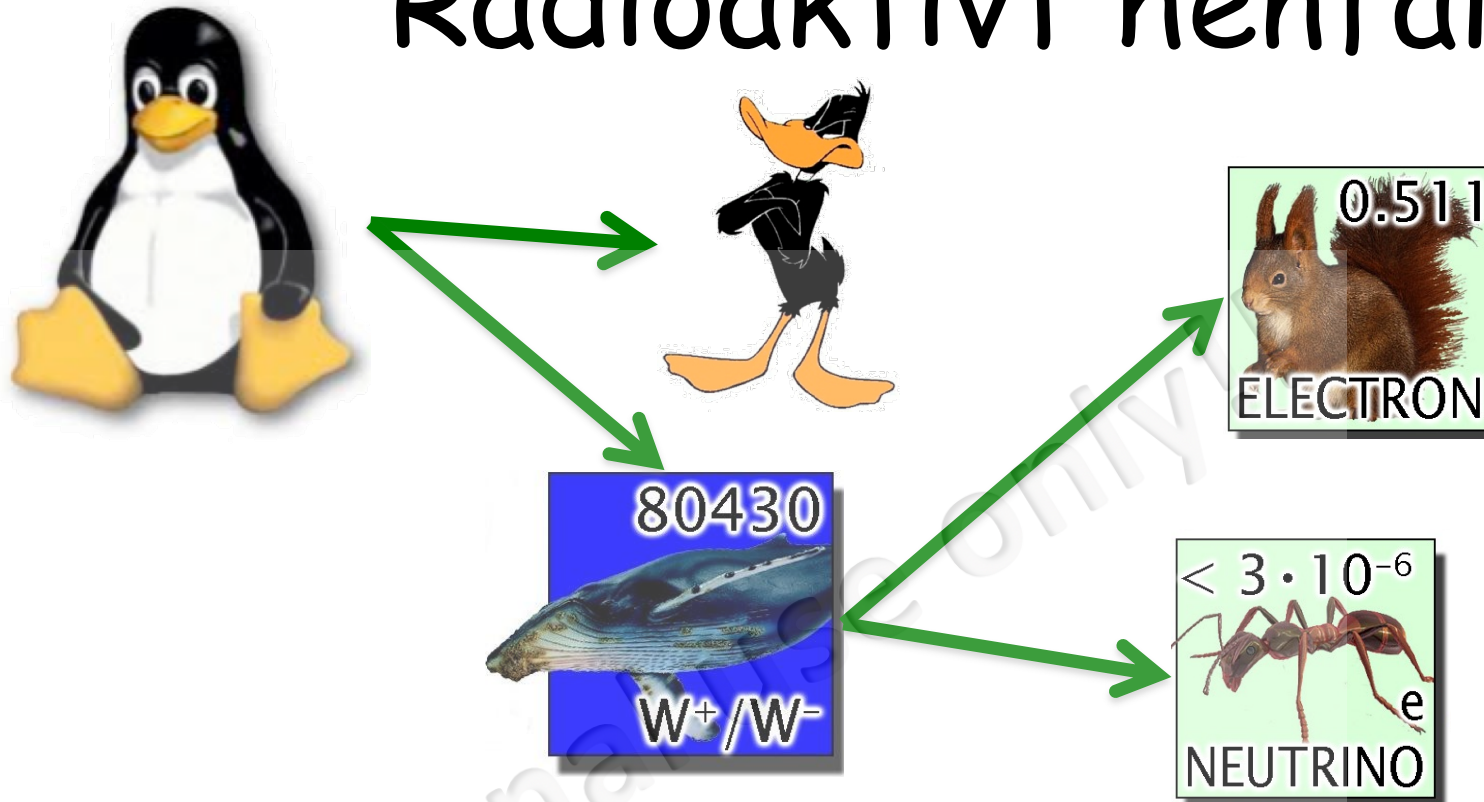
Altså: Usikkerhedsrelation

- En radikal ide:
 - En partikel er også en bølge
 - Impulsen, p , bestemmer bølge-længden / frekvens! ($\lambda = h/p$)



- Kan ikke bruges til at forklare fejl i en fysik-rapport!

Radioaktivt henfald



- Naturens dybeste hemlighed kan lade sig gøre hvis
$$\Delta t \times \Delta E \leq \hbar/2$$
- En partikel må gøre noget "ulovligt" (låne energi ΔE) bare den er på plads igen i løbet af kort tid (Δt)
- Vekselvirkninger er udveksling af virtuelle partikler
- **Virtuelle partikler er specielle:** $E^2 \neq \vec{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4$
- Eksempel: En virtuel foton har $m^2 \neq 0$!

Partikelfysikerens Værktøjskasse

- Hurtige partikler beskrives med

Speciel relativitetsteori:

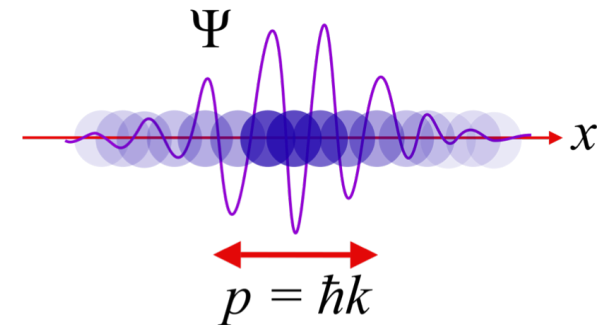
$$E = mc^2 = \gamma m_0 c^2$$
$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

Invariant masse (hvilemasse)

- Små partikler beskrives med

Kvantemekanik:

$$i \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{1}{2m} \nabla^2 \psi$$



Anvendt speciel relativitetsteori og kvantemekanik!

- Plus en *stor pose med nye partikler* og begreber
- Resultatet er: **Kvante-felt-teori**

(Og så endelig FORMLEN! 😊)

$$L = \sum_f i\bar{\psi}_f \gamma_\mu D^\mu \psi_f - \frac{1}{4} \sum_k F_W^{k\mu\nu} F_{W\mu\nu}^k - \frac{1}{4} F_B^{\mu\nu} F_{B\mu\nu} - \frac{1}{2} \text{tr}(G_{\mu\nu} G^{\mu\nu})$$
$$+ (D_\mu \phi)^\dagger (D^\mu \phi) - \left(\mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2 \right) - \frac{1}{4} F_{\phi\mu\nu} F_\phi^{\mu\nu}$$
$$+ \sum_f g_f \bar{\psi}_f \phi \psi_f$$

+ Hidden ingredients

} HIGGS!!

- L kaldes "Lagrangian" - kommer fra **analytisk mekanik**

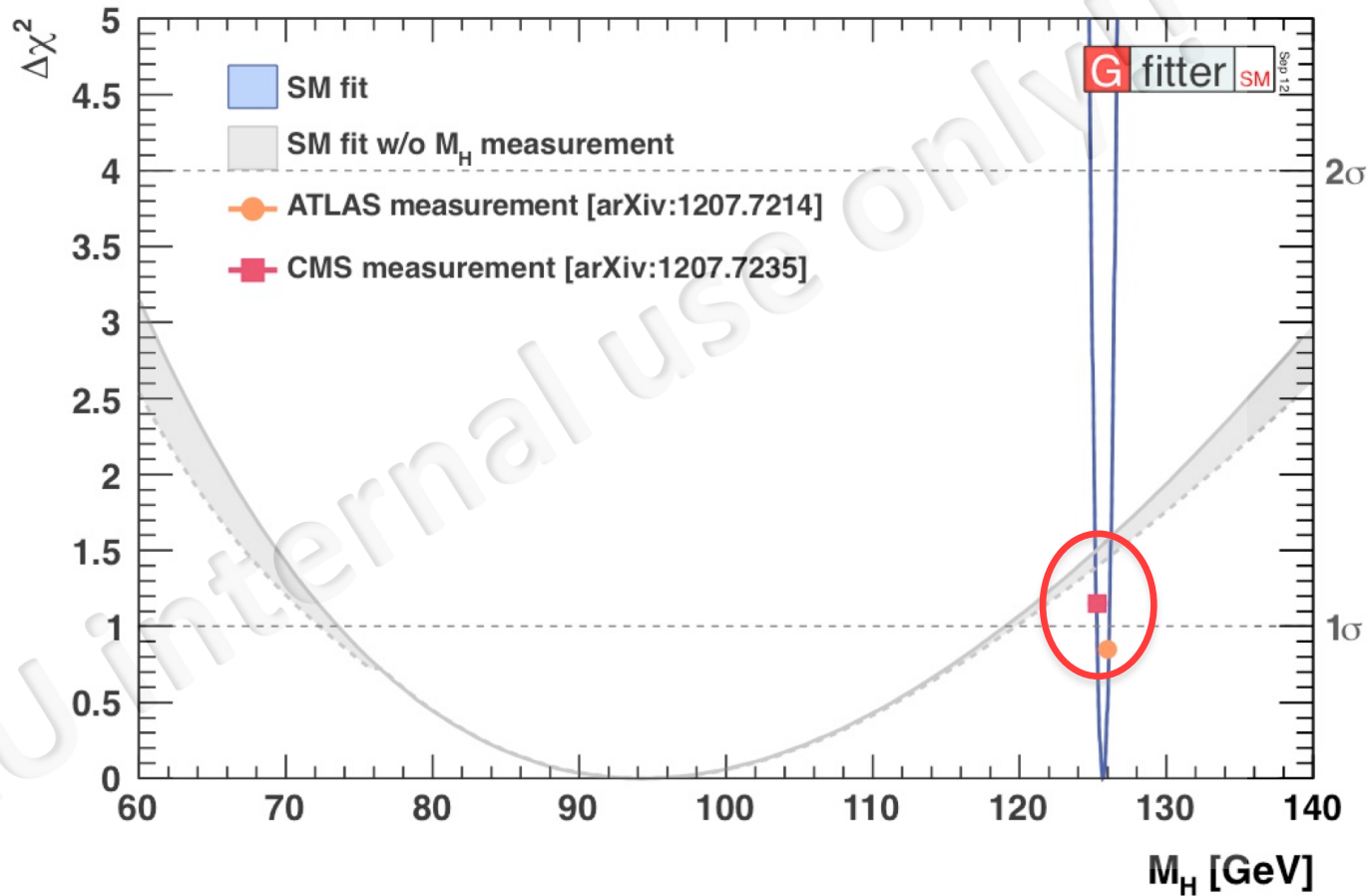
$$L = (E_{\text{kin}} - E_{\text{pot}}) / m^3 \text{ (energitetthed)}$$

- Fra dette udtryk kan nær sagt alt vi ved udledes!
- Husk, det er denne ligning der giver os avanceret elektronik, håb om ren fusion, osv. Osv.)

Det er faktisk alt...

Jagten på Higgs partiklen var en success! Passer det med Standard Modellen?

Status per 14. marts 2013



"OK"

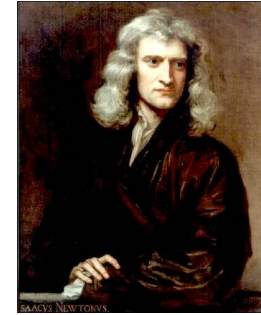
"GODT"

Higgs partiklens masse passer rimeligt GODT med en Standard Model Higgs-partikel's favorit-værdi!

Vores nuværende viden om partiklernes verden: **Standard-Modellen**

Det repræsenterer en kæmpe intellektuel indsats i anden halvdel af det 20'ende århundrede

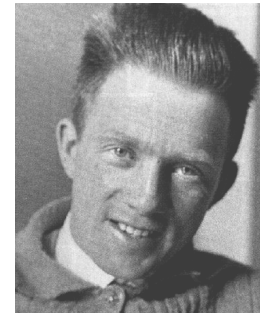
Teorien er formuleret indenfor rammerne af **Relativistisk Kvante-Felt-Teori**



Klassisk fysik (1687)

Småt

hurtigt



Kvantemekanik (1913)



Speciel Relativitetsteori (1905)



Kvante-Felt-Teori (1940's)

Forsøgsopstillingen

Acceleratorer

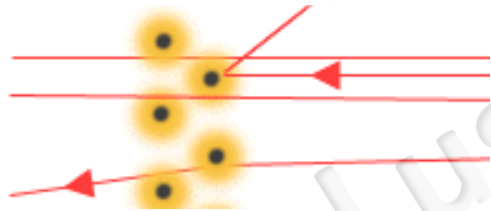
LHC acceleratoren

En moderne partikelfysik
detektor

Den partikelfysiske metode

For at udforske de allermindste partikler er vi nødt til at

- Kollidere dem: Observere **karakteristika** ved kollisionen



Bevægelsesmængden, p , bestemmer bølge-længden / frekvens

(Tak til: De Broglie - $\lambda = h/p$)

- Skabe dem: Dette kan gøres ved at **annihilere** to partikler og skabe nye fra den energi der bliver frigjort



$E=mc^2$ → mini Big Bang!

Hvordan?

- Tag nogle protoner

Du kan få dem fra vandhanen hvis du vil (Biler)

- Få dem i bevægelse

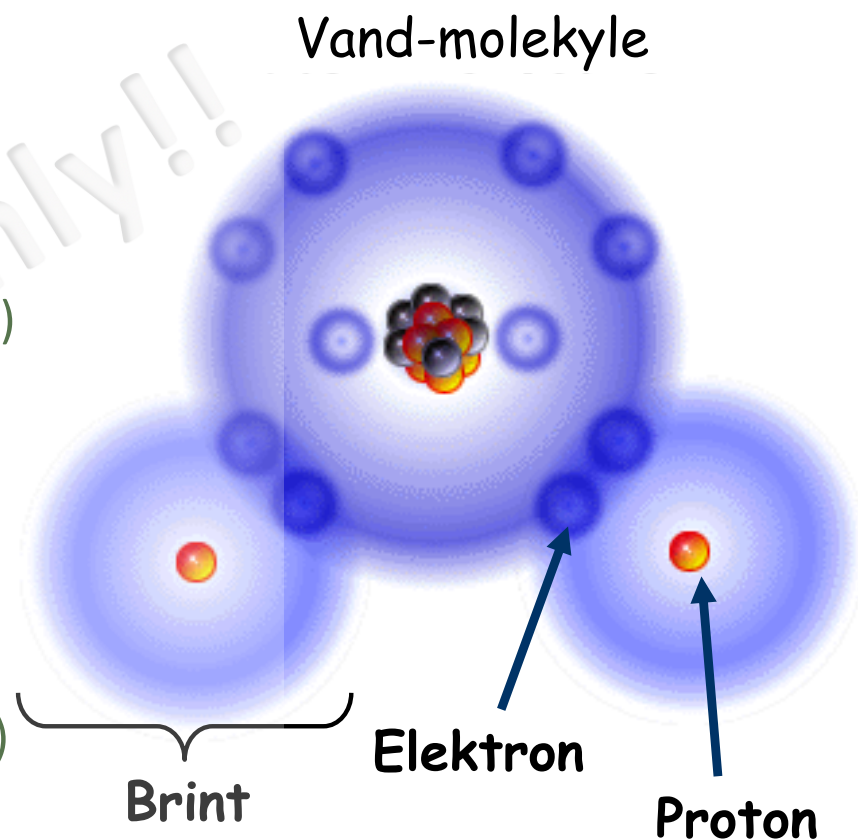
(Ultra hurtigt!) (Michael Schumacher)

- Stød dem sammen

Det anbefales kraftigt at holde sig på afstand (Motorvejen om morgen?)

- Fotografér delene

Dit mobil-kamera er sikkert ikke hurtigt nok! (Vej-side kamera)



Opgaven:

Find vrag-delene fra Higgs'o-bilen!

Accelerator 101

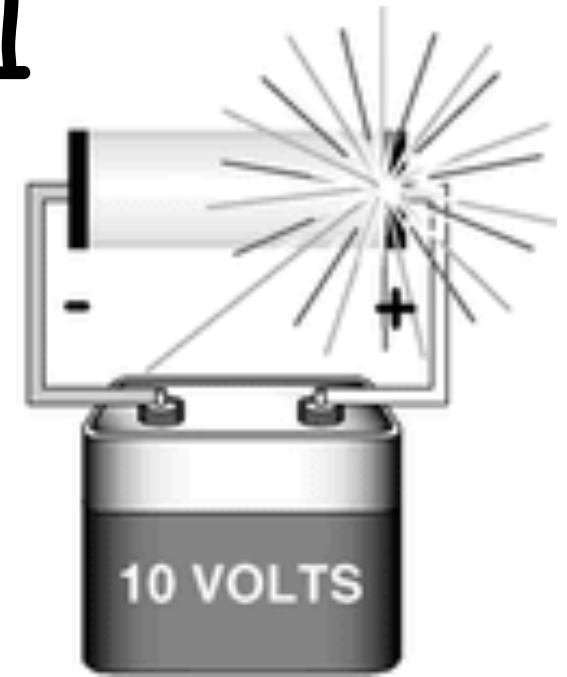
Hvordan virker en accelerator?

- Elektrisk ladede partikler påvirker hinanden med krafter

$$\text{Coulomb's lov: } F = -K q_1 q_2 / r^2$$

$$\text{Newton's lov: } F = m a$$

- En partikel med positiv eller negativ ladning mærker en kraft når den befinder sig i et elektrisk felt. Ifølge Newton's lov bliver partiklen derfor accelereret



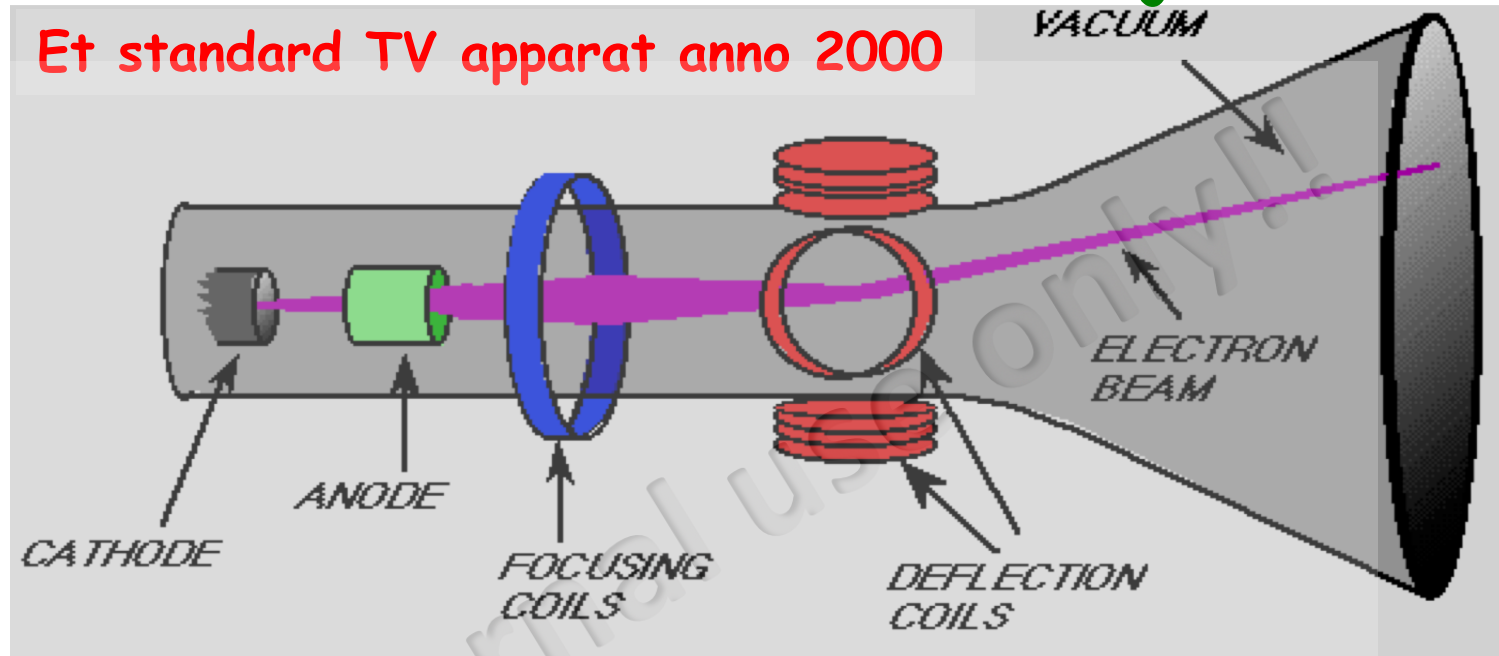
Yeeeeeeehaaaaaaa!!  e-

- 1 eV er energien af en elektron der har passeret er felt på 1 Volt!

En moderne partikelaccelerator

Vi har alle haft en i vores hjem

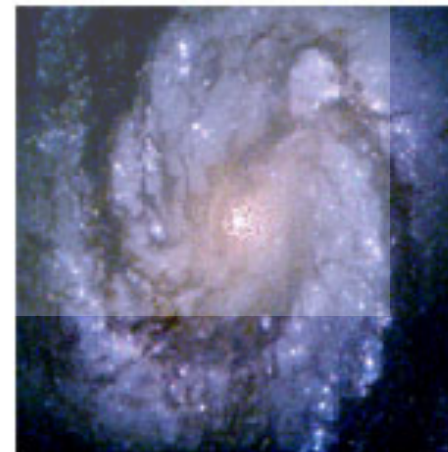
Et standard TV apparat anno 2000



Ved LHC...



X



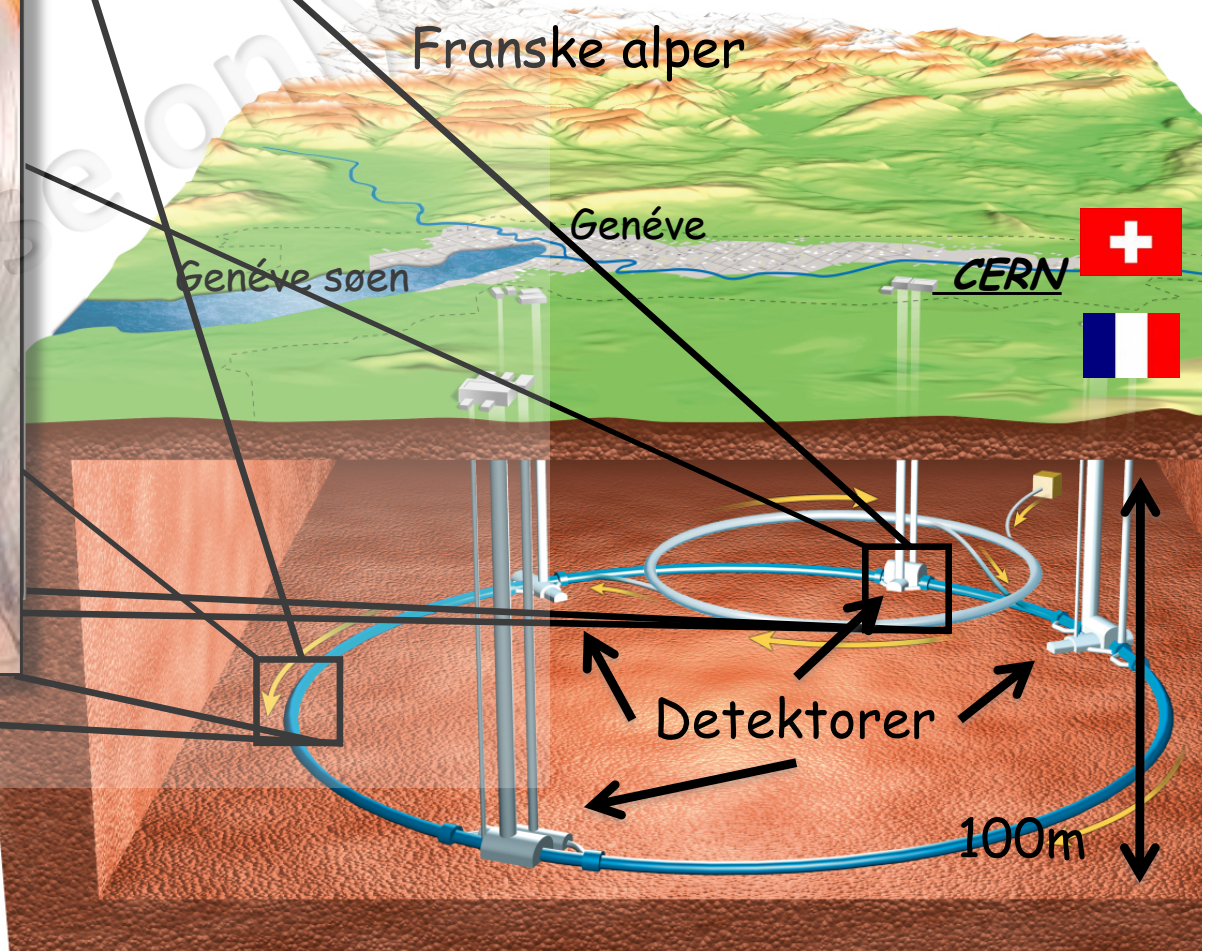
= 1 TeV

1000 milliarder eV svarer til et batteri for hver stjerne i mælkevejen

The Large Hadron Collider



Proton-proton kollisioner med
svimlende energi: 14.000.000.000.000 eV
Svarende til energien af en myg i bevægelse!
7 gange kraftigere end hvad man kan i dag!



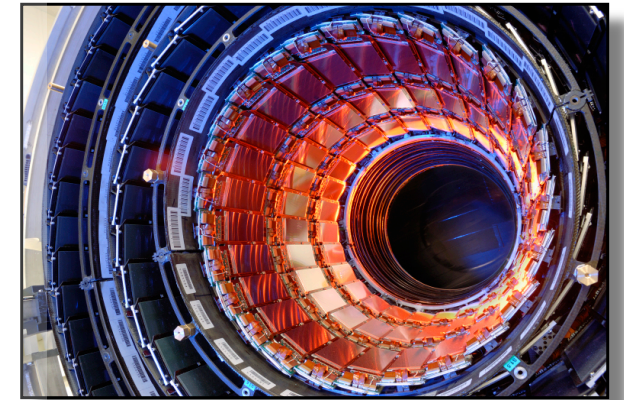
Partiklerne bevæger sig med 99.99...%
af lysets hastighed (~10 km/t under)
Pakker med 100 Milliarder partikler
1000000000 kollisioner i sekundet!

Kan se 10 gange mindre ting end hvad vi kan i dag!

Vores detektorer er 3D digitale kamerarer



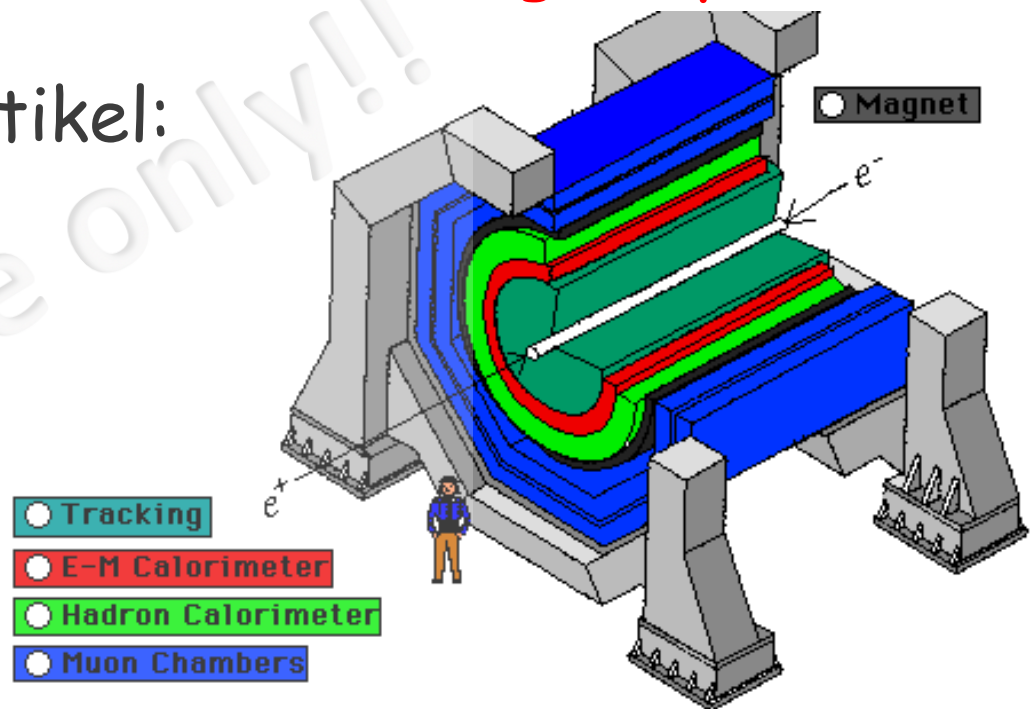
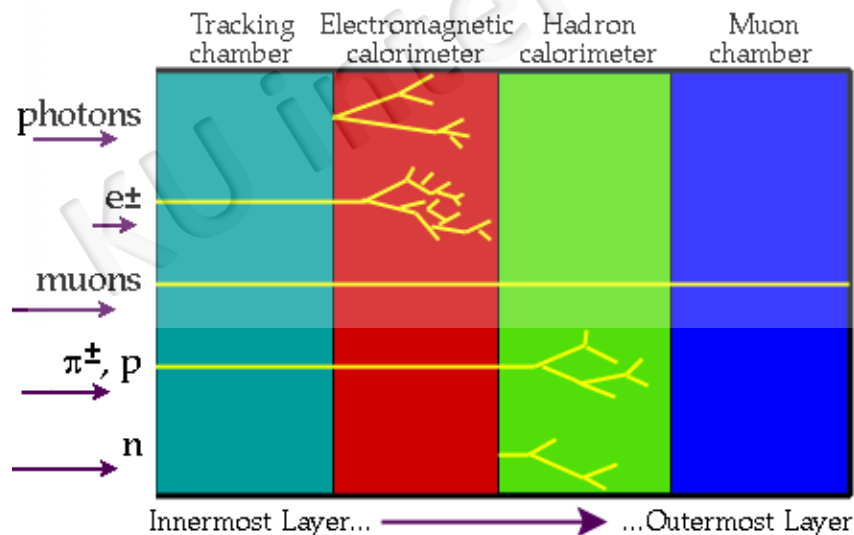
- **Kæmpestore**
Domkirke-størrelse!
- **Ultra-Præcise:**
Bedre præcision end tykkelsen
af et hårstrå!
- **Ekstremt hurtige:**
40 millioner billeder per sekund!
- **Utroligt antal målinger**
Mere end 100 millioner punkter i fuld 3D
- **Bygget af kollaborationer:** Tusindvis af fysikere,
ingenører og teknikere fra mere end 35 lande



Partikeldetektorer

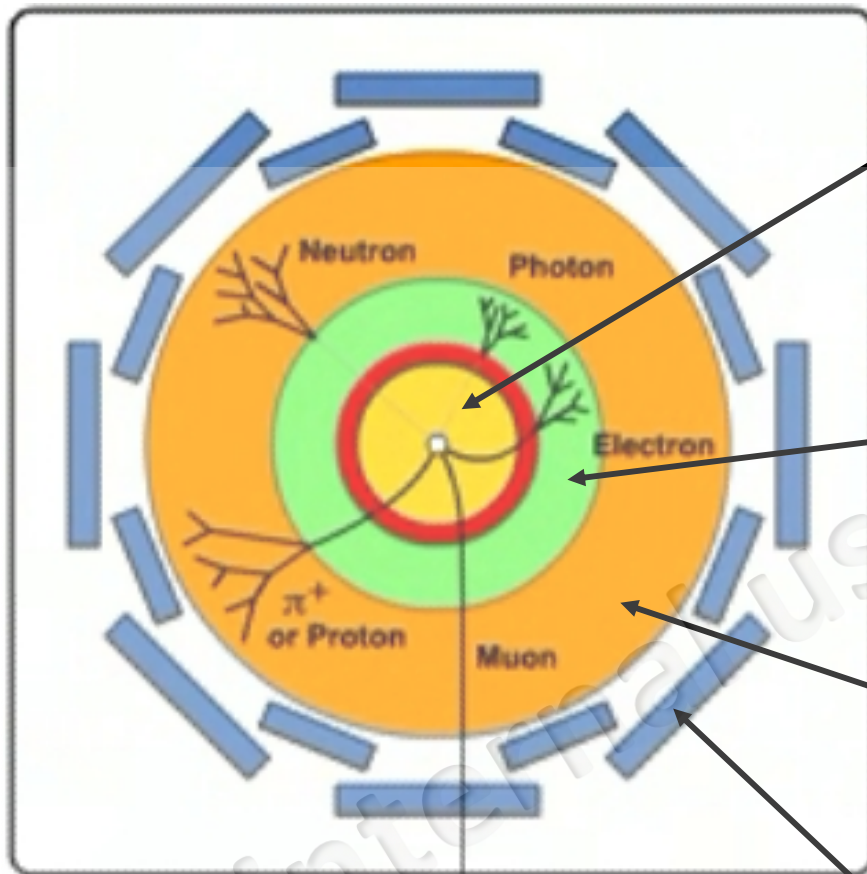
- Umuligt at bruge én detektortype til alt
- Moderne detektorer kombinerer forskellige typer af **sub-detektorer til at måle forskellige aspekter** af en kollision
- Bestemmelse af en partikel:

- Position
- Bevægelsesmængde
- Energi
- Elektrisk ladning
- Type



- Partikler detekteres via deres **vekselvirkning med stof**
- Mange typer af vekselvirkninger er i spil, **hovedsageligt elektromagnetisk**
- I sidste ende: kommer fra **ionisering og eksitation af stof**

Hvordan detekterer man partikler



Spor detektor

-Måler ladning og impuls af ladede partikler i et magnetfelt

Elektro-magnetisk kalorimeter

-Måler energien af elektroner, positroner og fotoner

Hadronisk kalorimeter

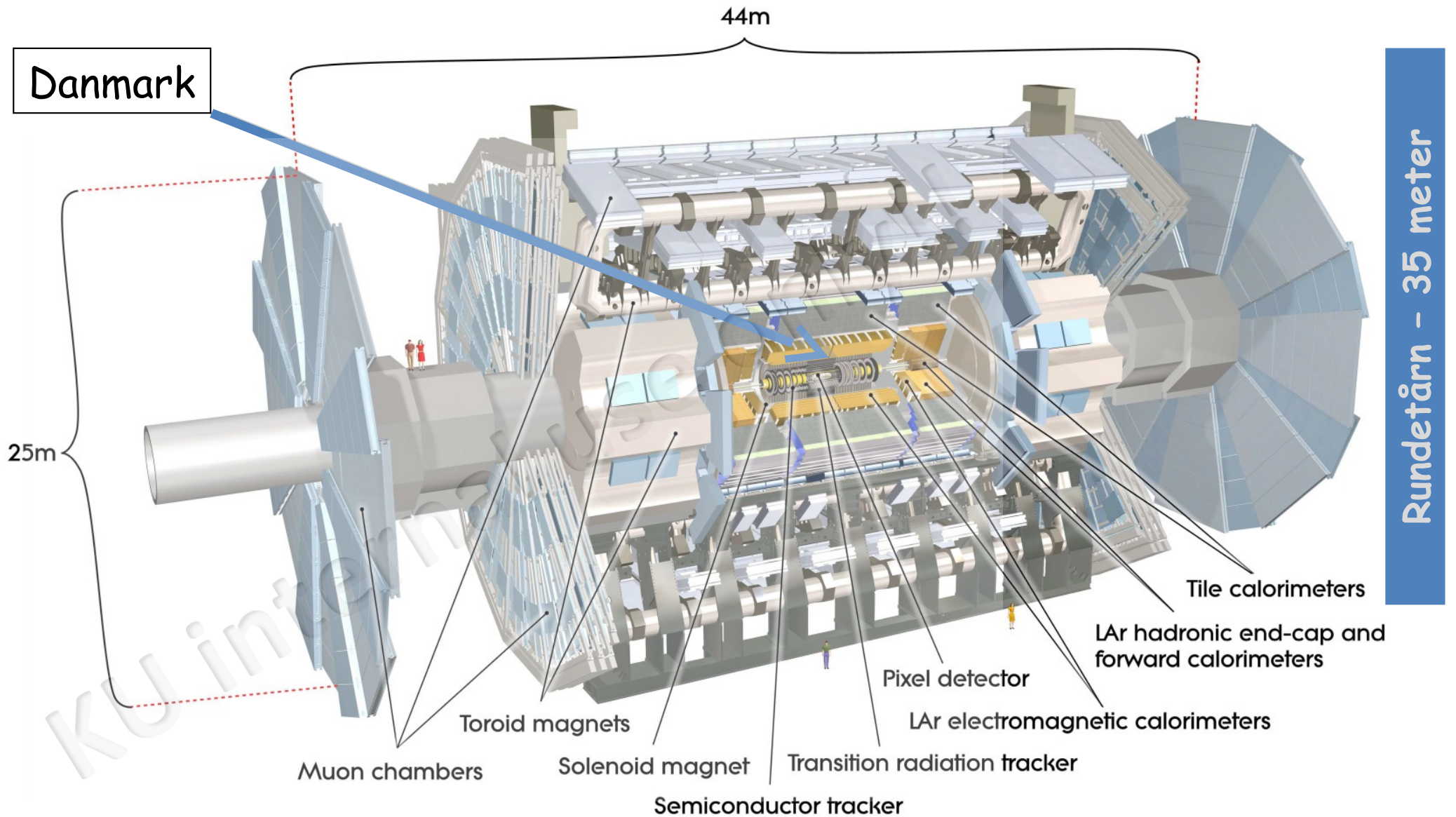
-Måler energien af hadroner (partikler lavet af kvarker), som protoner, neutroner, pioner, osv.

Muon detektor

-Måler ladning og impuls af muoner

Neutrinoer efterlader ingen signaler. De kan "ses" indirekte via 'manglende' impuls, p eller p_T .

ATLAS Detektoren



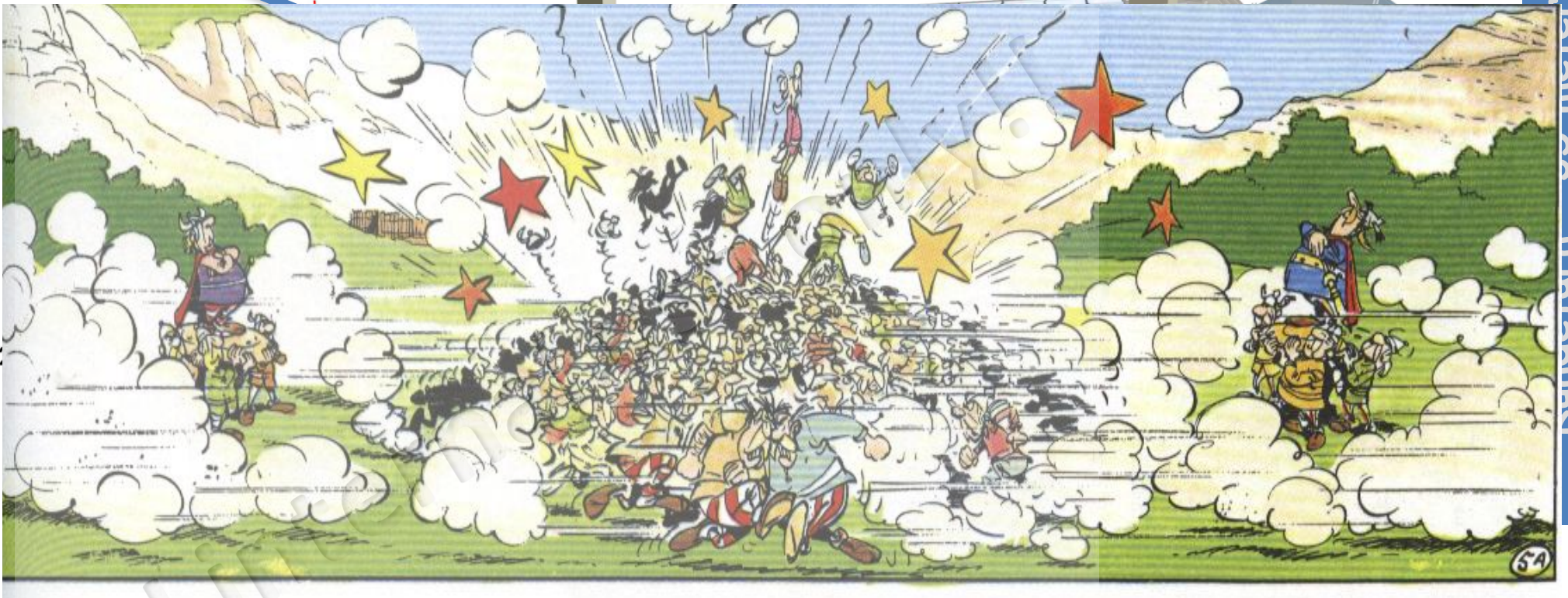
Samlet vægt: 7000 tons
(sammenlign med rundetårn: 5900 tons)

© Jørgen Beck Hansen – ikke til distribution

ATLAS Detektoren

44m

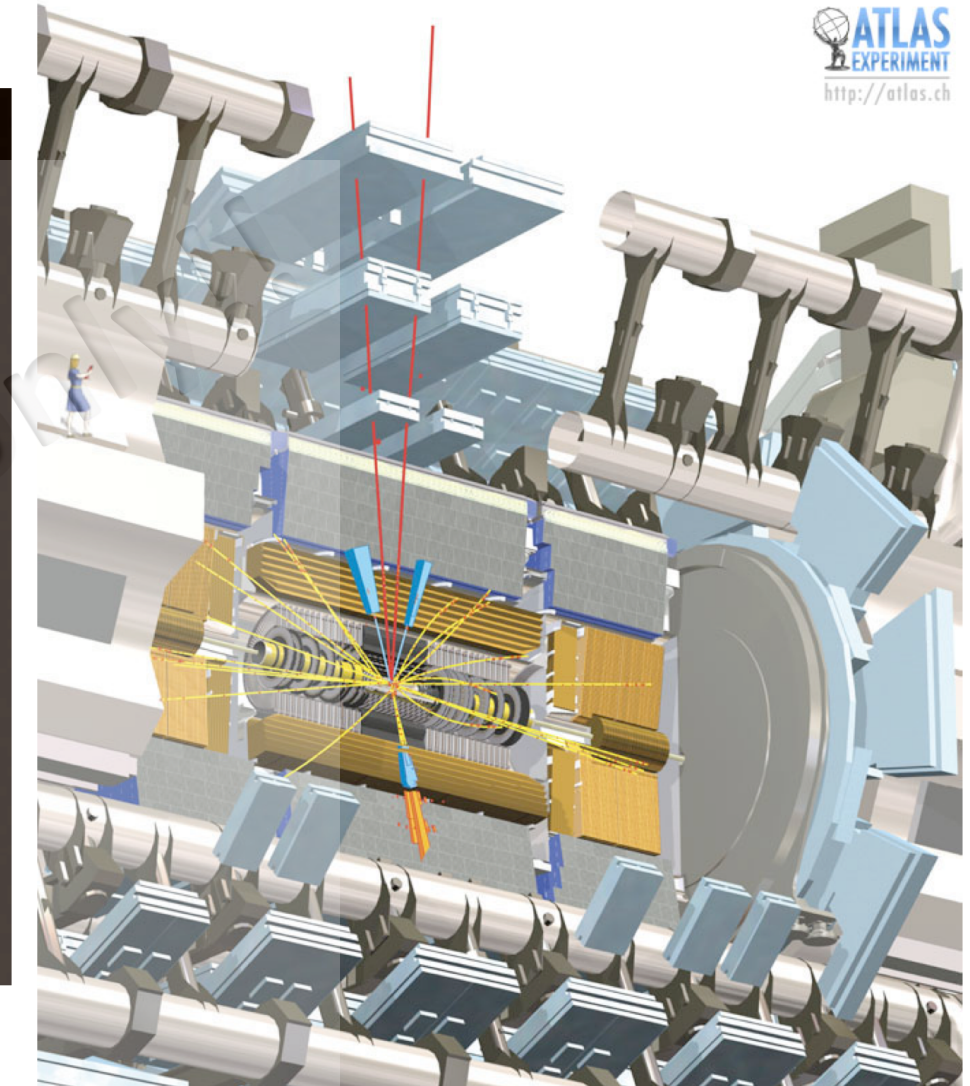
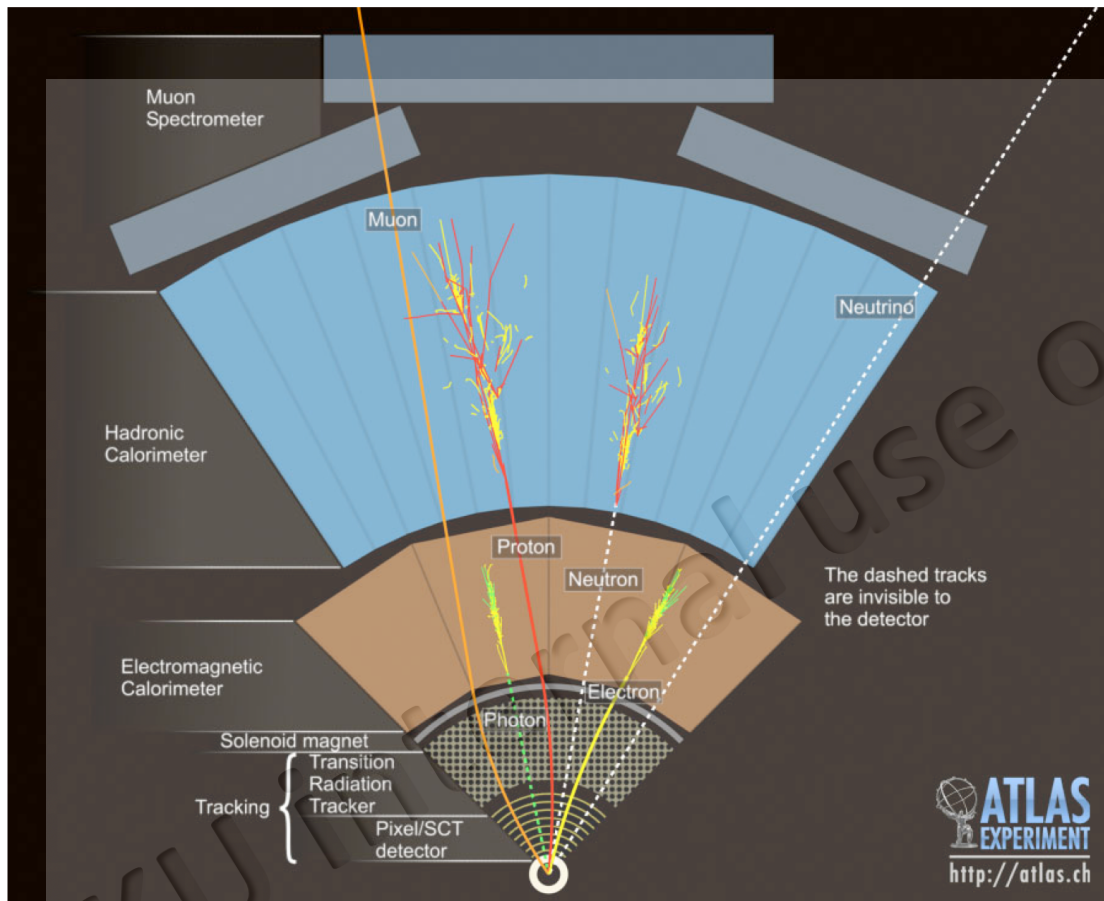
Danmark



10000000000 gange I sekundet!!

Samlet vægt: 7000 tons
(sammenlign med rundetårn: 5900 tons)

Hvordan virker detektoren?



Opgaven: Find, type-bestem og mål alt om alle partikler der kommer ud fra kollisionen

På jagt efter Higgs-partiklen!

Øvelsen (bruger **simulerede data**)

- Identificer elektroner, muoner, neutrinoer i ATLAS detektoren
 - Atlantis visualiserings programmet
- Type af Begivenheder ("partikler produceret i een kollision")
 - a) $W \rightarrow e\nu$
 - b) $W \rightarrow \mu\nu$
 - c) $Z \rightarrow ee$
 - d) $Z \rightarrow \mu\mu$
 - e) Baggrund fra jet produktion (som ser lidt ud som W or Z event)
- Spørgsmål: henfalder W or Z lige ofte til elektroner or muoner?

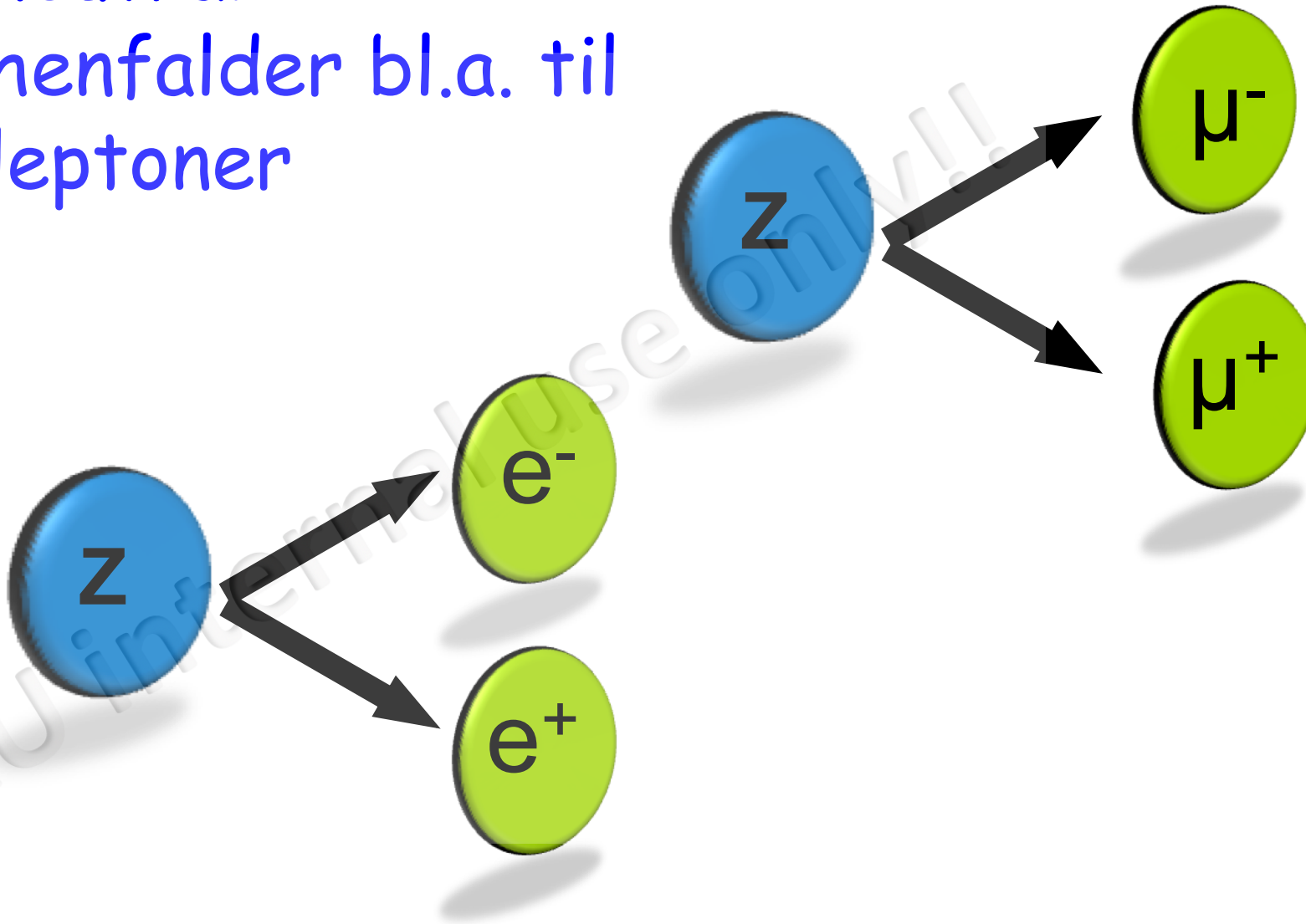
Een af begivenhederne er en kollision med en Higgs-partikel,

Higgs henfald: $H \rightarrow eeee$, $H \rightarrow \mu\mu\mu\mu$, eller $H \rightarrow ee\mu\mu$

Kan I finde den????

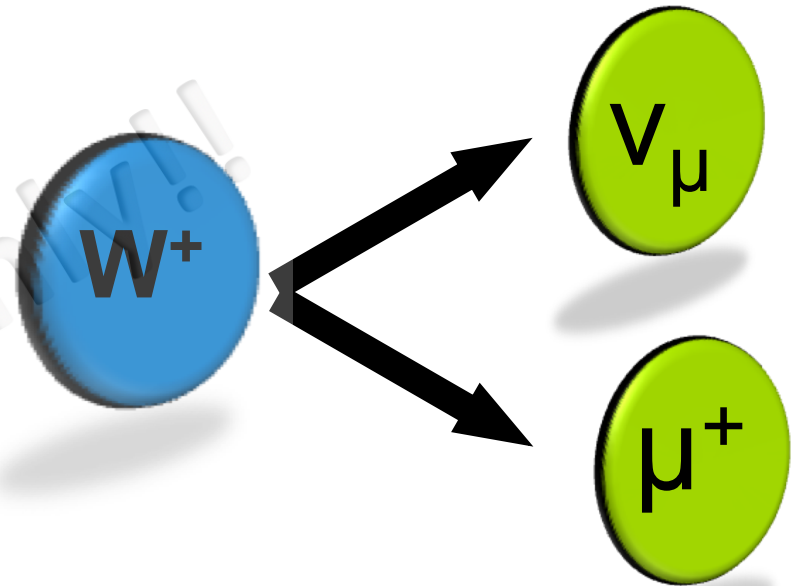
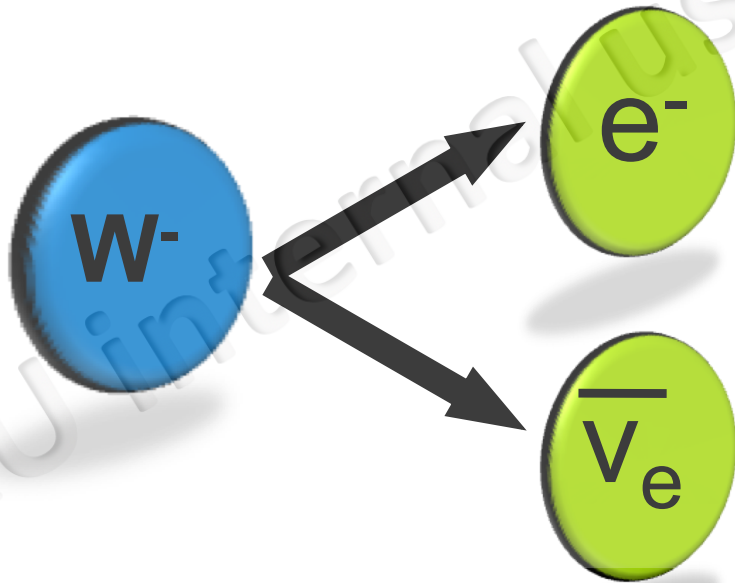
Z bosonen

- neutral
- henfalder bl.a. til leptoner



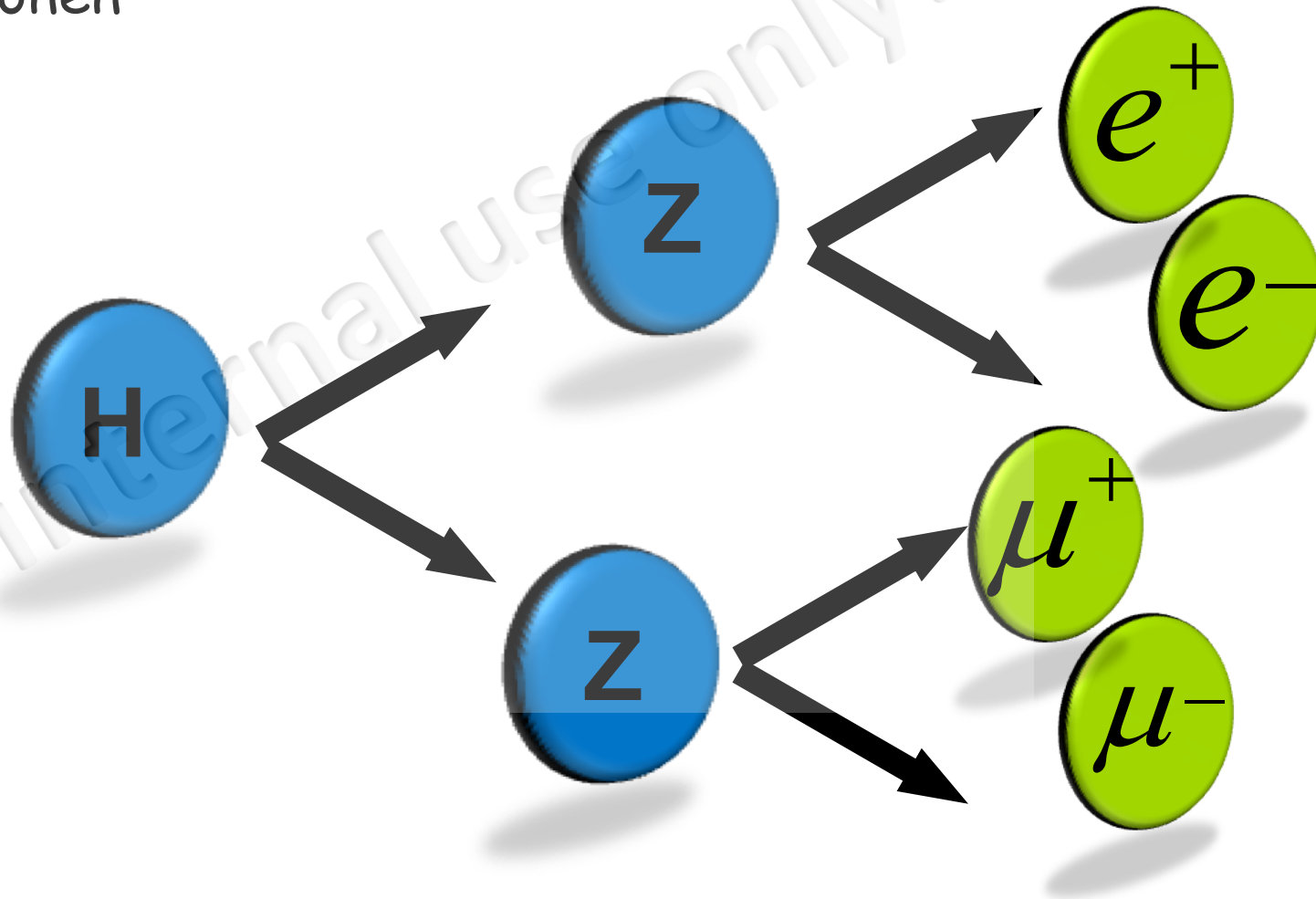
W bosonen

- ladet (+ eller -)
- henfalder bl.a. til leptoner+neutrinoer



Higgs-bosonen

- Higgs bosonen er neutral og kan, hvis den er tung nok, henfalde til 2 Z bosoner, som så hver kan henfalde til et lepton-par
- Første skridt mod at kunne finde Higgs-partiklen er Z bosonen

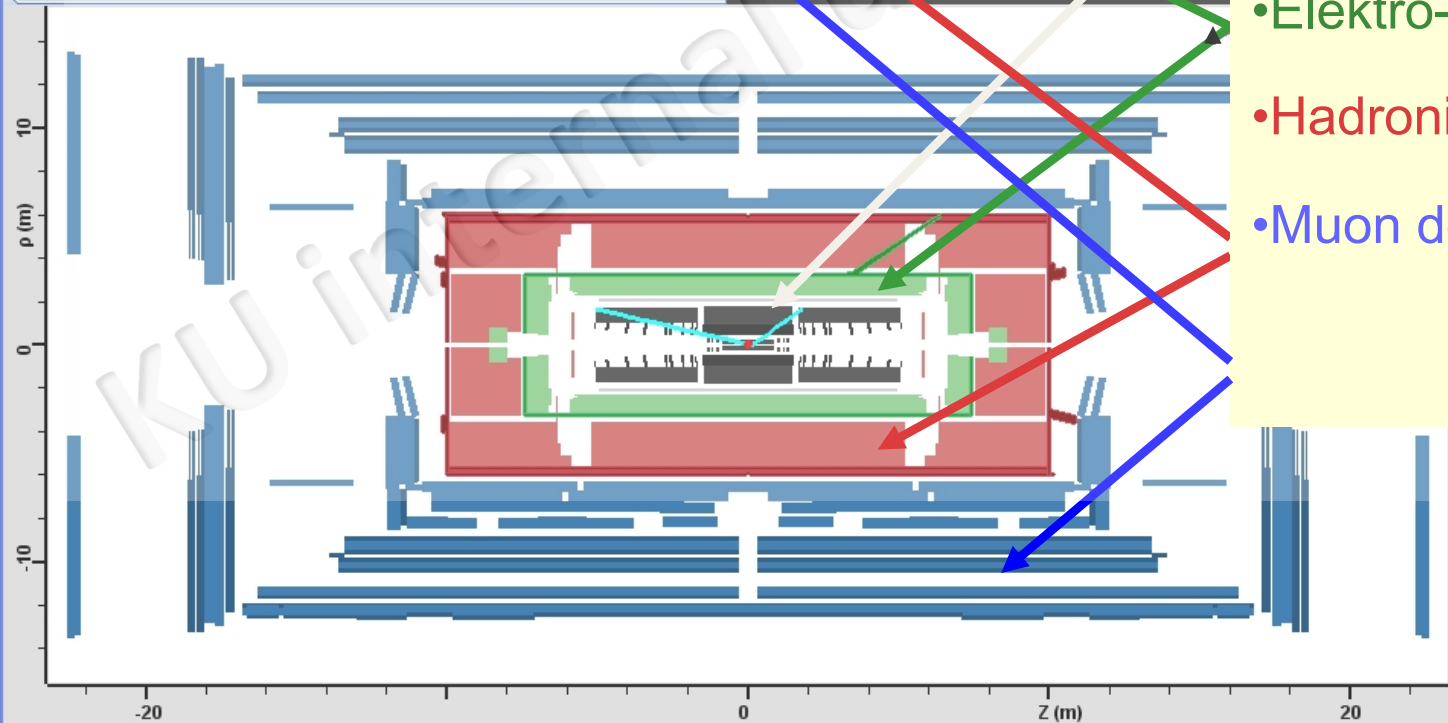


ATLAS



Detalje

- Ikke ALLE partikler måles - mange går tabt i den "forlæns" region (beam-røret)
- Derfor fokuseres på den "sidelæns" komponent – x-y planet



Projection		Data	Cuts
Data		Name	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Status		
<input checked="" type="checkbox"/>	InDet		
<input checked="" type="checkbox"/>	Calo		
<input checked="" type="checkbox"/>	MuonDet		
<input checked="" type="checkbox"/>	Objects		

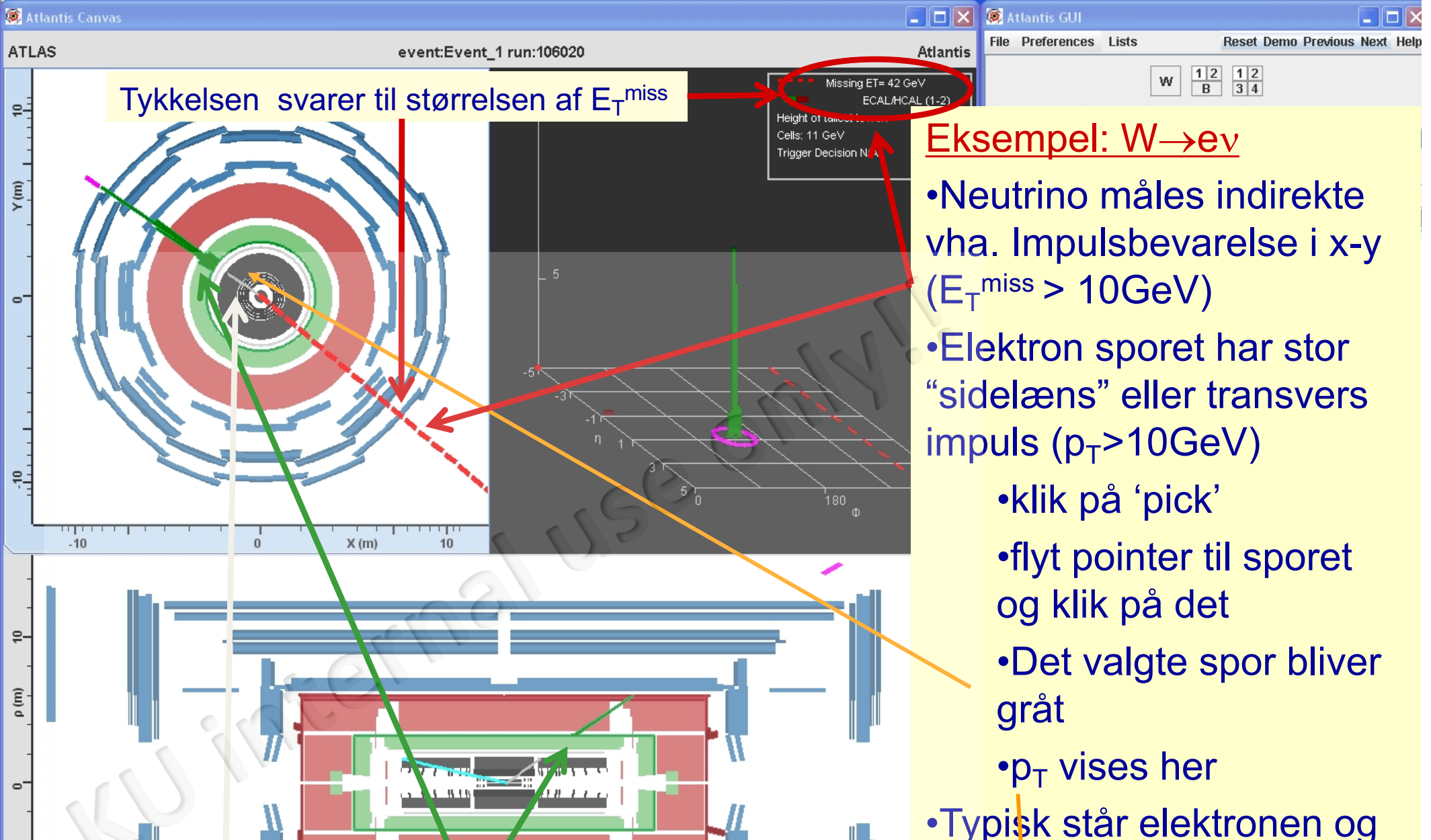
- Spor detektor (mange under-systemer)
- Elektro-magnetisk kalorimeter
- Hadronisk kalorimeter
- Muon detektor

Welcome to Atlantis !

reading event: Event_1.xml

Event_1.xml

run number: 106020 event number: 326459



Tykkelsen svarer til størrelsen af E_T^{miss}

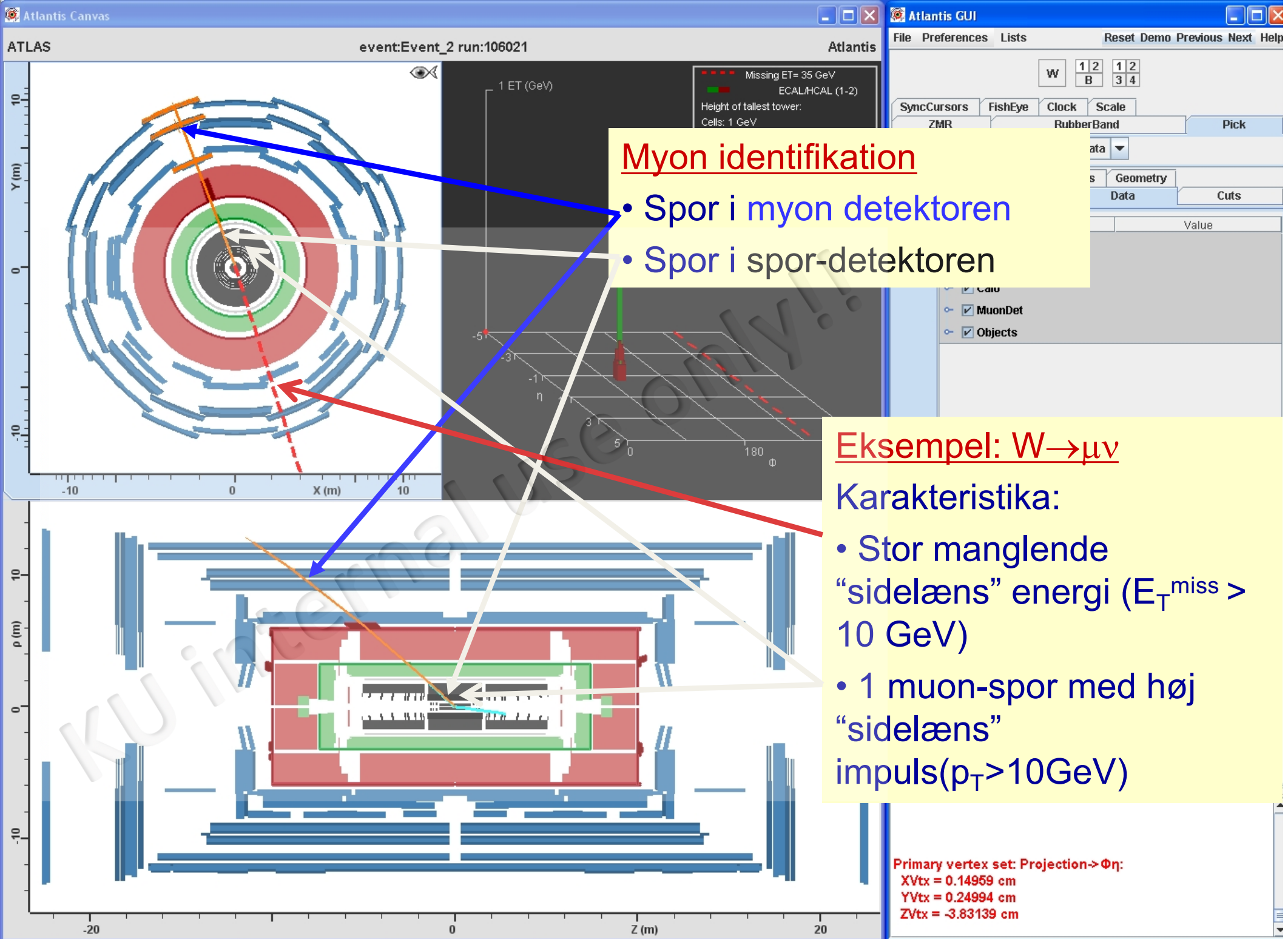
Eksempel: $W \rightarrow e\nu$

- Neutrino måles indirekte vha. Impulsbevarelse i x-y ($E_T^{\text{miss}} > 10\text{GeV}$)
- Elektron sporet har stor "sidelæns" eller transvers impuls ($p_T > 10\text{GeV}$)
 - klik på 'pick'
 - flyt pointer til sporet og klik på det
 - Det valgte spor bliver gråt
 - p_T vises her
- Typisk står elektronen og E_T^{miss} 'ryg-mod-ryg' i end-view'et

Elektron identifikation

- Energi i det **elektromagnetiske kalorimeter**
- Spor i **spor-detektoren** (foran EM kalorimeter)
- Intet i andre detektordele





Myon identifikation

- Spor i myon detektoren
- Spor i spor-detektoren

Eksempel: $W \rightarrow \mu\nu$

Karakteristika:

- Stor manglende "sidelæns" energi ($E_T^{\text{miss}} > 10 \text{ GeV}$)
- 1 muon-spor med høj "sidelæns" impuls ($p_T > 10 \text{ GeV}$)

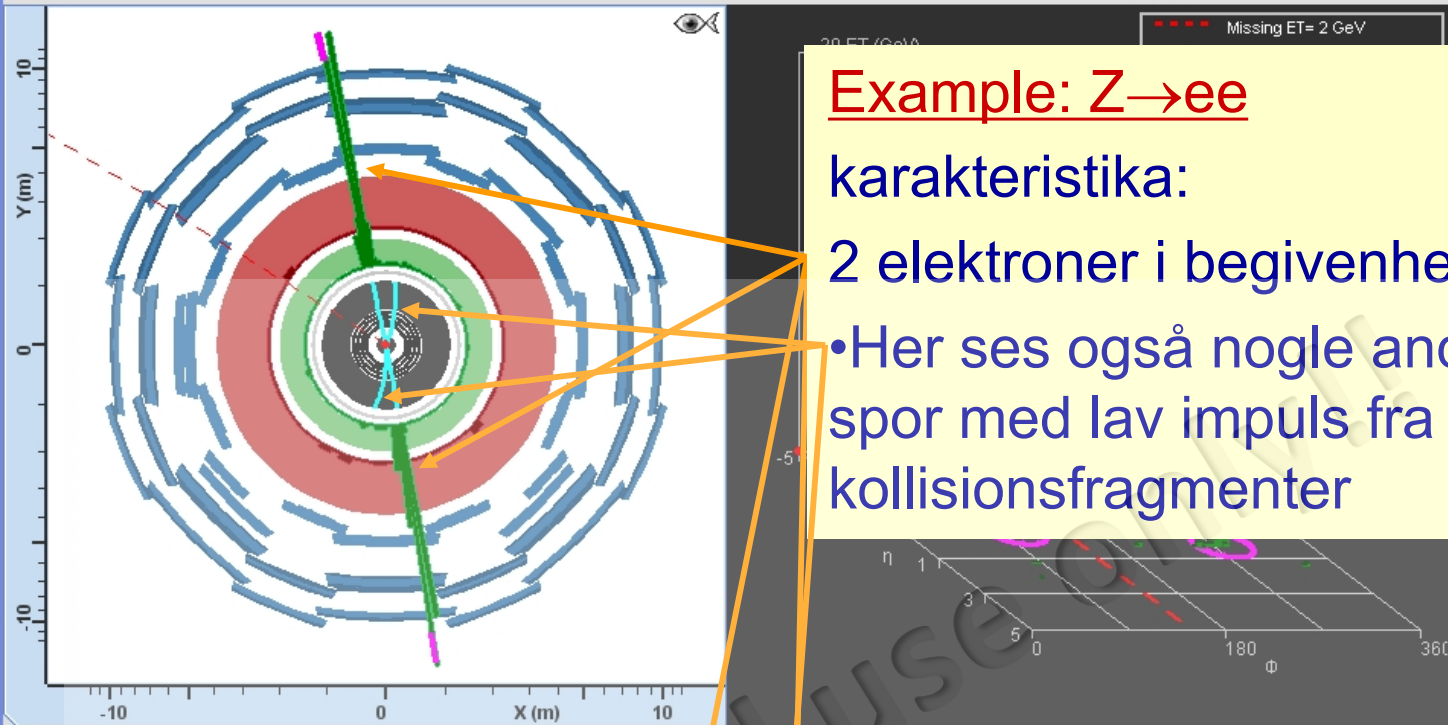
Primary vertex set: Projection $\rightarrow \Phi\eta$
 $XVtx = 0.14959 \text{ cm}$
 $YVtx = 0.24994 \text{ cm}$
 $ZVtx = -3.83139 \text{ cm}$

ATLAS

event:Event_3 run:106050

Atlantis

File Preferences Lists Reset Demo Previous Next Help

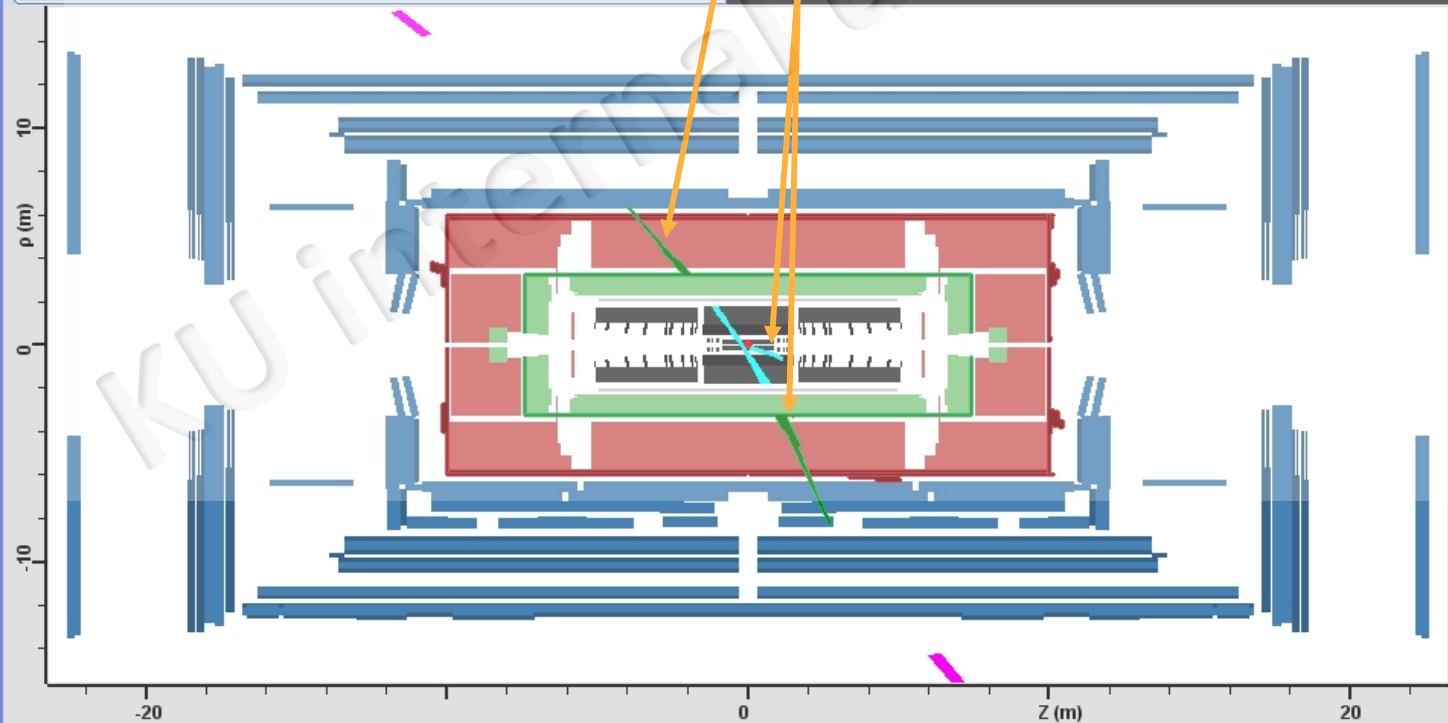


Example: $Z \rightarrow ee$

karakteristika:

2 elektroner i begivenheden

- Her ses også nogle andre spor med lav impuls fra kollisionsfragmenter

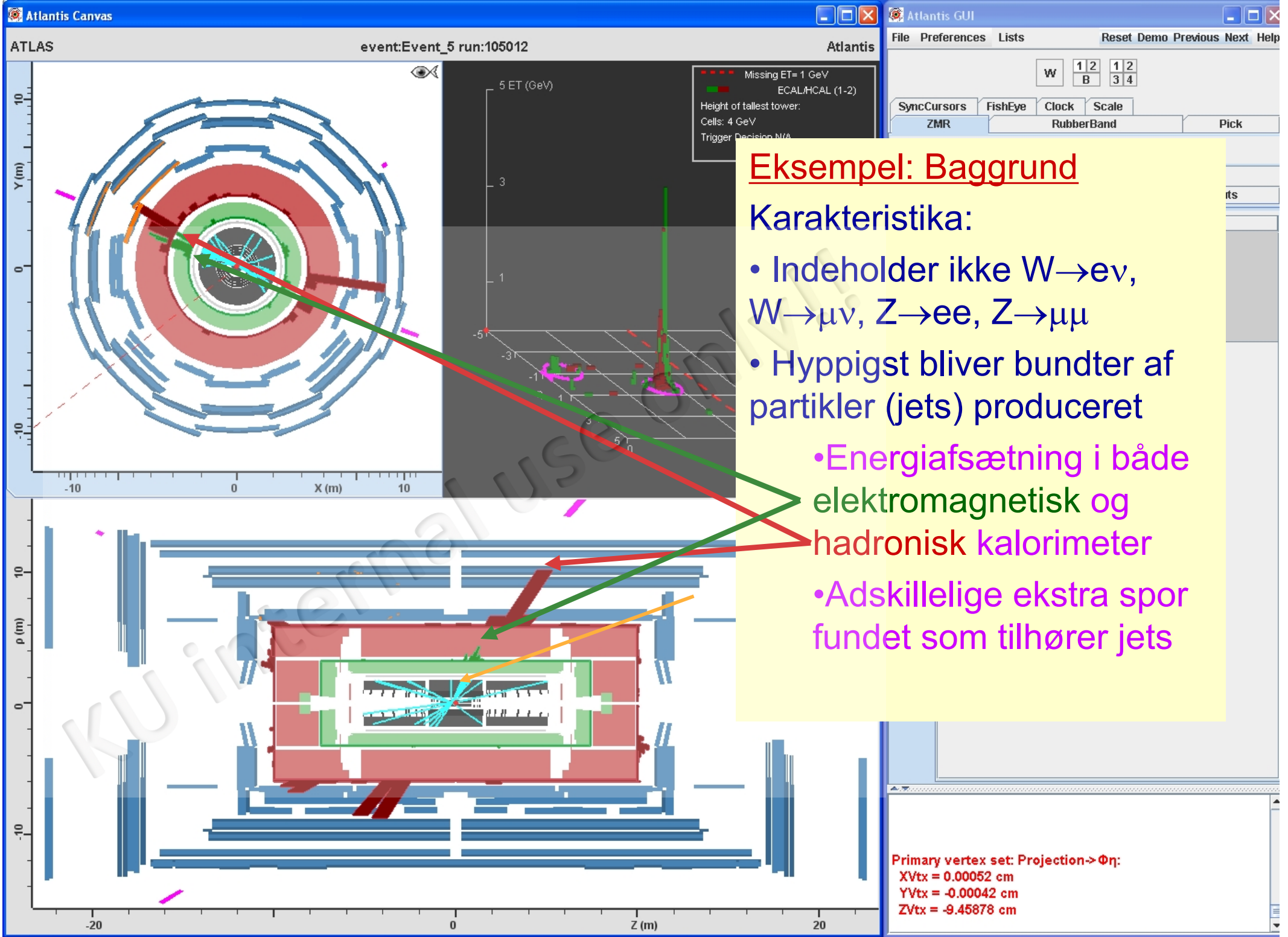


Primary vertex set: Projection $\rightarrow \Phi\eta$:

XVtx = 0.15096 cm

YVtx = 0.25036 cm

ZVtx = -9.77545 cm



Eksempel: Baggrund

Karakteristika:

- Indeholder ikke $W \rightarrow e\nu$, $W \rightarrow \mu\nu$, $Z \rightarrow ee$, $Z \rightarrow \mu\mu$
- Hyppigst bliver bundter af partikler (jets) produceret
- Energiafsætning i både elektromagnetisk og hadronisk kalorimeter
- Adskillelige ekstra spor fundet som tilhører jets

Primary vertex set: Projection-> $\Phi\eta$:
 XVtx = 0.00052 cm
 YVtx = -0.00042 cm
 ZVtx = -9.45878 cm

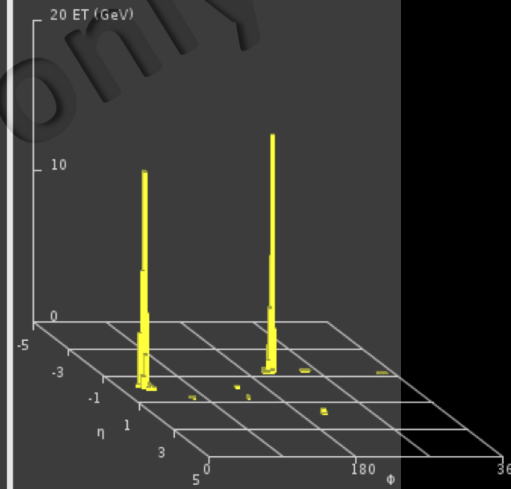
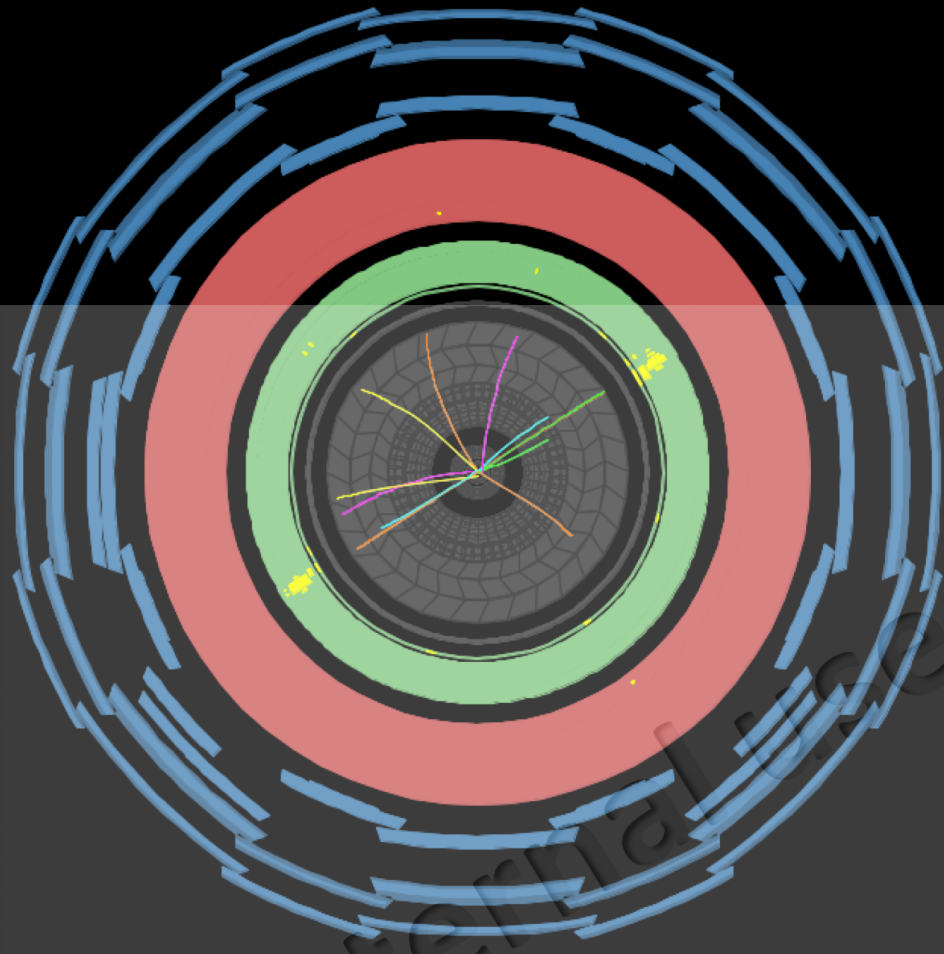
Eksempler

I Atlantis/Minerva...

KU internal use only!!!



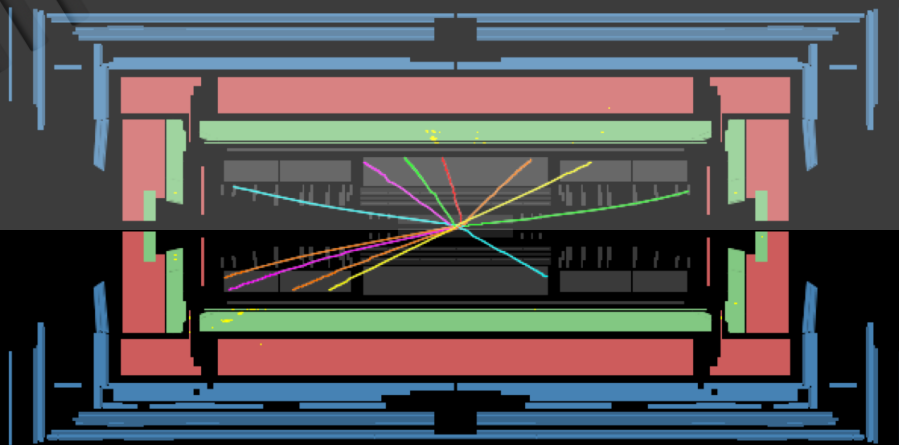
Run Number: 106050, Event Number: 7818

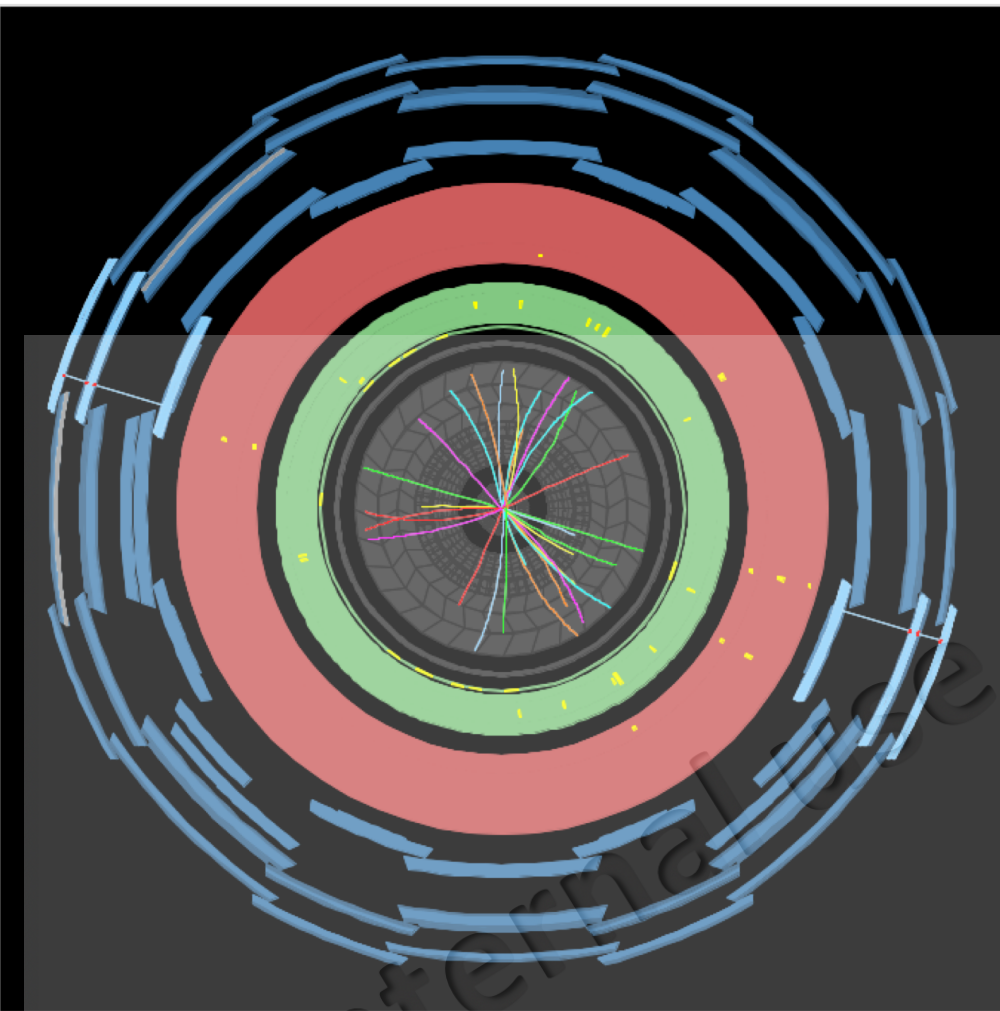


Hvad ser du?

Nogen tegn på elektroner eller myoner?
Manglende energi?

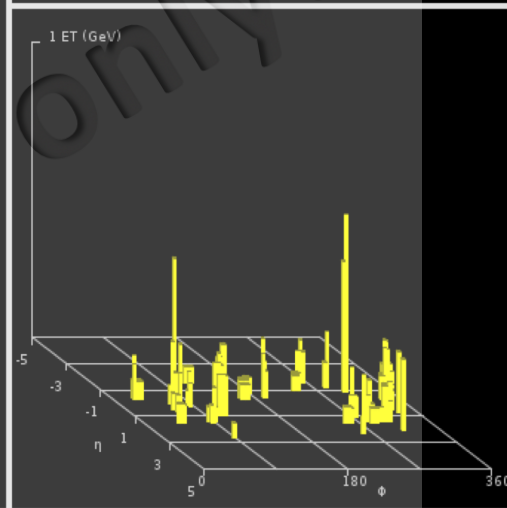
Hvilken slags begivenhed kunne det være?





 **ATLAS**
EXPERIMENT

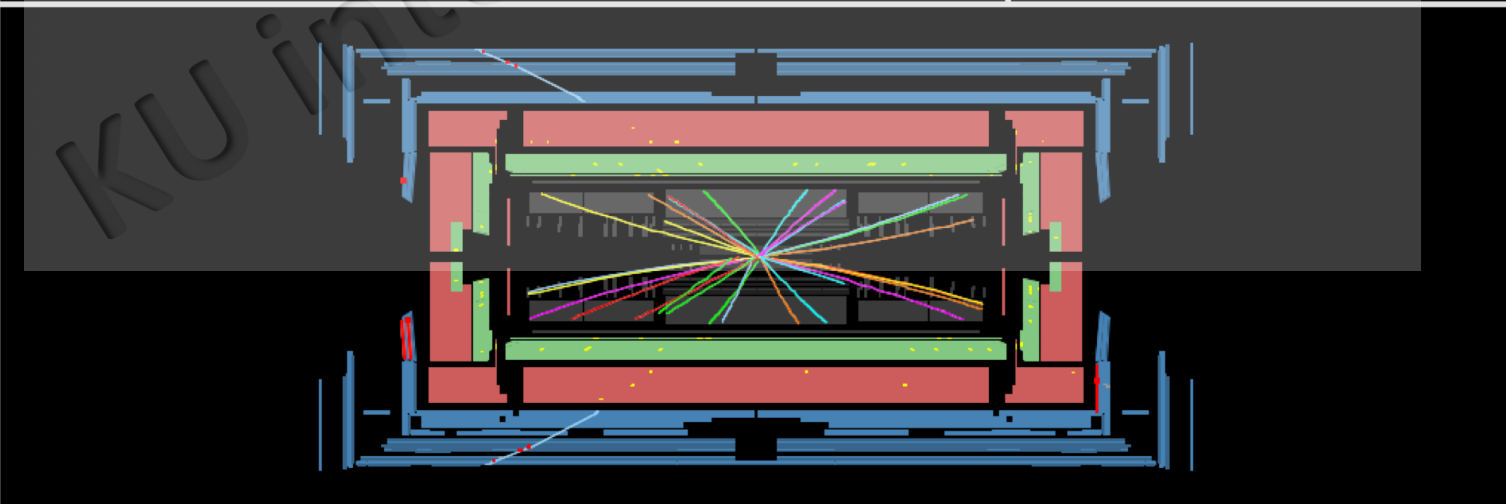
Run Number: 106051, Event Number: 373671



Hvad ser du?

Nogen tegn på
elektroner eller
myoner?
Manglende
energi?

Hvilken slags
begivenhed
kunne det være?



Slut?

Higgs'en er jo fundet?

Nej! Mange fundamentale spørgsmål er ubesvaret...

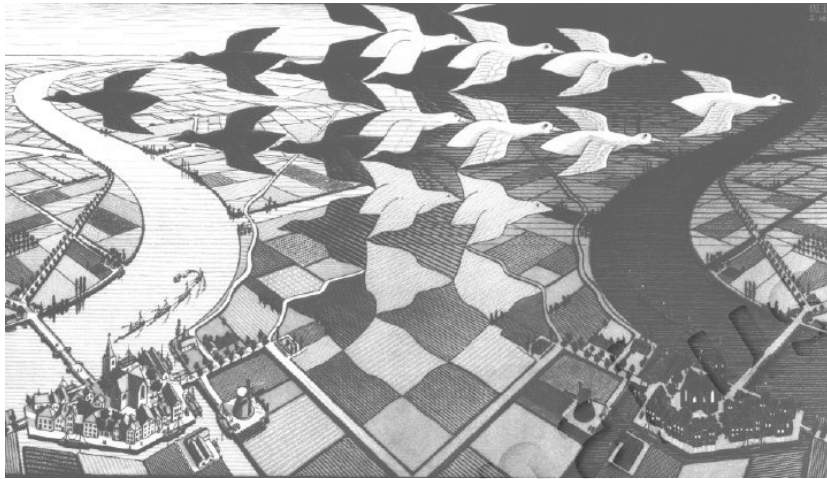
Faktisk burde universet eller vi ikke eksistere!

Problemer,

Problemer,

Problemer!

Hvor er alt anti-stoffet?



Stof og anti-stof
burde være blevet skabt
i lige store mængder



Universet gemmer over en subtil
forskkel mellem stof og anti-stof...
Hvad er årsagen til denne forskel?

Det er derfor vi **OVERHOVEDET** er her!
Vi er skabt af det stof som blev til overs ved universets fødsel

Hvad er mørkt eller "Usynligt" stof?

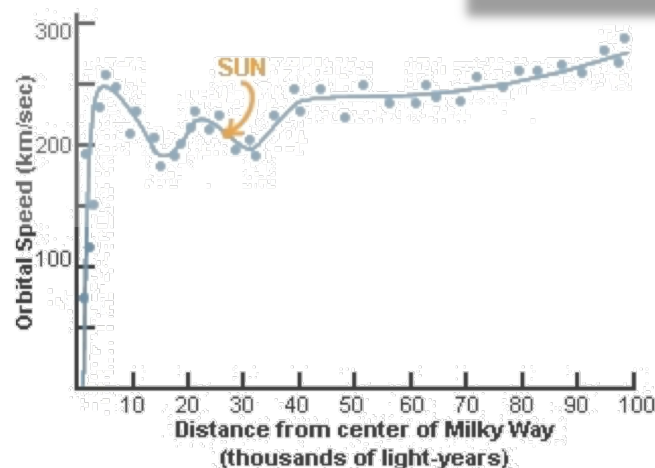
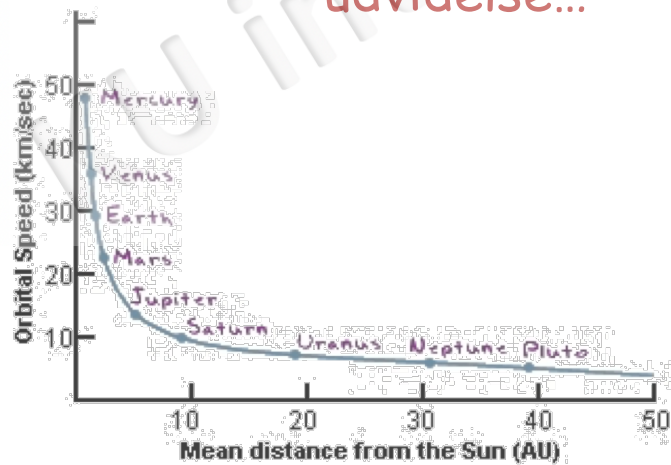
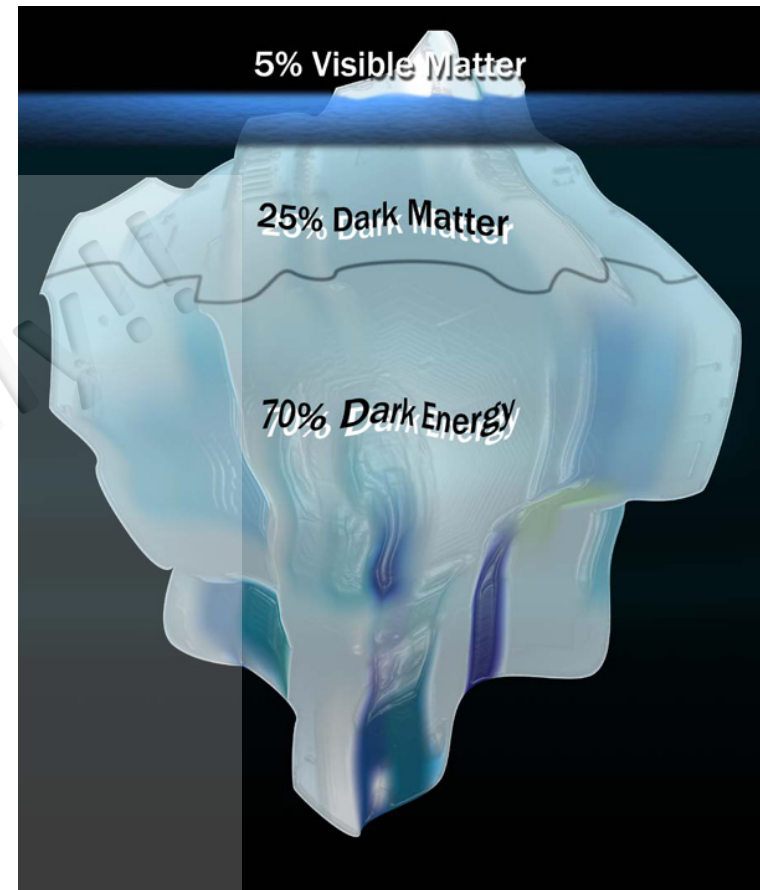
Normalt: Består af atomer
Inkluderer stjerner,
planeter, mennesker...

Mørkt Stof: Ukendt natur
(ikke atomer)
kunne være en "tung fætter"
til fotonen:

super-tungt LYS

Se det ved at prøve at skabe det

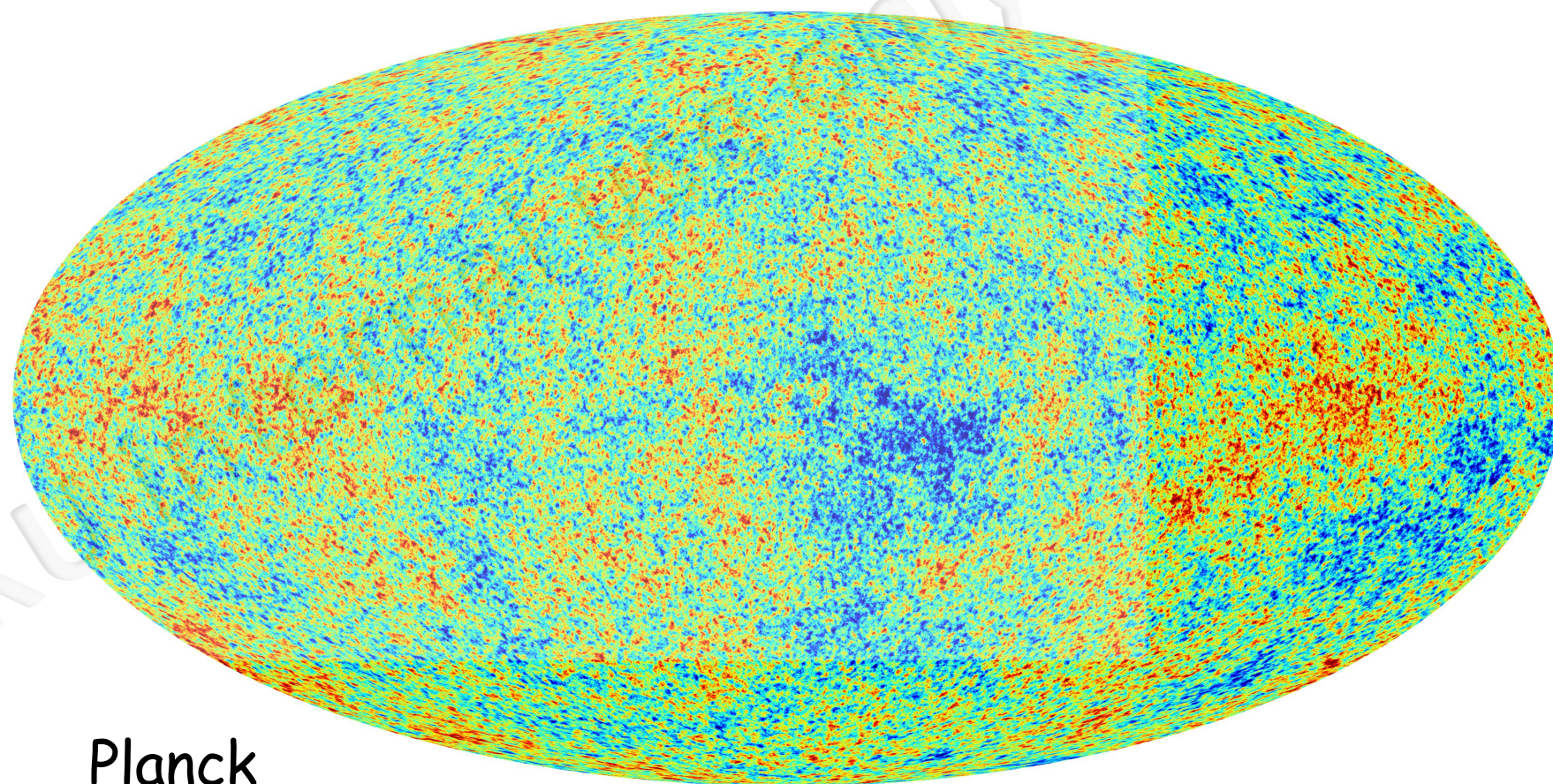
Mørkt energi: Endnu mere mærkeligt!
Det accelererer universets
udvidelse...



Hvad er mørk energi?

Den kosmiske mikrobølge baggrundsstråling er ekstremt isotropisk med en temperatur på $T_{\text{CMB}} = 2,725 \text{ K}$.

Mørk energi frastøder stof og dermed **accelererer** det universets udvidelse...

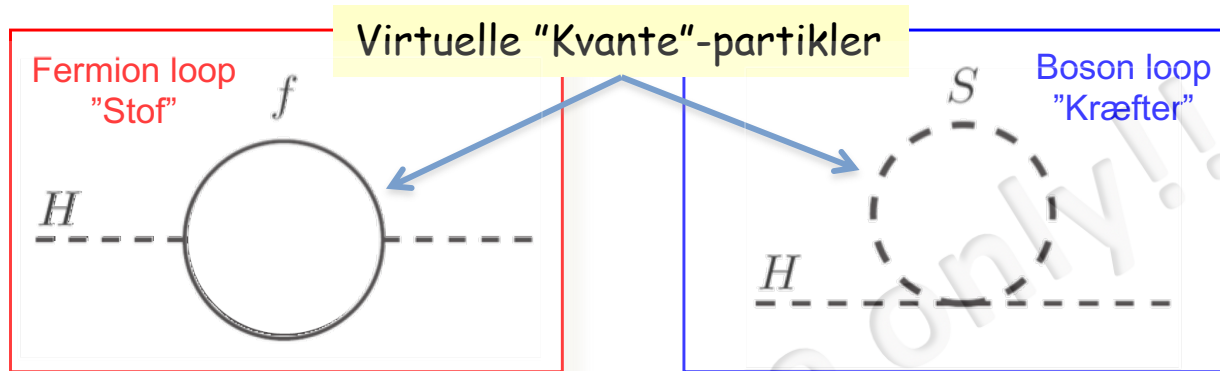


Planck



Er det "nok" at finde Higgs'en?

- **NEJ!** → Kvanteeffekter er katastrofale for Higgs-partiklen!



→ Korrektion til Higgs partiklen masse δm_H

- Resultat i Standardmodellen

$$m_H + \delta m_H \approx ??? + 1000000000000000000000000 (10^{19}) \text{ GeV!}$$

"Catch 22"

Higgs-partiklen **skal være let** for at Standard modellen virker
Men beregner vi Higgs-partiklens masse i Standard modellen bliver den (næsten) **uendelig tung**...

Stephen Hawking: **"We have not yet observed an elementary spin-0 (Higgs) particle, and I predict we never will."**

Hvorfor er tyngdekraften så svag?

Tyngdekraften mellem 2 elektroner er **42**

størrelsesordener svagere end den elektriske kraft imellem dem

- $10^{42} =$
1,000,000,000,000,000,000,000,00
0,000,000,000,000,000,000,000,0
00

Alle de andre kræfter har omkring den samme styrke som den elektriske kraft

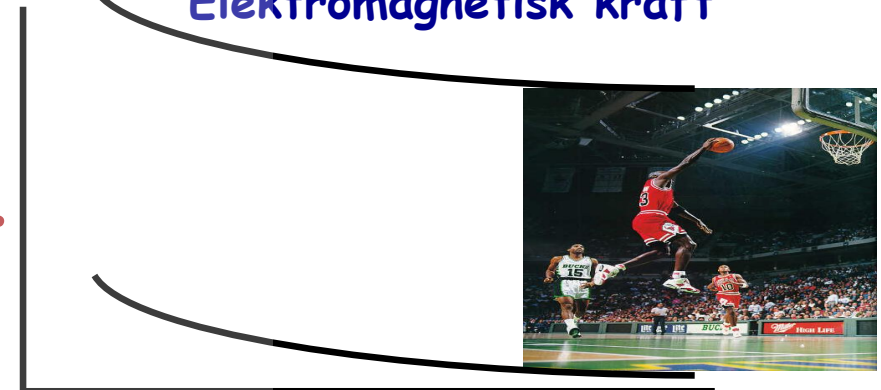
Der må være noget vi ikke har forstået



$$F_C = k_c \frac{q_e q_e}{r^2}$$

Elektromagnetisk kraft

Styrke

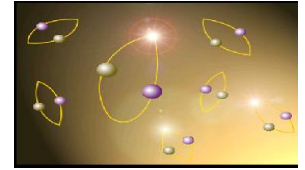


Tyngdekraft

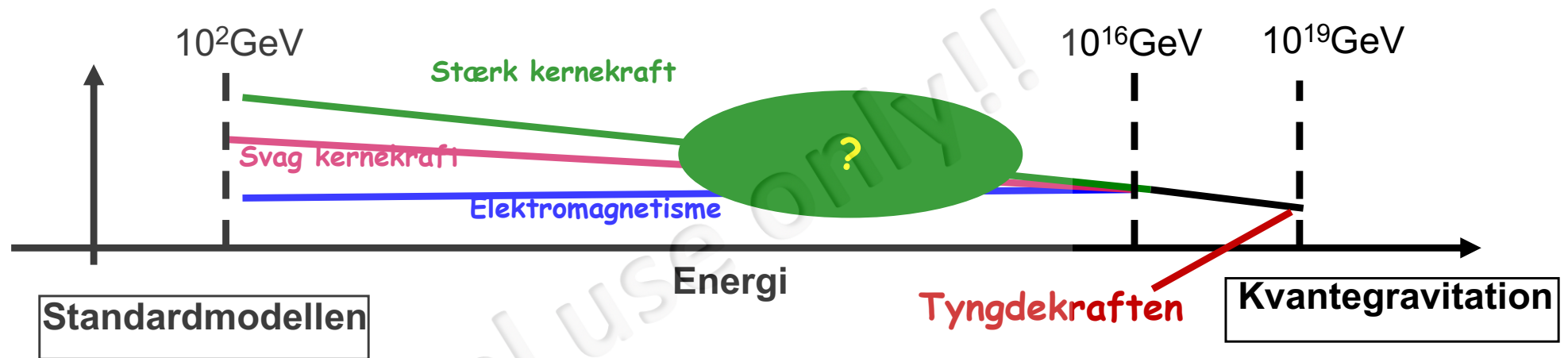
Afstand

$$F_G = G_N \frac{m_e m_e}{r^2}$$

Einstein's drøm ... eller mareridt?



Foreningen af naturkræfterne - hvorfor er de ikke lige stærke??

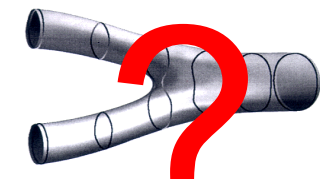


Standardmodellen forklarer **IKKE** tyngdekraften



Derfor **VED** vi at modellen ikke kan være den endelige teori og noget nyt skal dukke op

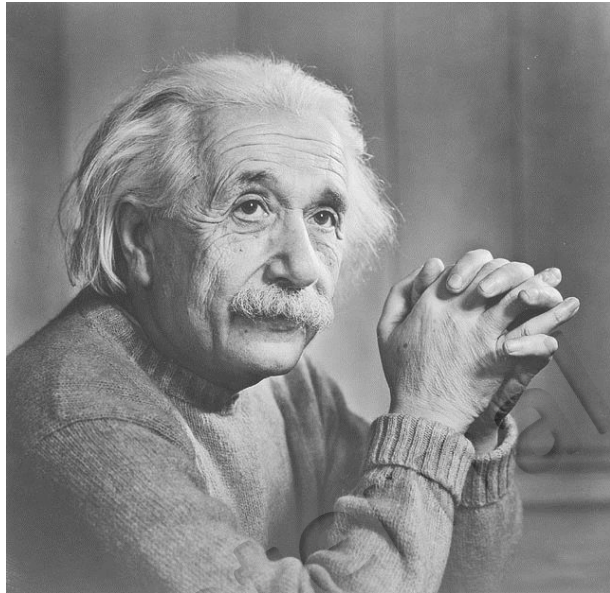
Standardmodel + **Relativitetsteori** = ?



Strengteori ?

Men: Hvis den **velkendte tynde kraft** skaber problemer...
Hvad så med alt det vi **VED**, at vi **IKKE** ved?
Eller det vi **IKKE** ved, at vi **IKKE** ved?

En teori om Alting: Strengteori



Einstein

"...there are no arbitrary constants ... nature is so constituted that it is possible logically to lay down such strongly determined laws that within these laws only rationally determined constants occur (not constants, therefore, whose numerical value could be changed without destroying the theory)."

Strengteori

Strengteori ser ud til at realisere Einsteins drøm om en konsistent teori for **kvantegravitation** og en forenet teori for alle kræfter og partikler

Teorien Om Alting (TOE)

- Der skal være **ekstra rumlige dimensioner**

En unik teori for kvantestrenge kræver 10 dimensioner

- Der skal være **supersymmetri**

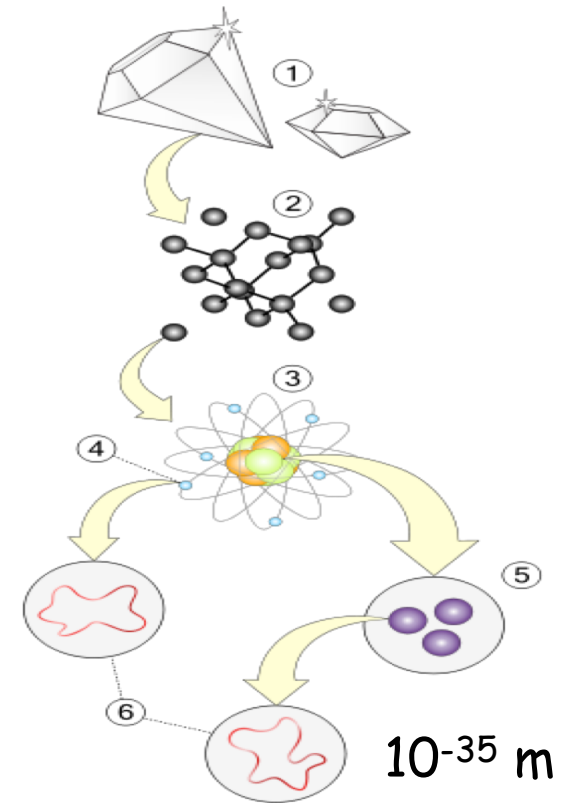
- Strengte er **MEGET SMÅ**

ca. 10000000000000000000

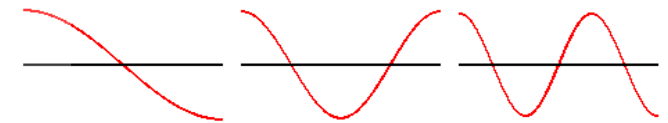
gange **mindre end kvarker**

- Vi kan **ikke opdage** strengte ved LHC

→ Skal bruge en accelerator på størrelse med Mars' bane



Vibrationer → Partikler



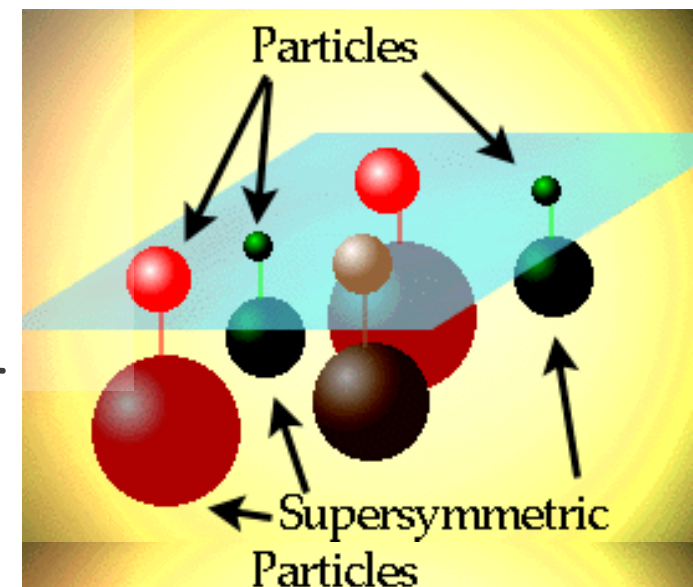
Up-kvark Down-kvark electron

Strengteori har inspireret til 2 teorier ved LHC

Hvad er Supersymmetri?

Der er 2 klasser af partikler i naturen: Fermioner og bosoner.

- Fermioner er "spin-1/2" partikler - hvilket betyder at de SKAL følge **Pauli's udelukkelsesprincip** - **holder sig fra hinanden** - bor ALTID på eneværelser
- Bosoner er "spin-0" eller "spin-1" - og **elsker hinandens selskab** - bor i store fælles rum på vandrehjem
- **Supersymmetri** siger at for enhver fermion i naturen er der en boson og omvendt
- Men symmetrien er ikke perfekt:
 - Supersymmetriske partikler er ikke set
 - De må være tunge



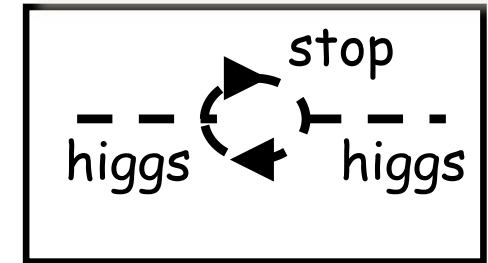
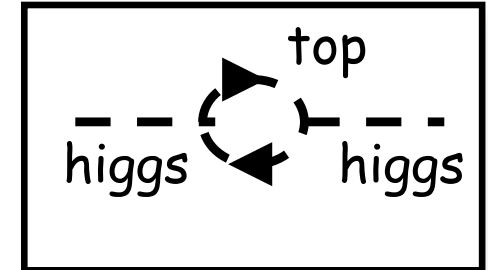
Hvorfor Supersymmetri?

- **Higgs-partiklens masse**

- spartikler giver næsten samme bidrag
- **Modsat fortegn!**

Higgs-partiklens masse bliver nu automatisk lille

Facit: $\delta m_H \approx 0$



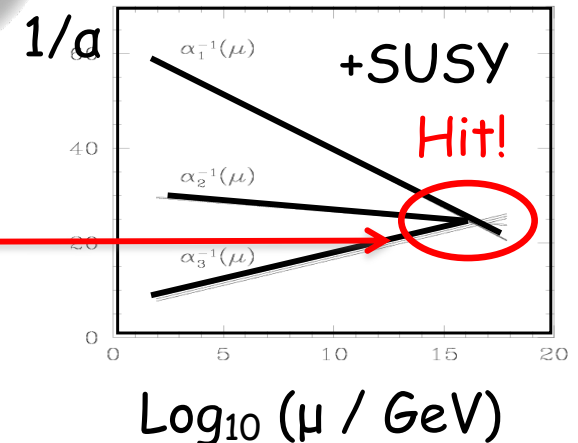
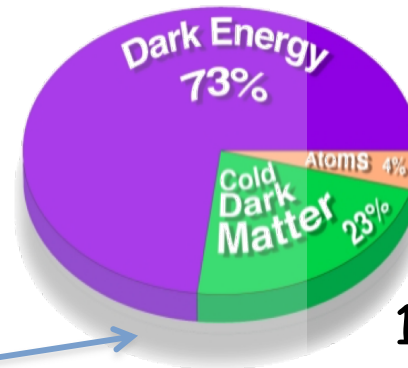
- Men spartiklerne skal veje mindre end ca. 1000 GeV

- LHC er perfekt til at opdage en masse SUSY partikler

- Spartikler kunne være mørkt stof

- Supersymmetri forbedrer kræfternes forening!

- Superstrengteori - **Teorien Om Alting** - kræver supersymmetri

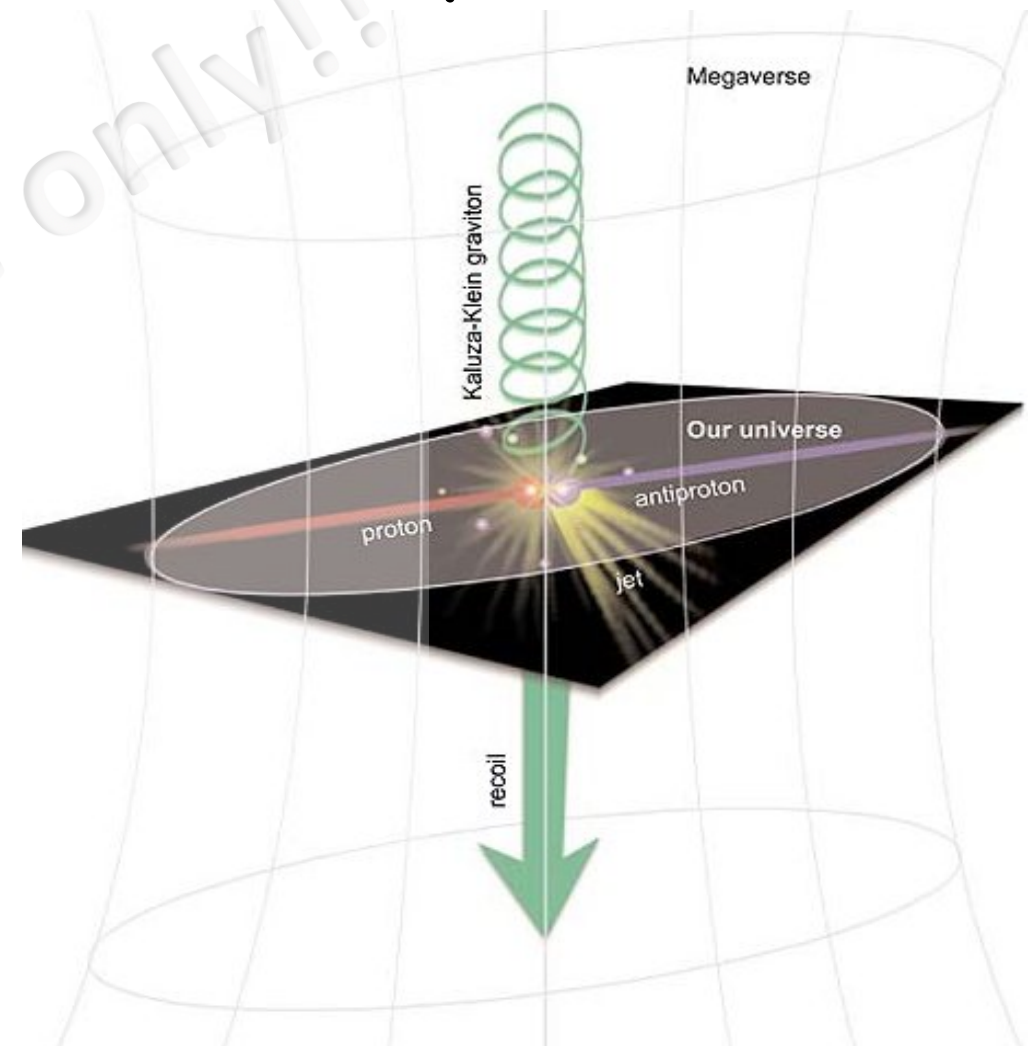


Ekstra dimensioner - hovedideen

Det traditionelle billede



Det nye billede



Problemet med tyngdekraften - Svag?

- Løsningen på problemet med Higgspartiklens masse:
Tyngdekraften er ikke svag → bevæger sig i **ekstra dimensioner**

Facit: $\delta m_H \approx 0$

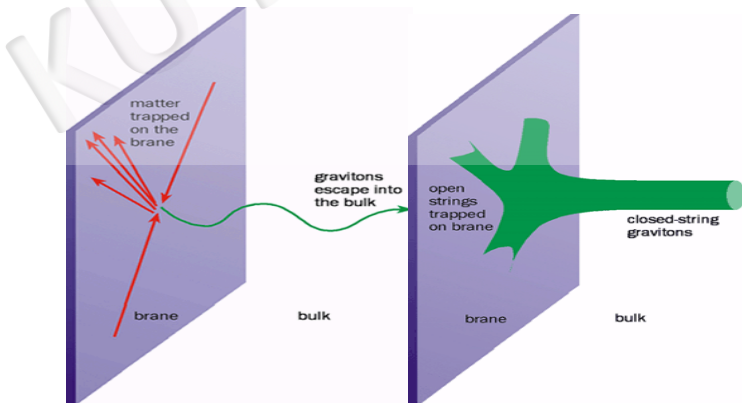
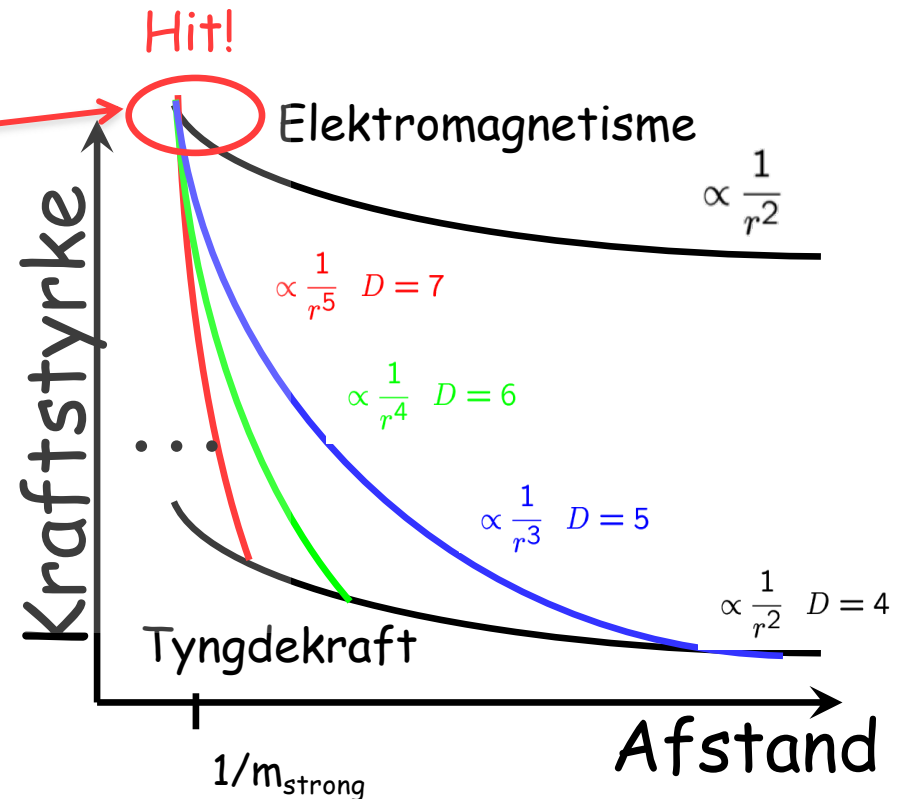
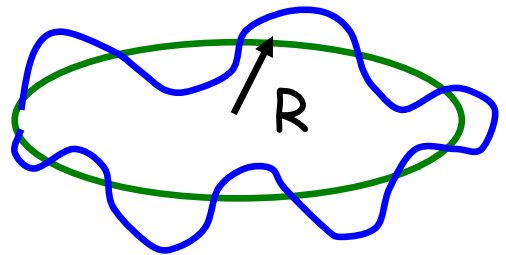
- Modeller med Ekstra dimensioner har også ekstra partikler

KK-partikler kunne være **mørkt stof**

- Ekstra dimensioner **forbedrer** kræfternes forening!

- Der findes modeller med ekstra dimensioner

UDEN en Higgspartikel



Hvad håber vi at se?

1. Fundet!!? → Higgspartiklen

- Higgs: Studere den
- Hvis ikke SM Higgs: Find noget mere

2. Kig efter tegn på "ny fysik"

- Super Symmetri (SUSY)
- Nye elementarpartikler
- Ekstra dimensioner
 - Mikroskopiske Sorte Huller
- Hvorfor er der ikke noget anti-stof?
- Universets mangler stof: SORT STOF

3. Vi forventer Higgs og/eller noget "nyt" ved LHC



LHC detektorerne kan finde alle disse spændende ting
hvis de dukker op
Men kan også finde noget helt NYT!

Hvad håber vi at se?

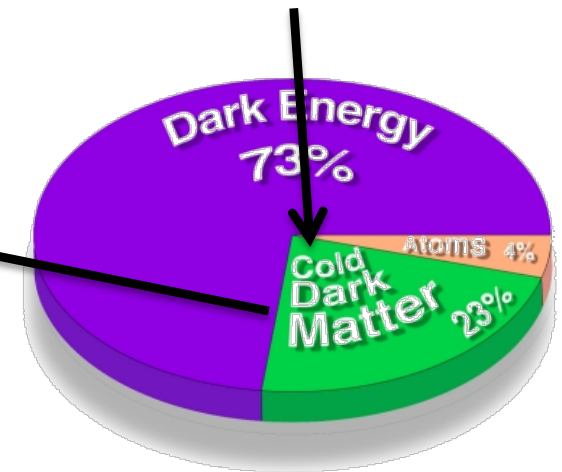
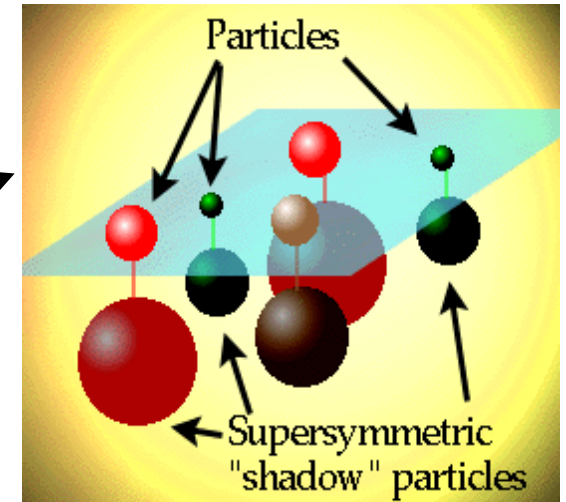
1. Fundet!!? → Higgspartiklen

- Higgs: Studere den
- Hvis ikke SM Higgs: Find noget mere

2. Kig efter tegn på "ny fysik"

- Super Symmetri (SUSY)
- Nye elementarpartikler
- Ekstra dimensioner
 - Mikroskopiske Sorte Huller
- Hvorfor er der ikke noget anti-stof?
- Universets mangler stof: SORT STOF

3. Vi forventer Higgs og/eller noget "nyt" ved LHC

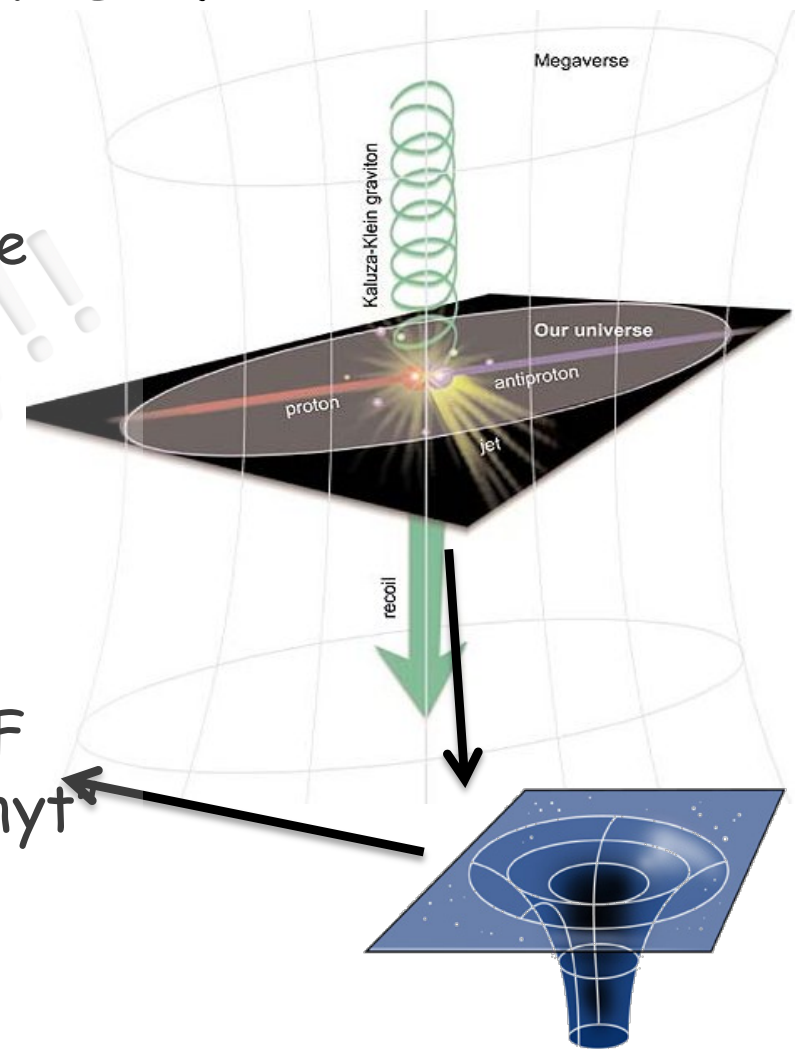


LHC detektorerne kan finde alle disse spændende ting

hvis de dukker op
Men kan også finde noget helt NYT!

Hvad håber vi at se?

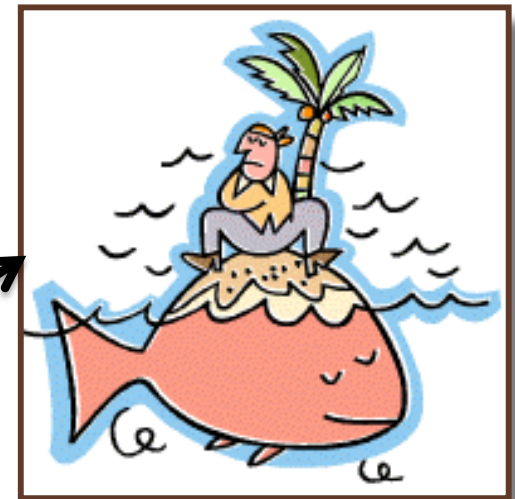
1. **Fundet!!? → Higgspartiklen**
 - **Higgs:** Studere den
 - **Hvis ikke SM Higgs:** Find noget mere
2. Kig efter tegn på "ny fysik"
 - Super Symmetri (SUSY)
 - Nye elementarpartikler
 - Ekstra dimensioner
 - Mikroskopiske Sorte Huller
 - Hvorfor er der ikke noget anti-stof?
 - Universets mangler stof: SORT STOF
3. Vi forventer Higgs og/eller noget "nyt" ved LHC



LHC detektorerne kan finde alle disse spændende ting
hvis de dukker op
Men kan også finde noget helt NYT!

Hvad håber vi at se?

1. **Fundet!!? → Higgspartiklen**
 - **Higgs:** Studere den
 - **Hvis ikke SM Higgs:** Find noget mere
2. Kig efter tegn på "ny fysik"
 - Super Symmetri (SUSY)
 - Nye elementarpartikler
 - Ekstra dimensioner
 - Mikroskopiske Sorte Huller
 - Hvorfor er der ikke noget anti-stof?
 - Universets mangler stof: SORT STOF
3. Vi forventer Higgs og/eller noget "nyt" ved LHC



LHC detektorerne kan finde alle disse spændende ting
hvis de dukker op
Men kan også finde noget helt NYT!

Er verden supersymmetrisk?

ATLAS scoretavle

ATLAS SUSY Searches* - 95% CL Lower Limits

June 2021

ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 13$ TeV

Model	Signature	$\int \mathcal{L} dt$ [fb ⁻¹]	Mass limit	Reference					
Inclusive Searches	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$	0 e, μ mono-jet	2-6 jets 1-3 jets	E_T^{miss} 139 E_T^{miss} 36.1	\tilde{q} [1x, 8x Degen.] \tilde{q} [8x Degen.]	1.0 0.9	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 400$ GeV $m(\tilde{q}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 5$ GeV	2101.14293 2102.10874	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^0$	0 e, μ	2-6 jets	E_T^{miss} 139	\tilde{g} \tilde{g} Forbiden	1.85 2.3	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$ GeV $m(\tilde{g}) = 1000$ GeV	2101.14293 2101.14293	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}W\tilde{\chi}_1^0$	1 e, μ	2-6 jets	E_T^{miss} 139	\tilde{g}	2.2	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 600$ GeV	2101.01629	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}(\ell\ell)\tilde{\chi}_1^0$	$ee, \mu\mu$	2 jets	E_T^{miss} 36.1	\tilde{g}	1.2	$m(\tilde{g}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 50$ GeV	1805.11381	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}WZ\tilde{\chi}_1^0$	0 e, μ	7-11 jets	E_T^{miss} 139	\tilde{g}	1.97	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 600$ GeV	2008.06032	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}WZ\tilde{\chi}_1^0$	SS e, μ	6 jets	E_T^{miss} 139	\tilde{g}	0.15	$m(\tilde{g}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 200$ GeV	1909.08457	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0$	0-1 e, μ SS e, μ	3 b 6 jets	E_T^{miss} 79.8 E_T^{miss} 139	\tilde{g} \tilde{g}	2.25 1.25	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 200$ GeV $m(\tilde{g}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 300$ GeV	ATLAS-CONF-2018-041 1909.08457	
3 rd gen. squarks direct production	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1$	0 e, μ	2 b	E_T^{miss} 139	\tilde{b}_1 \tilde{b}_1	1.255 0.68	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 400$ GeV 10 GeV < $\Delta m(\tilde{b}_1, \tilde{\chi}_1^0) < 20$ GeV	2101.12527 2101.12527	
	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow bh\tilde{\chi}_1^0$	0 e, μ 2 τ	6 b 2 b	E_T^{miss} 139 E_T^{miss} 139	\tilde{b}_1 \tilde{b}_1 Forbiden	0.23-1.35 0.13-0.85	$\Delta m(\tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_1^0) = 130$ GeV, $m(\tilde{b}_1) < 400$ GeV $\Delta m(\tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_1^0) = 130$ GeV, $m(\tilde{b}_1) < 400$ GeV	2101.12527 2101.12527	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0$	0-1 e, μ	≥ 1 jet	E_T^{miss} 139	\tilde{t}_1	1.25	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 400$ GeV	2101.12527	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow Wb\tilde{\chi}_1^0$	1 e, μ	3 jets/1 b	E_T^{miss} 139	\tilde{t}_1	0.65	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 400$ GeV	2101.12527	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{\tau}b, \tilde{\tau}_1 \rightarrow \tau\tilde{G}$	1-2 τ	2 jets/1 b	E_T^{miss} 139	\tilde{t}_1	Forbiden	1.4	$m(\tilde{\tau}_1) = 800$ GeV	ATLAS-CONF-2021-008
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0 / \tilde{c}\tilde{c}, \tilde{c} \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0 e, μ 0 e, μ	2 c mono-jet	E_T^{miss} 36.1 E_T^{miss} 139	\tilde{t}_1 \tilde{t}_1	0.85 0.55	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$ GeV $m(\tilde{t}_1, \tilde{c}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 5$ GeV	1805.01649 2102.10874	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_2^0 \rightarrow Z/h\tilde{\chi}_1^0$	1-2 e, μ	1-4 b	E_T^{miss} 139	\tilde{t}_1	0.067 1.18	$m(\tilde{\chi}_2^0) = 500$ GeV	2006.05880	
	$\tilde{t}_2\tilde{t}_2, \tilde{t}_2 \rightarrow \tilde{t}_1 + Z$	3 e, μ	1 b	E_T^{miss} 139	\tilde{t}_2	Forbiden	0.86	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 360$ GeV, $m(\tilde{t}_1) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 40$ GeV	2006.05880
EW direct	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0$ via WZ	Multiple ℓ /jets $ee, \mu\mu$	≥ 1 jet	E_T^{miss} 139 E_T^{miss} 139	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0$ $\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0$	0.96 0.205	$m(\tilde{\chi}_1^{\pm}) = 0$, wino-bino $m(\tilde{\chi}_2^0) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 5$ GeV, wino-bino	2106.01676, ATLAS-CONF-2021-022 1911.12606	
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\mp}$ via WW	2 e, μ		E_T^{miss} 139	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\mp}$	0.42	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$, wino-bino	1908.08215	
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0$ via Wh	Multiple ℓ /jets		E_T^{miss} 139	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0$	Forbiden	1.5	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 70$ GeV, wino-bino	2004.10894, ATLAS-CONF-2021-022
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\mp}$ via $\tilde{\ell}_L/\tilde{\nu}$	2 e, μ		E_T^{miss} 139	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\mp}$	1.0	$m(\tilde{\ell}, \tilde{\nu}) = 0.5(m(\tilde{\chi}_1^{\pm}) + m(\tilde{\chi}_1^0))$	1908.08215	
	$\tilde{\tau}\tilde{\tau}, \tilde{\tau} \rightarrow \tau\tilde{\chi}_1^0$	2 τ		E_T^{miss} 139	$\tilde{\tau}$	0.16-0.3	0.12-0.39	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$	1911.06660
	$\tilde{\ell}_{L,R}\tilde{\ell}_{L,R}, \tilde{\ell} \rightarrow \ell\tilde{\chi}_1^0$	2 e, μ $ee, \mu\mu$	0 jets ≥ 1 jet	E_T^{miss} 139 E_T^{miss} 139	$\tilde{\ell}$ $\tilde{\ell}$	0.7 0.256	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$ $m(\tilde{\ell}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 10$ GeV	1908.08215 1911.12606	
	$\tilde{H}\tilde{H}, \tilde{H} \rightarrow h\tilde{G}/Z\tilde{G}$	0 e, μ 4 e, μ 0 e, μ	≥ 3 b 0 jets ≥ 2 large jets	E_T^{miss} 36.1 E_T^{miss} 139 E_T^{miss} 139	\tilde{H} \tilde{H} \tilde{H}	0.13-0.23 0.55 0.45-0.93	0.29-0.88	$\text{BR}(\tilde{H}^0 \rightarrow h\tilde{G}) = 1$ $\text{BR}(\tilde{H}^0 \rightarrow Z\tilde{G}) = 1$ $\text{BR}(\tilde{H}_{\pm}^{\pm} \rightarrow Z\tilde{G}) = 1$	1806.04030 2103.11684 ATLAS-CONF-2021-022
	Long-lived particles	Direct $\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\mp}$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^{\pm}$	Disapp. trk	1 jet	E_T^{miss} 139	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$ $\tilde{\chi}_1^{\pm}$	0.66 0.21	Pure Wino Pure higgsino	ATLAS-CONF-2021-015 ATLAS-CONF-2021-015
Stable \tilde{g} R-hadron			Multiple	36.1	\tilde{g}	2.0	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 100$ GeV	1902.01636, 1808.04095	
Metastable \tilde{g} R-hadron, $\tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^0$			Multiple	36.1	\tilde{g} [$\tau(\tilde{g}) = 10$ ns, 0.2 ns]	2.05	2.4	$\tau(\tilde{\ell}) = 0.1$ ns $\tau(\tilde{\tau}) = 0.1$ ns	1710.04901, 1808.04095
RPV	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\mp}/\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^{\pm} \rightarrow Z\ell\ell$	3 e, μ		139	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$ $\tilde{\chi}_1^{\pm}$	0.625	1.05	Pure Wino	2011.10543
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\mp}/\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow WW/Z\ell\ell\nu\nu$	4 e, μ	0 jets	E_T^{miss} 139	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$ $\tilde{\chi}_1^{\pm}$	0.95	1.55	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 200$ GeV	2103.11684
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow qq$	4-5 large jets		36.1	\tilde{g} [$m(\tilde{\chi}_1^0) = 200$ GeV, 1100 GeV]	1.3	1.9	Large \mathcal{A}'_{12}	1804.03568
	$\tilde{u}, \tilde{t} \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow tbs$	Multiple		36.1	\tilde{t} [$\mathcal{A}'_{23} = 2e-4, 1e-2$]	0.55	1.05	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 200$ GeV, bino-like	ATLAS-CONF-2018-003
	$\tilde{u}, \tilde{t} \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow bbs$	$\geq 4b$		139	\tilde{t}	Forbiden	0.95	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 500$ GeV	2010.01015
	$\tilde{u}_1\tilde{u}_1, \tilde{u}_1 \rightarrow bs$	2 jets + 2 b		36.7	\tilde{u}_1 [qq, bs]	0.42	0.61		1710.07171
	$\tilde{u}_1\tilde{u}_1, \tilde{u}_1 \rightarrow q\ell$	2 e, μ 1 μ	2 b DV	36.1 136	\tilde{u}_1 \tilde{u}_1	0.4-1.45	1.6	$\text{BR}(\tilde{u}_1 \rightarrow b\ell/\mu) > 20\%$ $\text{BR}(\tilde{u}_1 \rightarrow q\mu) = 100\%$, $\cos\theta = 1$	1710.05544 2003.11956
$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0/\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_{1,2}^0 \rightarrow tbs, \tilde{\chi}_1^{\pm} \rightarrow bbs$	1-2 e, μ	≥ 6 jets	139	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	0.2-0.32		Pure higgsino	ATLAS-CONF-2021-007	

Ser ikke ud til det..

*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. Many of the limits are based on simplified models, c.f. refs. for the assumptions made.

10⁻¹

1

Mass scale [TeV]

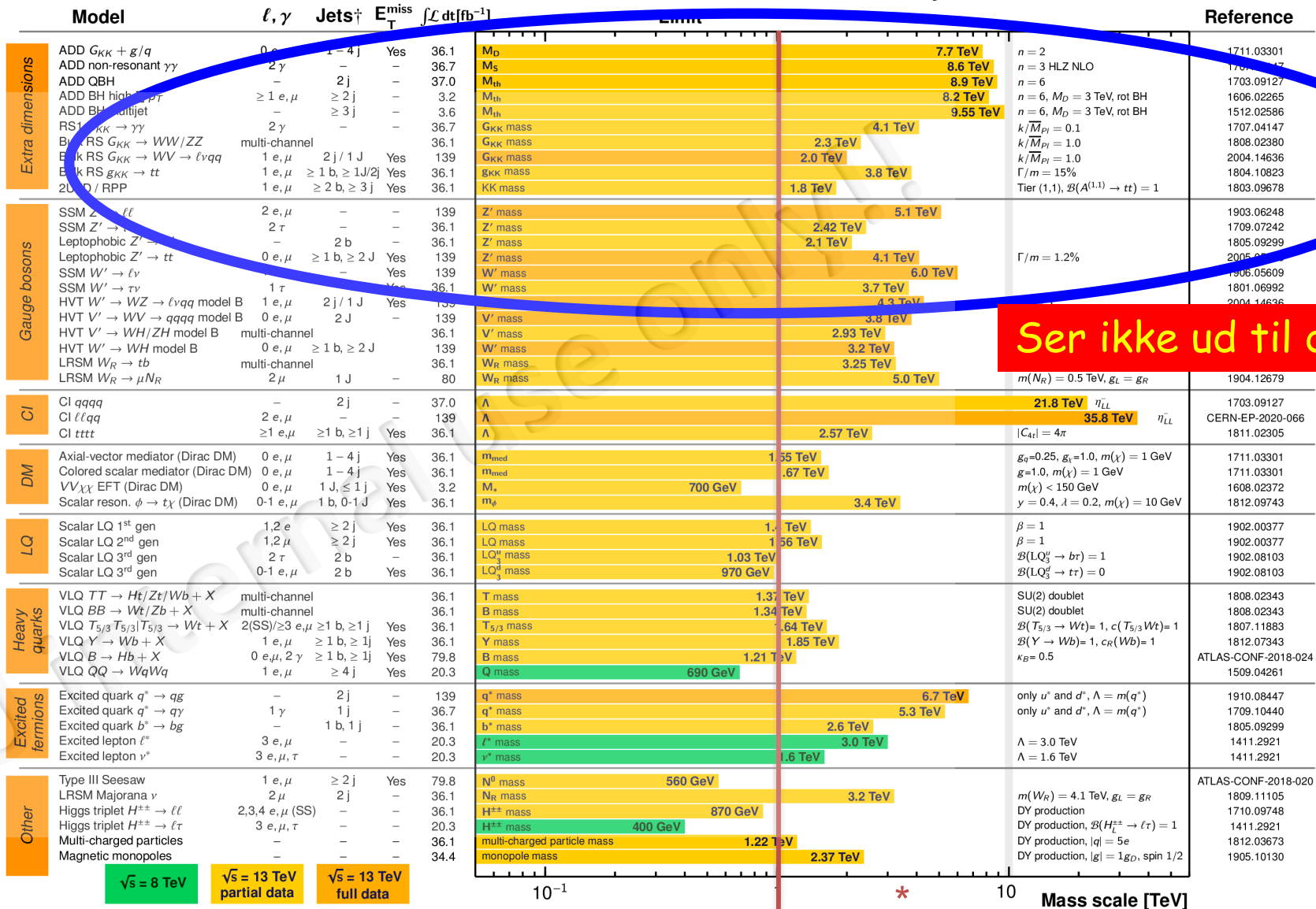
Har vi glemt en ekstra dimension?

ATLAS Exotics Searches* - 95% CL Upper Exclusion Limits
 Status: May 2020

ATLAS Preliminary

$\int \mathcal{L} dt = (3.2 - 139) \text{ fb}^{-1}$

$\sqrt{s} = 8, 13 \text{ TeV}$



Ser ikke ud til det..

$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ partial data $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ full data

*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown.

† Small-radius (large-radius) jets are denoted by the letter i (l).

1 TeV

Ingen opdagelser - ENDNU!

Web resourcer

- <http://particleadventure.org/index.html>
 - Specielt designet for et bredt publikum
 - Der er et væld af links - bare klick løs!!
- <http://quarknet.fnal.gov/>
 - Masser af information - om moderne eksperimenter og lærer-materiale
- <https://physicsmasterclasses.org/>
 - En specifik link til undervisningsmæssig beskrivelse af partikelfysik