



DET NATUR- OG BIOVIDENSKABELIGE FAKULTET



# Tungionfysik

## Stærke kernekraefter på kanten

Christian Holm Christensen  
Niels Bohr Institutet



# Overblik

- 1 Mig
- 2 Standard Modellen
- 3 Eksperimentet
- 4 Tungion fysik
- 5 Afslutning



# Overblik

- 1 Mig
- 2 Standard Modellen
- 3 Eksperimentet
- 4 Tungion fysik
- 5 Afslutning



## Om Mig

- BA i filosofi og Cand.Scient. i fysik fra KU
- Ph.D. i 2007
- 2år Post.Doc. med stipendie fra Villum Kann Rasmussen fonden.
- 2år Post.Doc. i Discovery Center
- 4årig STENO legat fra De Frie Forskningsråd.
- Lektor ved Discovery Center
- Medlem af BRAHMS kollaborationen
- Medlem af ALICE kollaborationen



VILLUM FONDEN

DET FRIE FORSKNINGSRÅD  
DANISH COUNCIL FOR  
INDEPENDENT RESEARCH

ALICE



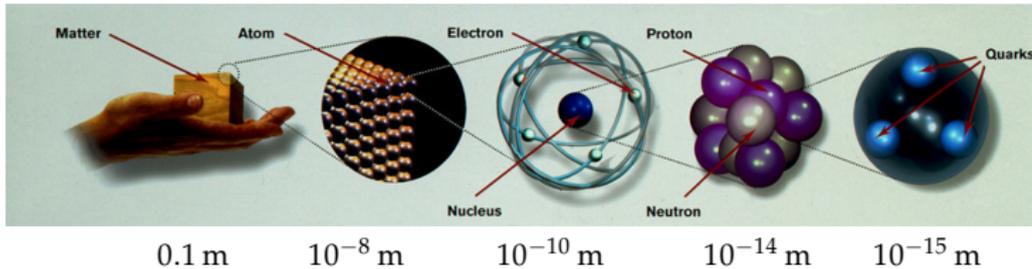
# Overblik

- 1 Mig
- 2 Standard Modellen
- 3 Eksperimentet
- 4 Tungion fysik
- 5 Afslutning



## Standard Modellen

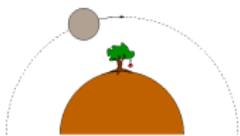
- Beskriver *hvad* vi forstår ved stof – partikler
- Beskriver *hvordan* stof opfører sig – vekselvirkninger



Atom-kernen består af kerne partikler: protoner og neutroner  
Kerne partikler består af kvarker



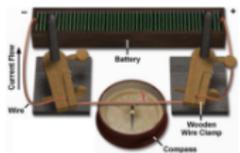
## Der er 4 vekselvirkninger



Tyngde

Æblet falder til jorden,  
månen bliver i sin bane

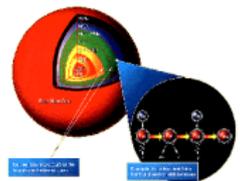
Krumning af  
rum-tid



Elektro-  
magnetisme

Lys, strøm

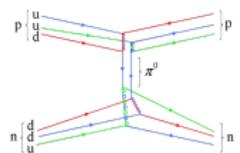
Fotoner ( $\gamma$ )



Svage  
kernekræft

Tunge grundstoffer

$W^\pm, Z^0$   
bosoner



Stærke  
kernekræft

Atom-kernen

Gluoner (g)



## Partikel ZOO'et

Fermioner				Bosoner	
Kvarker	u	c	t	$\gamma$	Kræft-formidler
	d	s	b	Z	
Leptoner	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	W	
	e	$\mu$	$\tau$	g	

- *Ferminoer* er 'stof'–partikler
- *Bosoner* udveksler energi mellem stof
- Kerne–stof består af *kvarker*
- *Leptoner* står for stoffets kemiske egenskaber



## Partikel ZOO'et

Fermioner				Bosoner	
Kvarker	u	c	t	$\gamma$	Kræft-formidler
	d	s	b	Z	
Leptoner	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	W	
	e	$\mu$	$\tau$	g	
			h		

- *Ferminoer* er 'stof'–partikler
- *Bosoner* udveksler energi mellem stof
- Kerne–stof består af *kvarker*
- *Leptoner* står for stoffets kemiske egenskaber
- *Higgs* bosonen 'giver' masse til de andre partikler



## Få Byggestene

- Heisenbergs usikkerhedsrelationer

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$

- Einsteins relativitetsteori

$$E = mc^2$$

- Fører til beskrivelse af partikler som felter der spænder hele universet.



## Få Byggestene

- Heisenbergs usikkerhedsrelationer

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$

- Einsteins relativitetsteori

$$E = mc^2$$

- Fører til beskrivelse af partikler som felter der spænder hele universet.

*This pulsating energy field is the central engine of our being and our consciousness, the alpha and omega of our existence.*

Lynne McTaggart, *The Field: The Quest for the Secret Force of the Universe*



## Få Byggestene

- Heisenbergs usikkerhedsrelationer

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$

- Einsteins relativitetsteori

$$E = mc^2$$

- Fører til beskrivelse af partikler som felter der spænder hele universet.
- Vekselvirkninger er "pulser" i disse felter

*This pulsating energy field is the central engine of our being and our consciousness, the alpha and omega of our existence.*

Lynne McTaggart, *The Field: The Quest for the Secret Force of the Universe*



## Usikkerhedsrelationerne

- Heisenbergs usikkerhedsrelation

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$

udtrykker kvantemekanikken

- $\Delta x$  er usikkerheden i stedet
- $\Delta p$  er usikkerheden i impulsen (hastigheden).
- Hvis  $\Delta x = 0$  så er  $\Delta p = \infty$  og vice versa for at relationen er opfyldt.
- Fører til at alt må betragtes som sandsynligheder som først realiseres når der er en vekselvirkning.



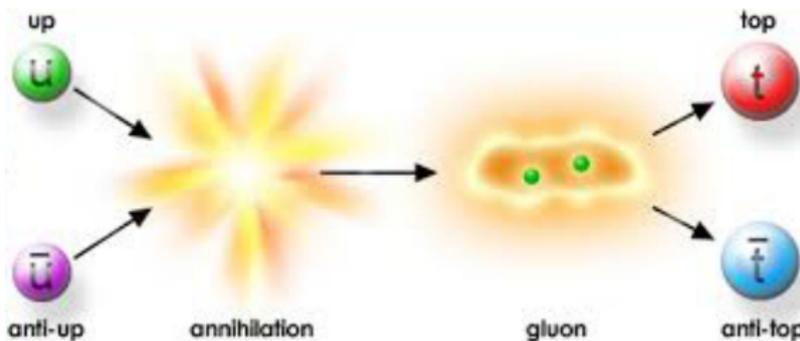
## Stof er energi

- Einsteins berømte sætning

$$E = mc^2$$

siger at masse (eller partikler) og energi er det samme

- Alle typer partikler har en anti-partikel ( $e^+/e^-$ ,  $u/\bar{u}$ , ...)
- Kan lave tungere partikler ved at tilfører energi



## Selve formelen

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + \text{h.c.} + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

- Fra denne kan nær sagt alt udledes
  - Avanceret elektronik, ren fusion, osv.
- Forudsigelser:
  - Higgs partikel
  - Quark-Gluon Plasma



## Selve formelen

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + \text{h.c.} + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

- Fra denne kan nær sagt alt udledes
  - Avanceret elektronik, ren fusion, osv.
- Forudsigelser:
  - Higgs partikel – fundet
  - Quark-Gluon Plasma



## Selve formelen

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + \text{h.c.} + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

- Fra denne kan nær sagt alt udledes
  - Avanceret elektronik, ren fusion, osv.
- Forudsigelser:
  - Higgs partikel – fundet
  - Quark-Gluon Plasma – måske set



## Selve formelen

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + \text{h.c.} + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

- Fra denne kan nær sagt alt udledes
  - Avanceret elektronik, ren fusion, osv.
- Forudsigelser:
  - Higgs partikel – fundet
  - Quark-Gluon Plasma – måske set

### Forudsigelse

$$m_W = 80.390 \pm 0.018 \text{ GeV}$$

$$m_Z = 91.1874 \pm 0.0021 \text{ GeV}$$



## Selve formelen

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + \text{h.c.} + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

- Fra denne kan nær sagt alt udledes
  - Avanceret elektronik, ren fusion, osv.
- Forudsigelser:
  - Higgs partikel – fundet
  - Quark-Gluon Plasma – måske set

### Forudsigelse

$$m_W = 80.390 \pm 0.018 \text{ GeV}$$

$$m_Z = 91.1874 \pm 0.0021 \text{ GeV}$$

### Målt

$$m_W = 80.398 \pm 0.025 \text{ GeV}$$

$$m_Z = 91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}$$



## Det makroskopiske stof og standardmodellen

- Kvarker: forskellig ladning, masse

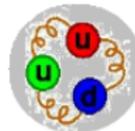
Kvark	Masse (MeV)	Ladning
u	2.2 <sup>+0.6</sup> <sub>-0.4</sub>	+2/3
d	4.7 <sup>+0.5</sup> <sub>-0.4</sub>	-1/3
c	1 270 ±30	+2/3
s	96 <sup>+8</sup> <sub>-4</sub>	-1/3
t	173 200 ±900	+2/3
b	4 180 <sup>+40</sup> <sub>-30</sub>	-1/3



## Det makroskopiske stof og standardmodellen

- Kvarker: forskellig ladning, masse
- Kerne-partikler: 3 kvarker, bundet af gluoner (stærke kernekraft)
  - Lette kerner:  $N_{\text{proton}} \approx N_{\text{neutron}}$

Kvark	Masse (MeV)	Ladning
u	2.2 $\begin{smallmatrix} +0.6 \\ -0.4 \end{smallmatrix}$	+2/3
d	4.7 $\begin{smallmatrix} +0.5 \\ -0.4 \end{smallmatrix}$	-1/3
c	1 270 $\pm 30$	+2/3
s	96 $\begin{smallmatrix} +8 \\ -4 \end{smallmatrix}$	-1/3
t	173 200 $\pm 900$	+2/3
b	4 180 $\begin{smallmatrix} +40 \\ -30 \end{smallmatrix}$	-1/3



### Proton p

uud: to up og én down kvark

Ladning:  $+1 = 2/3 + 2/3 - 1/3$

### Neutron n

udd: én up og to down kvarker

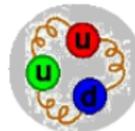
Ladning:  $0 = 2/3 - 1/3 - 1/3$



## Det makroskopiske stof og standardmodellen

- Kvarker: forskellig ladning, masse
- Kerne-partikler: 3 kvarker, bundet af gluoner (stærke kernekraft)
  - Lette kerner:  $N_{\text{proton}} \approx N_{\text{neutron}}$
- Atomer: kerne og elektroner, bundet af fotoner (elektromagnetiske kraft)
  - $N_{e^-} = N_{\text{proton}}$

Kvark	Masse (MeV)	Ladning
u	2.2 $\begin{smallmatrix} +0.6 \\ -0.4 \end{smallmatrix}$	+2/3
d	4.7 $\begin{smallmatrix} +0.5 \\ -0.4 \end{smallmatrix}$	-1/3
c	1 270 $\pm 30$	+2/3
s	96 $\begin{smallmatrix} +8 \\ -4 \end{smallmatrix}$	-1/3
t	173 200 $\pm 900$	+2/3
b	4 180 $\begin{smallmatrix} +40 \\ -30 \end{smallmatrix}$	-1/3



### Proton p

uud: to up og én down kvark  
Ladning:  $+1 = 2/3 + 2/3 - 1/3$

### Neutron n

udd: én up og to down kvarker  
Ladning:  $0 = 2/3 - 1/3 - 1/3$

### Brint ${}^1_1\text{H}$

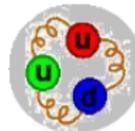
Én proton og én elektron, dvs. 3 kvarker og en elektron  
(2 up og 1 down kvark)



## Det makroskopiske stof og standardmodellen

- Kvarker: forskellig ladning, masse
- Kerne-partikler: 3 kvarker, bundet af gluoner (stærke kernekraft)
  - Lette kerner:  $N_{\text{proton}} \approx N_{\text{neutron}}$
- Atomer: kerne og elektroner, bundet af fotoner (elektromagnetiske kraft)
  - $N_{e^-} = N_{\text{proton}}$
- Molekuler: atomer, bundet af fotoner

Kvark	Masse (MeV)	Ladning
u	2.2 $\begin{smallmatrix} +0.6 \\ -0.4 \end{smallmatrix}$	+2/3
d	4.7 $\begin{smallmatrix} +0.5 \\ -0.4 \end{smallmatrix}$	-1/3
c	1 270 $\pm 30$	+2/3
s	96 $\begin{smallmatrix} +8 \\ -4 \end{smallmatrix}$	-1/3
t	173 200 $\pm 900$	+2/3
b	4 180 $\begin{smallmatrix} +40 \\ -30 \end{smallmatrix}$	-1/3



### Proton p

uud: to up og én down kvark

Ladning:  $+1 = 2/3 + 2/3 - 1/3$

### Neutron n

udd: én up og to down kvarker

Ladning:  $0 = 2/3 - 1/3 - 1/3$

### Brint ${}^1_1\text{H}$

Én proton og én elektron, dvs. 3 kvarker og en elektron

(2 up og 1 down kvark)

### Vand $\text{H}_2\text{O}$

To  ${}^1_1\text{H}$  og én  ${}^{16}_8\text{O}$ , dvs.  $3 + 3 + 16 \times 3 = 54$  kvarker og  $1 + 1 + 8 = 10$  elektroner

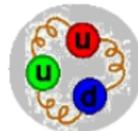
(10 protoner, 8 neutroner: 28 up, 26 down kvarker)



## Det makroskopiske stof og standardmodellen

- Kvarker: forskellig ladning, masse
- Kerne-partikler: 3 kvarker, bundet af gluoner (stærke kernekraft)
  - Lette kerner:  $N_{\text{proton}} \approx N_{\text{neutron}}$
- Atomer: kerne og elektroner, bundet af fotoner (elektromagnetiske kraft)
  - $N_{e^-} = N_{\text{proton}}$
- Molekuler: atomer, bundet af fotoner
- En gymnasieelev: vand ( $\text{H}_2\text{O}$ ) og organiske molekyler ( $\text{C}_n\text{H}_m\text{O}_o\text{N}_p$ )

Kvark	Masse (MeV)	Ladning
u	2.2 $\begin{smallmatrix} +0.6 \\ -0.4 \end{smallmatrix}$	+2/3
d	4.7 $\begin{smallmatrix} +0.5 \\ -0.4 \end{smallmatrix}$	-1/3
c	1 270 $\pm 30$	+2/3
s	96 $\begin{smallmatrix} +8 \\ -4 \end{smallmatrix}$	-1/3
t	173 200 $\pm 900$	+2/3
b	4 180 $\begin{smallmatrix} +40 \\ -30 \end{smallmatrix}$	-1/3



### Proton p

udd: to up og én down kvark  
Ladning:  $+1 = 2/3 + 2/3 - 1/3$

### Neutron n

udd: én up og to down kvarker  
Ladning:  $0 = 2/3 - 1/3 - 1/3$

### Brint ${}^1_1\text{H}$

Én proton og én elektron, dvs. 3 kvarker og en elektron  
(2 up og 1 down kvark)

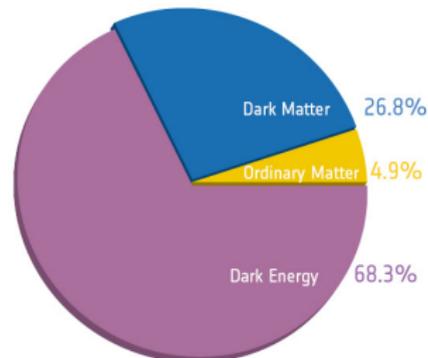
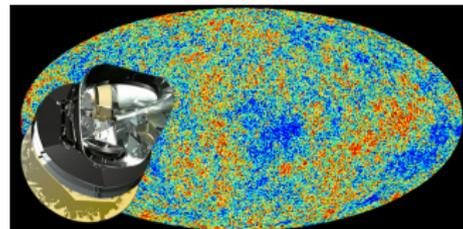
### Vand $\text{H}_2\text{O}$

To  ${}^1_1\text{H}$  og én  ${}^{16}_8\text{O}$ , dvs.  $3 + 3 + 16 \times 3 = 54$  kvarker og  $1 + 1 + 8 = 10$  elektroner  
(10 protoner, 8 neutroner: 28 up, 26 down kvarker)



## Universets stof og standardmodellen

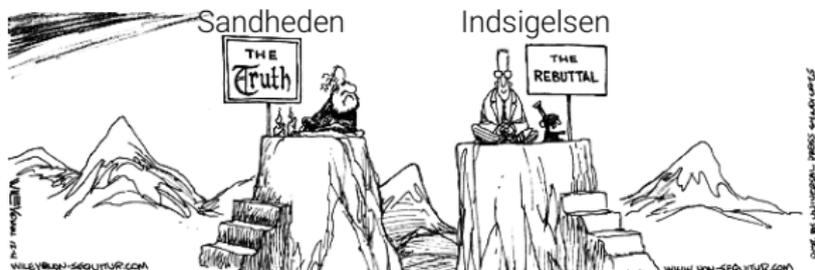
- “Synligt” stof
  - Dvs. vekselvirker elektromagnetisk, svagt, eller stærkt
  - Planeter, stjerne, galakser, ...
- Mørkt stof
  - Vekselvirker *ikke* elektromagnetisk, svagt, eller stærkt
  - Deduceret fra galaksers bevægelse, ...
  - Stof (masse) af en eller anden slags
- Mørk energi
  - Vekselvirker *ikke* elektromagnetisk, svagt, eller stærkt
  - Deduceret fra fladt univers, f.eks. via Planck satellitten, ...
  - Energi (kraft) af en eller anden slags
- Vi kender knap 5% af hvad universet består af



## Alt det vi ikke ved

Standard modellen giver rigtig mange svar, men . . .

- Videnskabens kerne: Vi kan aldrig vide om teorien er Sandheden
  - Udfordre teorien med eksperimentet – se om den fejler – falsificering



- Giver ikke alle svar – for eksempel
  - Styrkeforholdet mellem kræfterne
  - Kvarkernes masse
  - Asymptotisk frihed
  - Mørkt stof og mørk energi ((26.8 + 69.3)% = 96.1% af al masse i universet!)

(Se også [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_unsolved\\_problems\\_in\\_physics](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_unsolved_problems_in_physics))

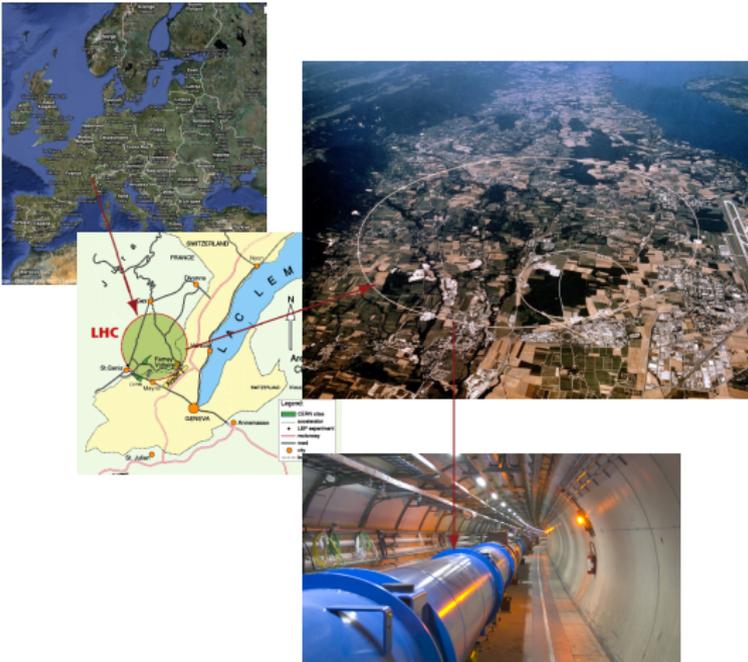


# Overblik

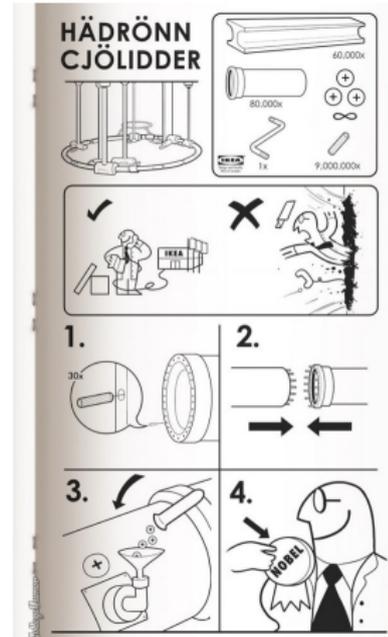
- 1 Mig
- 2 Standard Modellen
- 3 Eksperimentet**
- 4 Tungion fysik
- 5 Afslutning



# Ekspperimentet gør forskellen



# Eksperimentet gør forskellen



## Fakta om CERN & LHC

### CERN

- Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
- Danmark med som grundlægger i 1952
- WWW blev opfundet (50m meter fra mit kontor)
- Bidrag til Touch-screen (af bl.a. en dansker) og PET scannere.



### LHC

- Omkreds:  $\approx 27\text{km}$
- Beam energi:  $E_{\text{kin}} = 6.5\text{TeV}$
- Protoners hastighed

$$\beta \approx 0.999999989591$$

$$v = \beta \times 299\,792\,458\text{m/s}$$

$$\approx 1\,079 \times 10^6\text{km/t}$$

(til sammenligning, 1AU  $\approx 150 \times 10^6\text{km}$ )

#### Relativistisk hastighed

$$E = m_0\gamma c^2 = E_0 + E_{\text{kin}}$$

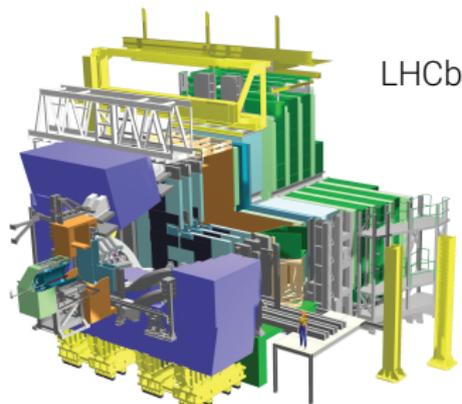
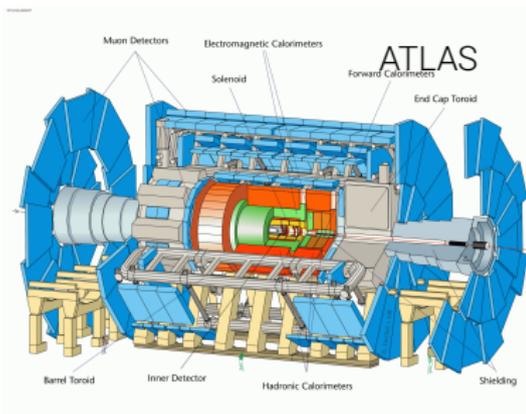
$$E_0 = m_0c^2$$

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

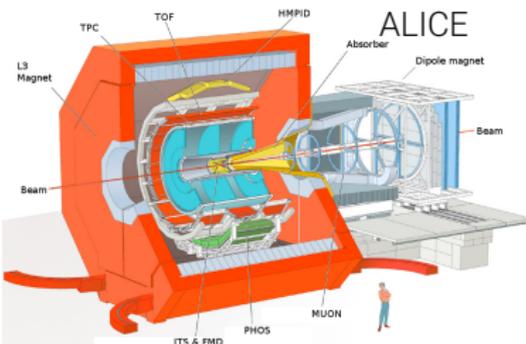
$$v/c = \beta = \sqrt{1 - \left[ \frac{1}{1 + E_{\text{kin}}/(m_0c^2)} \right]^2}$$



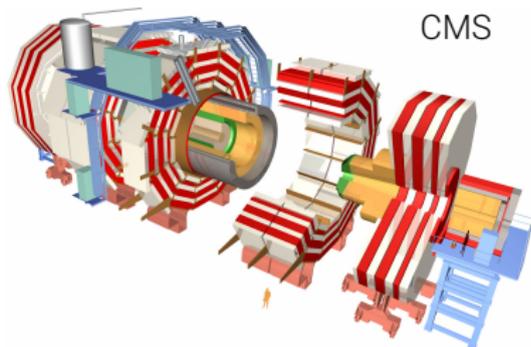
## 4 Eksperimenter



LHCb



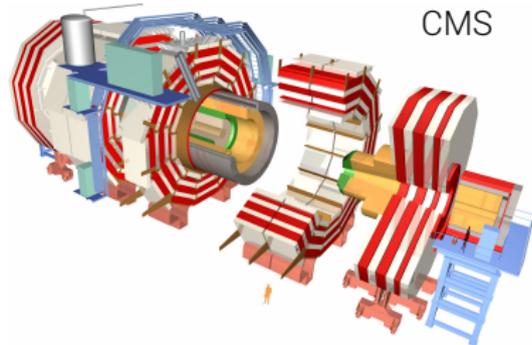
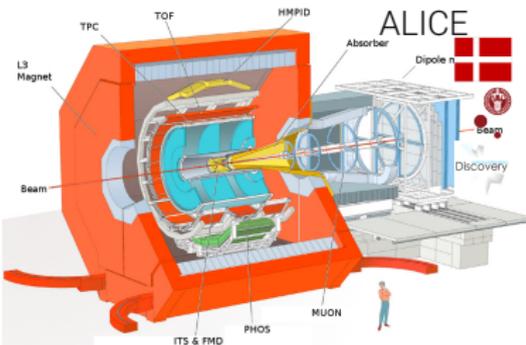
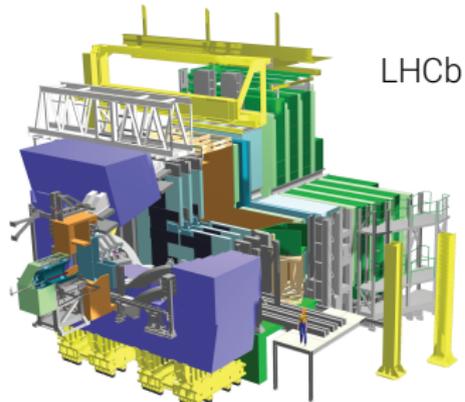
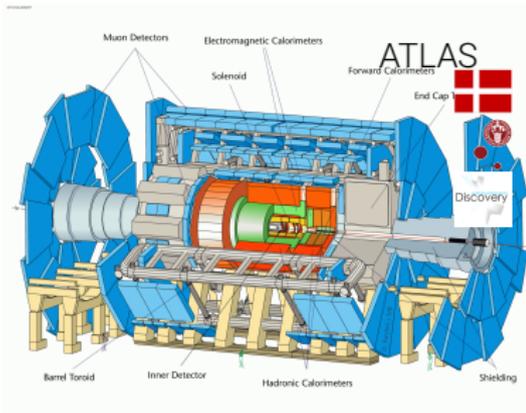
ALICE



CMS



# 4 Eksperimenter

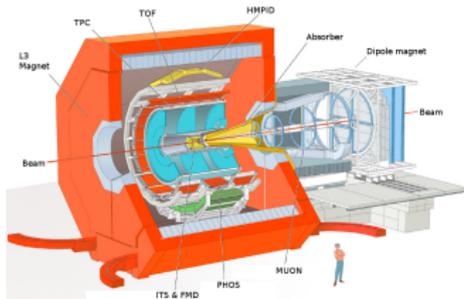


# Overblik

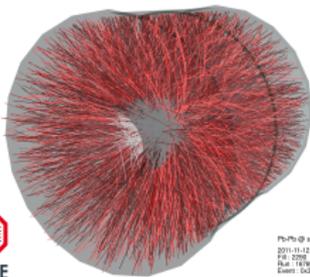
- 1 Mig
- 2 Standard Modellen
- 3 Eksperimentet
- 4 Tungion fysik**
- 5 Afslutning



# ALICE – fysikkere i eventyrland



- Mest Pb-Pb kollisioner
- 1500+ fysikere fra hele verden
- Studere den sterke kernekraft
  - Kvark–gluon plasma
- NBI bidrager til
  - *Forward Multiplicity Detector*
  - *Time Projection Chamber* laser kalibrasjonssystem



Pb-Pb @ sPHENIX - 2.70 ATW  
 2011-11-12 09:51:12  
 File: 7706  
 Event: 00206316a

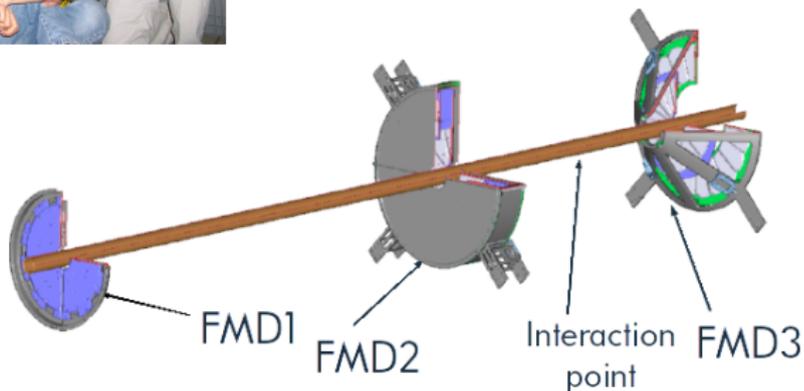


## Vores bidrag



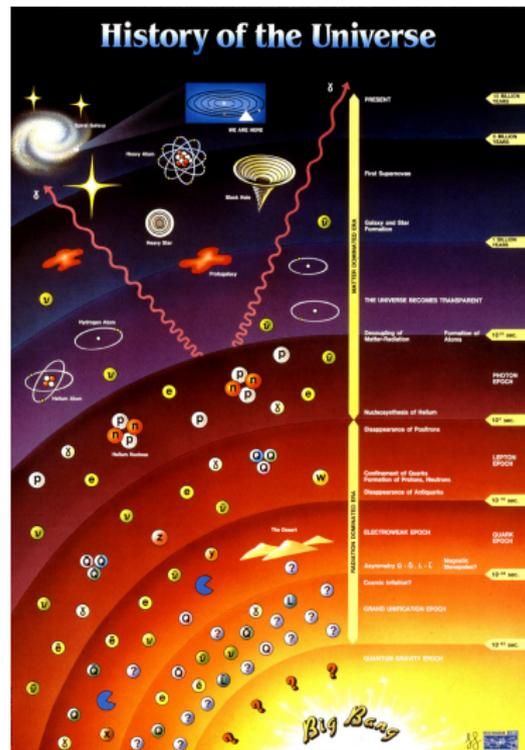
### *Forward Multiplicity Detector*

- Designet og bygget på NBI
- Silicium strip detektor
- 51 200 kanaler



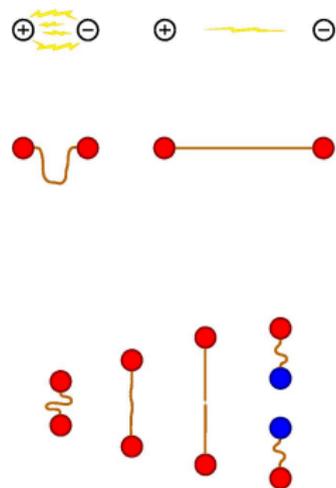
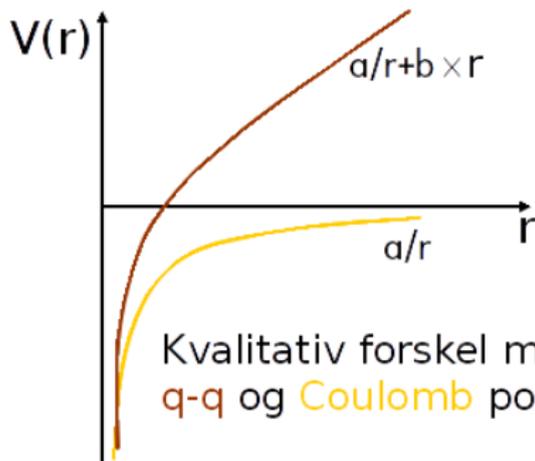
## Ursuppen af kvarker og gluoner

- Standardmodellen forudsiger en tilstand (fase) af stof kaldet *Kvark-gluon Plasma*
- Fandtes  $1/1\,000\,000$  s efter Big Bang
- Kvarker er 'frie'
- LHC søger at skabe denne tilstand ved at kolliderer Pb kerner
- ALICE undersøger den skabte tilstand for at lære mere om den stærke kernekraft.



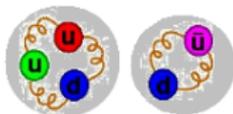
## Stærke kernekraft – elastikken i naturen

- Kvarker og gluoner har **farve** ladning → kvark–kvark potential
- Forsøger man at skille to kvarker fra hinanden får man blot to nye kvarker



## Opskrift på Ur-suppe

Confinement: kvarker og gluoner bundet i hvide objekter (hadroner)

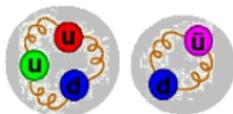


farve ladning kan ikke undersøges direkte, men ...

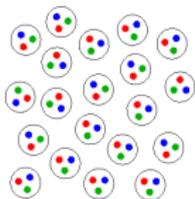


## Opskrift på Ur-suppe

Confinement: kvarker og gluoner bundet i hvide objekter (hadroner)



farve ladning kan ikke undersøges direkte, men ...

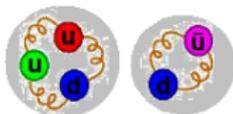


... presser hadronerne sammen ...

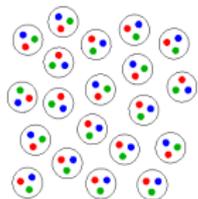


## Opskrift på Ur-suppe

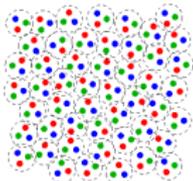
Confinement: kvarker og gluoner bundet i hvide objekter (hadroner)



farve ladning kan ikke undersøges direkte, men ...



... presser hadronerne sammen ...

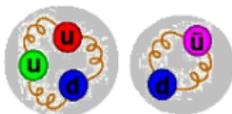


... skærmes kvark-kvark potentialet ...

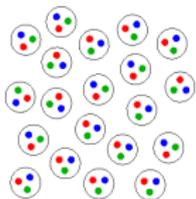


## Opskrift på Ur-suppe

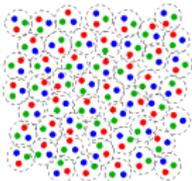
Confinement: kvarker og gluoner bundet i hvide objekter (hadroner)



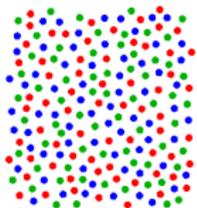
farve ladning kan ikke undersøges direkte, men ...



... presser hadronerne sammen ...



... skærmes kvark-kvark potentialet ...



... hadronerne smelter  
kvarker  $\rightarrow$  ur-suppe



# Tungioner kolliderer



Før kollision:  $\approx 99.999994\%$  af  $c$ , Lorentz forkortet  
"pandekager"



# Tungioner kolliderer



Før kollision:  $\approx 99.999994\%$  af  $c$ , Lorentz forkortet  
"pandekager"



Stærke vekselvirkninger, kvark stof lavet, høj  
tæthed & temperatur  $\rightarrow$  Fase overgang?



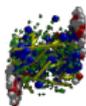
# Tungioner kolliderer



Før kollision:  $\approx 99.999994\%$  af  $c$ , Lorentz forkortet  
"pandekager"



Stærke vekselvirkninger, kvark stof lavet, høj  
tæthed & temperatur  $\rightarrow$  Fase overgang?



Kombinere til hadroner



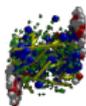
# Tungioner kolliderer



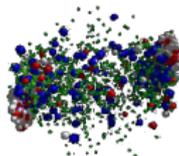
Før kollision:  $\approx 99.999994\%$  af  $c$ , Lorentz forkortet  
"pandekager"



Stærke vekselvirkninger, kvark stof lavet, høj  
tæthed & temperatur  $\rightarrow$  Fase overgang?



Kombinere til hadroner



Slut tilstand



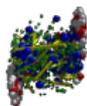
# Tungioner kolliderer



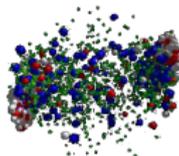
Før kollision:  $\approx 99.999994\%$  af  $c$ , Lorentz forkortet  
"pandekager"



Stærke vekselvirkninger, kvark stof lavet, høj  
tæthed & temperatur  $\rightarrow$  Fase overgang?

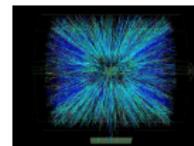


Kombinere til hadroner

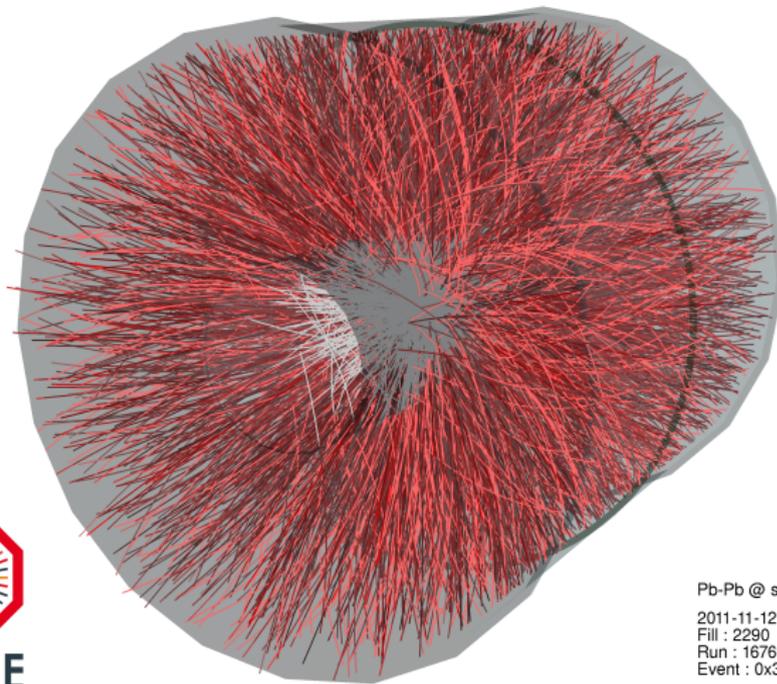


Slut tilstand

Observable partikler



# Mange mange partikler dannet



**ALICE**  
A JOURNEY OF DISCOVERY

Pb-Pb @  $\sqrt{s}$  = 2.76 ATeV

2011-11-12 06:51:12

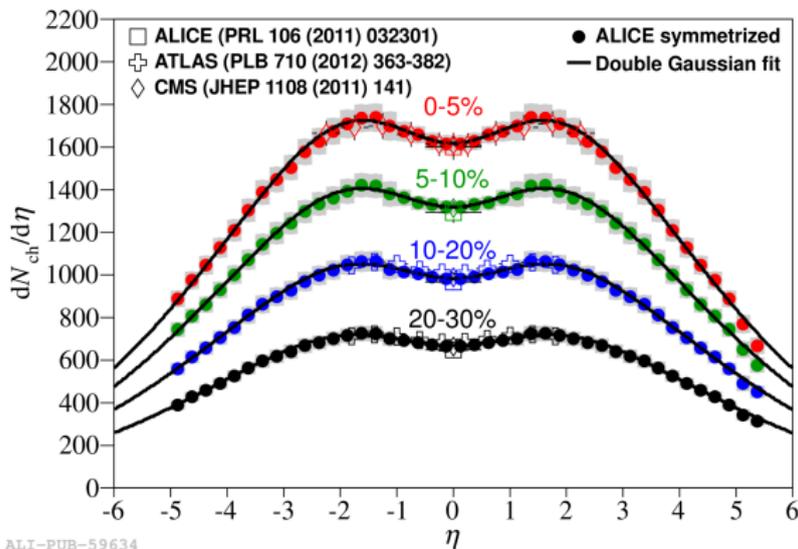
Fill : 2290

Run : 167693

Event : 0x3d94315a



## Antal ladet partikler – Høj energi tæthed

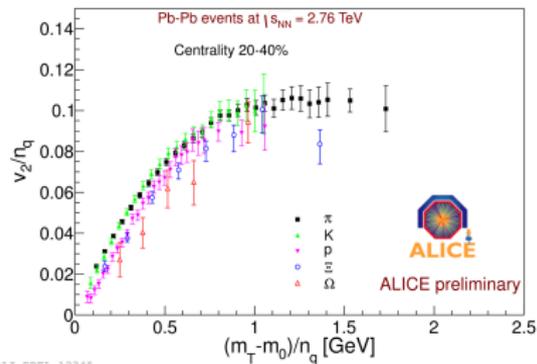
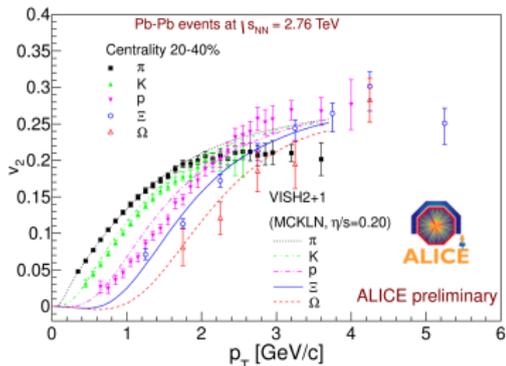


- $\epsilon \approx 15 \text{ GeV}/\text{fm}^3/c$ 
  - Sammenlign proton:  $\approx 1 \text{ GeV}/\text{fm}^3/c$
- Høj energitæthed  $\rightarrow$  kernepartikler mast godt sammen
- Høj temperatur



## Flow – tryk forskel

- $v_2$  er trykforskel.
- Høj  $v_2 \rightarrow$  væske-agtig
- Skalerer med kvark-indhold  $\rightarrow$  kvark frihedsgrader



## Der er noget – men hvad?

- Vi har observeret noget
  - Ikke helt det vi forestillede os – men sådan er videnskab
  - En ideel væske med ingen viskositet (ingen intern træghed)
- Vi kan nu forsøge at lære mere om denne tilstand
  - Undersøge det stærke kernekræfter
  - Gluoners opførelse i accelereret systemer



# Overblik

- 1 Mig
- 2 Standard Modellen
- 3 Eksperimentet
- 4 Tungion fysik
- 5 Afslutning



## Så hvor er vi nu?

- Stadig mange huller i standardmodellen
  - Kvante-teori for tyngdekraft
  - Massen af partikler
  - Mørkt stof og Mørk energi
- Forskellige løsningsforslag
  - Super symmetri
  - Strengte
  - ... og mange andre
- Men sådan er fysik – vi finder nok aldrig alle svarene!

COSMOLOGY MARCHES ON

