

Mørkt stof i Universet

Oprindelsen af mørkt stof og masse

Mads Toudal Frandsen



UNIVERSITY OF
OXFORD



University of Oxford
Mansfield College

m.frandsen1@physics.ox.ac.uk

Outline

- Introduction til universets sammensætning
- Universet, mikroskopisk
 - Partikelfysikkens Standard Model, Higgs mekanismen, stærke vekselvirkninger
- Universet, makroskopisk
 - Kosmologiens standard model Λ CDM
- Findes mørkt stof?
 - Astrofysiske observationer der peger på mørkt stof
 - Mørkt stof fra et partikelfysik perspektiv
- Kan vi observere mørkt stof direkte/i laboratoriet?

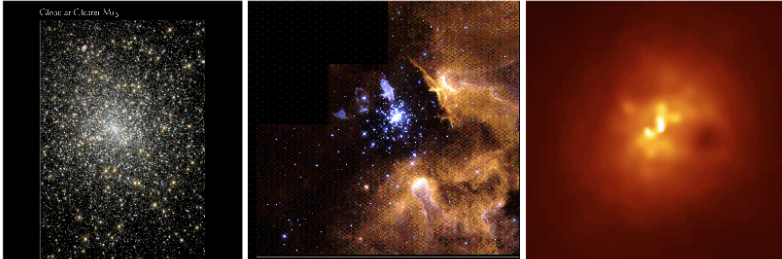
Jeg anbefaler at google: Introduction to cosmology, subir sarkar, cern 2008

Universets sammensætning

Stars
 $\Omega \sim 0.005$

Interstellar gas
 $\Omega \sim 0.005$

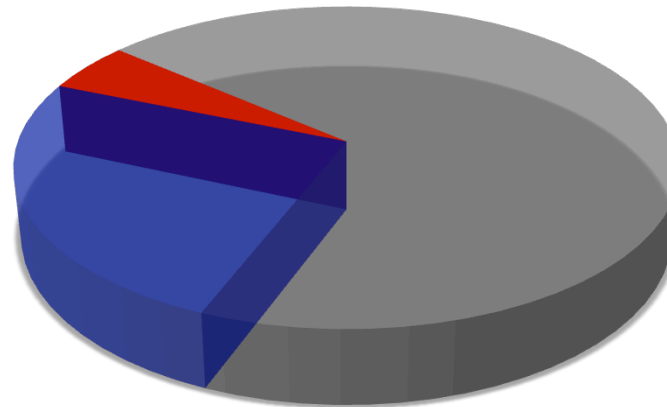
Hot gas in clusters
 $\Omega \sim 0.03$



~ 5% Synligt stof
Beskrevet af
Standard Modellen

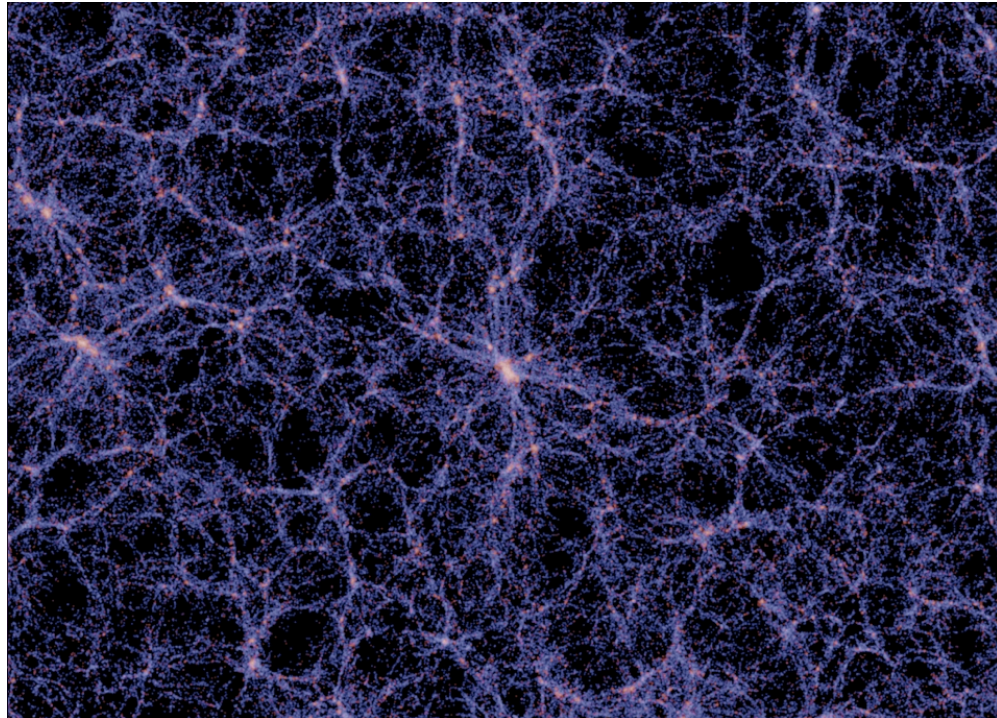
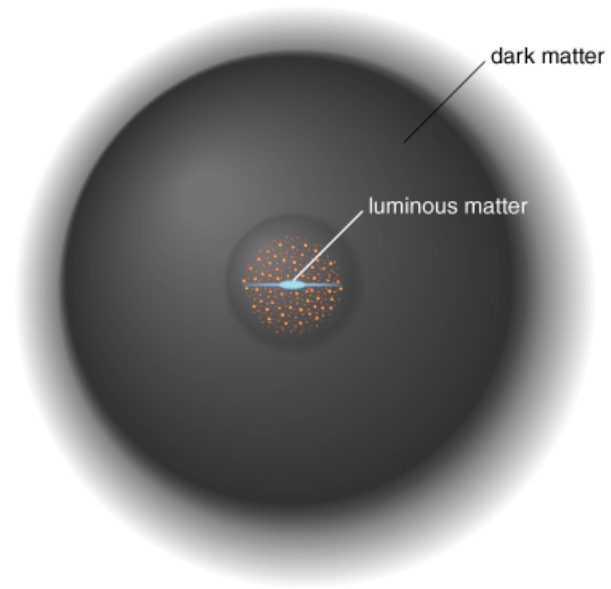
~25% Mørkt stof*

Universets masse/energi – ‘budget’



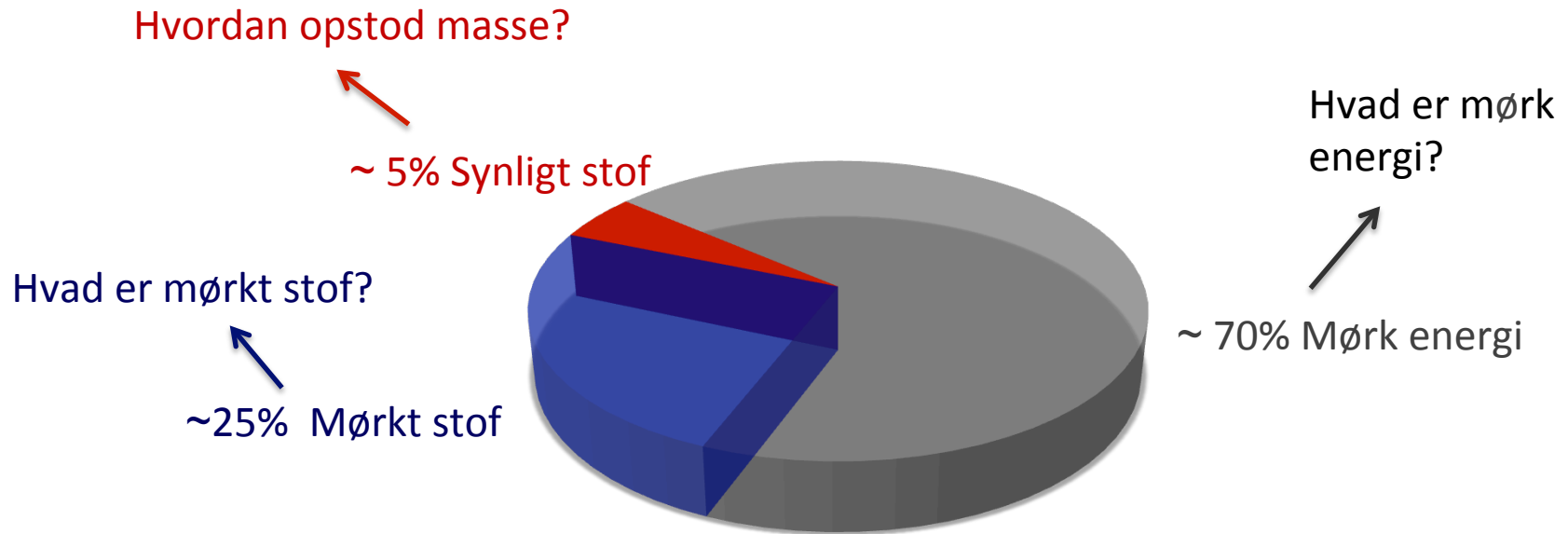
~ 70% Mørk energi

*Stof der ikke udsender lys og ikke er beskrevet af nogen partikler i Standard Modellen



Universets sammensætning

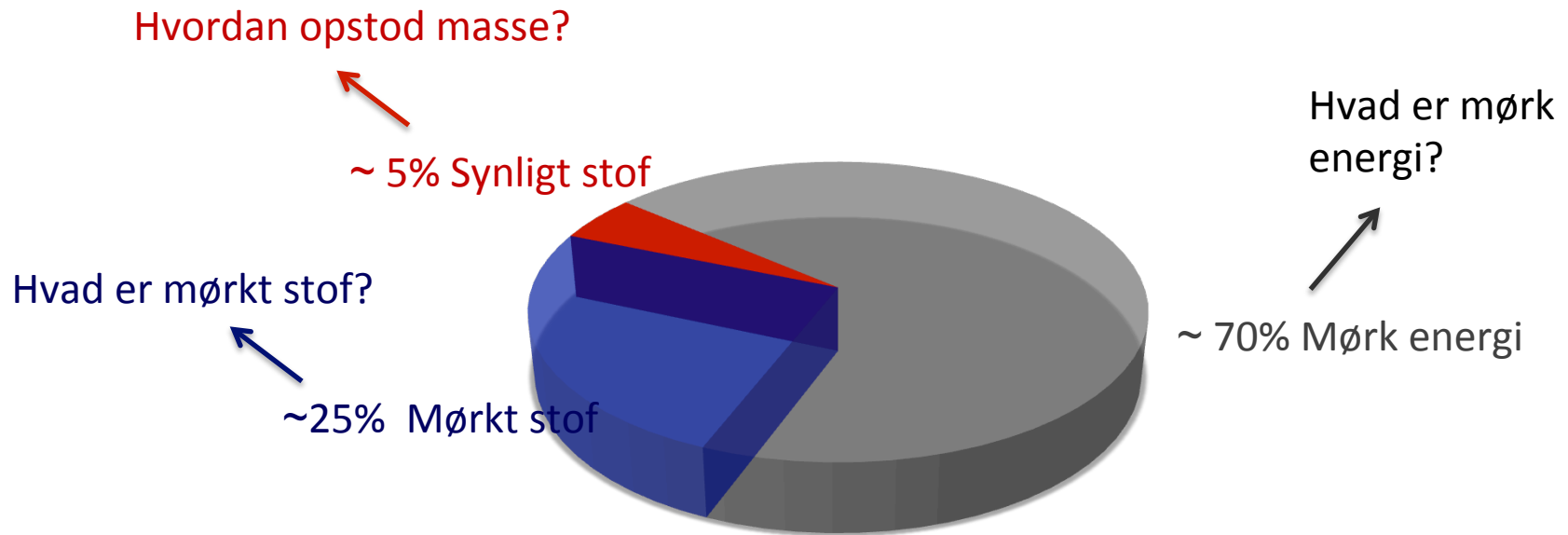
Universets masse/energi - budget



Hvordan kan vi tale om masse og energi i samme 'budget'?

Universets sammensætning

Universets masse/energi - budget

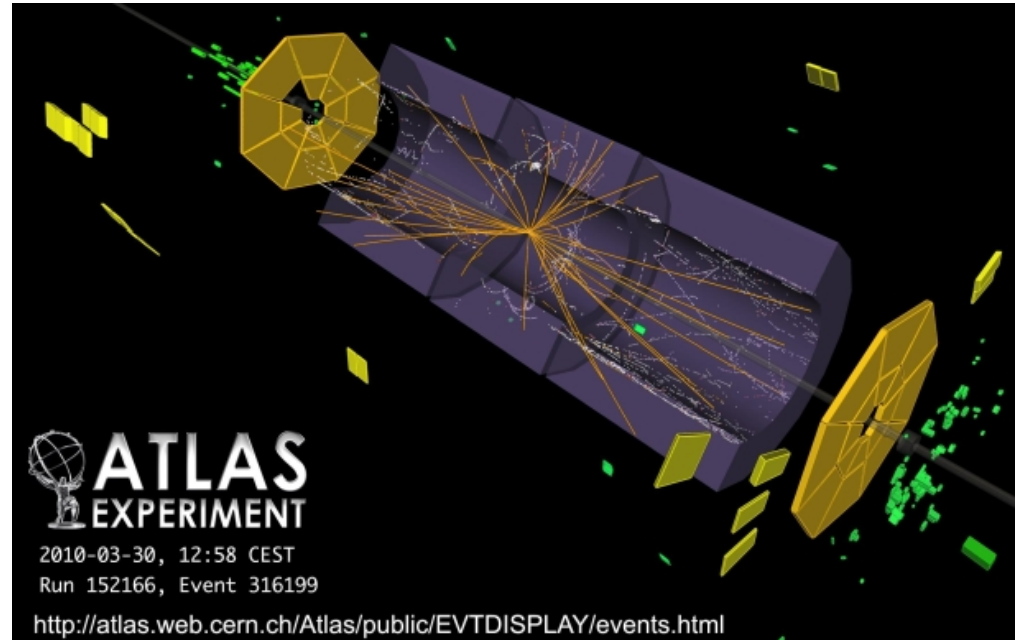
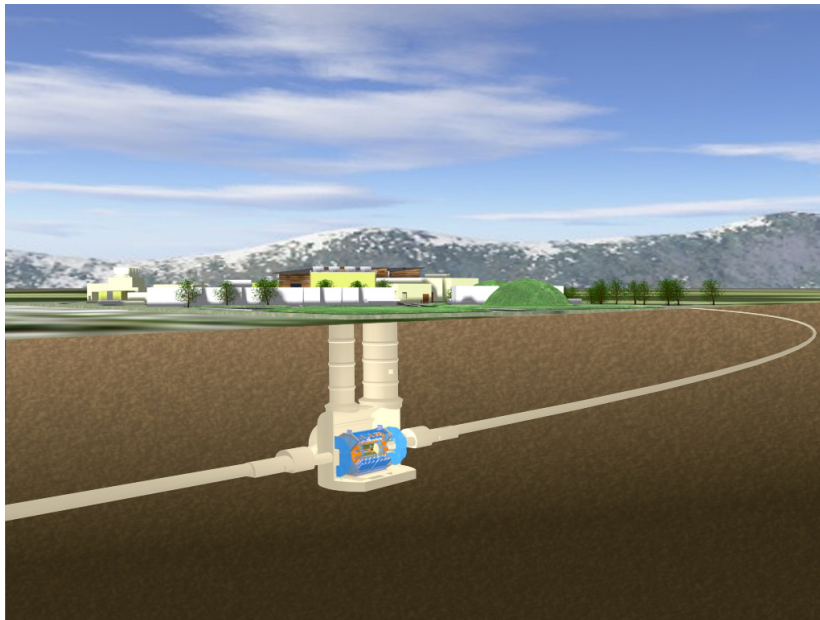


Hvordan kan vi tale om masse og energi i samme 'budget'?

$$E = mc^2$$

$$E = m c^2$$

Einsteins berømte formel er på arbejde hver dag ved LHC eksperimentet



Hundredevis af massive partikler bliver skabt i kollision mellem to høj energiske protoner

$$E \rightarrow m c^2$$

Universets sammensætning

Universets masse/energi - budget



Hvordan kan vi tale om masse og energi i samme 'budget'?

$$E = mc^2$$

Hvad består synligt stof af?

Synligt stof – Standard Modellen

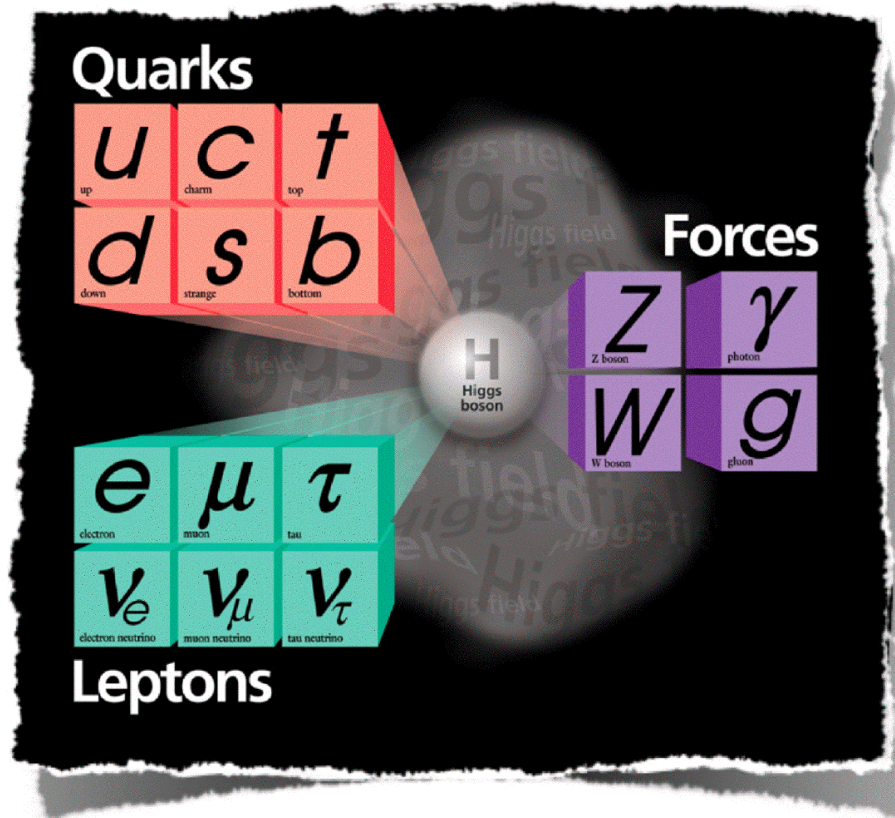
Elementarpartikler

F. eks elektronerne i
atomet

Kræfter/
vekselvirkninger/
dynamik

F. eks den elektromagnetiske
kraft på elektrisk ladede partikler

Synligt stof – Standard Modellen

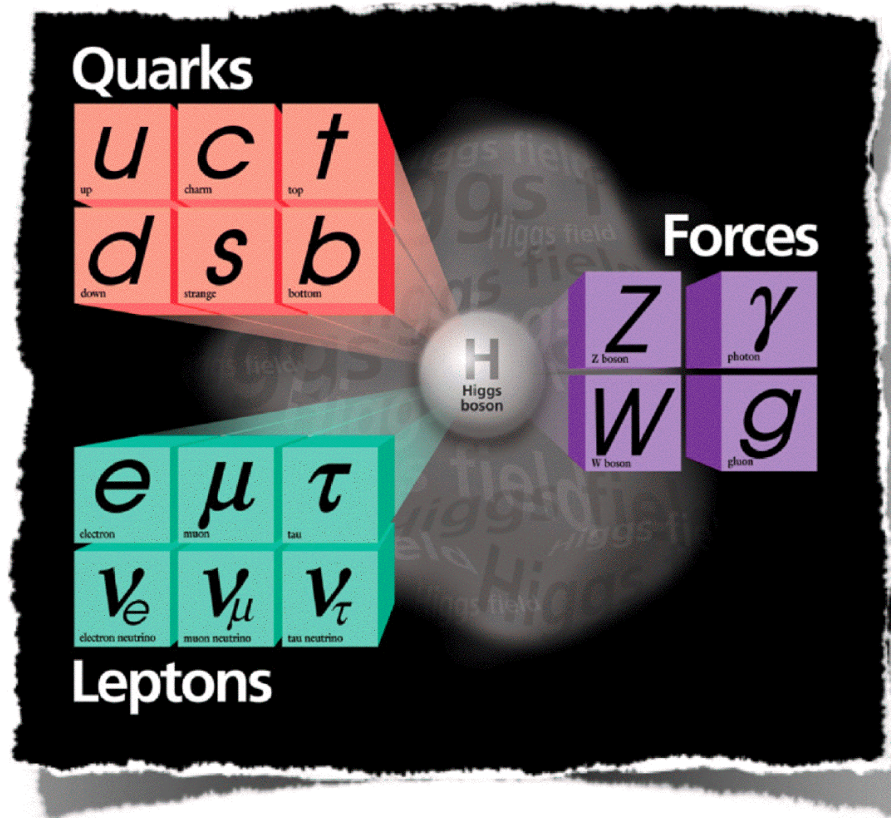


Synligt stof – Standard Modellen

2 slags 'stof-partikler':

quarker har alle ladninger

Leptoner har ikke farve
(og neutrinoer har ikke
Elektrisk ladning)



4 naturkræfter

Den elektromagnetiske kraft
1 elektrisk ladning (+/-)

Den stærke kernekraft
3 farve ladninger (farve/anti-
farve)

Den svage kernekraft
2 Isospin/anti-isospin

Tyngdekraften
masse

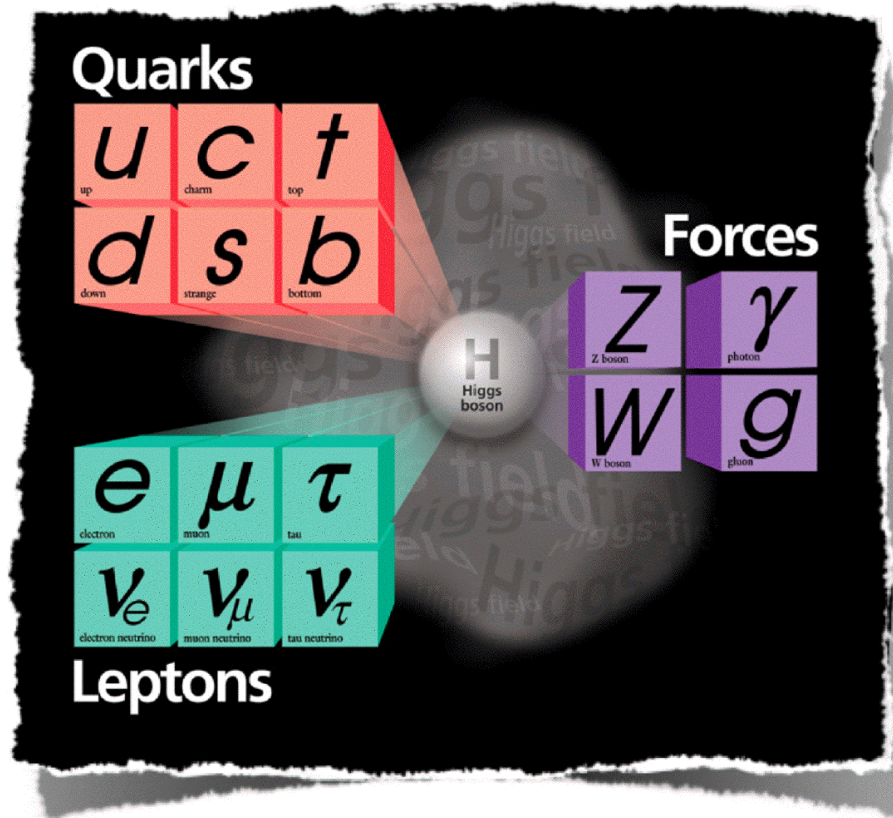
Bemærk at de 4 (kendte) naturkræfter også er beskrevet ved
elementarpartikler

Synligt stof – Standard Modellen

2 slags 'stof-partikler':

quarker har alle ladninger

Leptoner har ikke farve
(og neutrinoer har ikke
Elektrisk ladning)



4 naturkræfter

Den elektromagnetiske kraft
elektrisk ladning (+/-)

Den stærke kernekraft
farve (farve/anti-farve)

Den svage kernekraft
Isospin/anti-isospin

Tyngdekraften
masse

Bemærk at de 4 (kendte) naturkræfter også er beskrevet ved
elementarpartikler

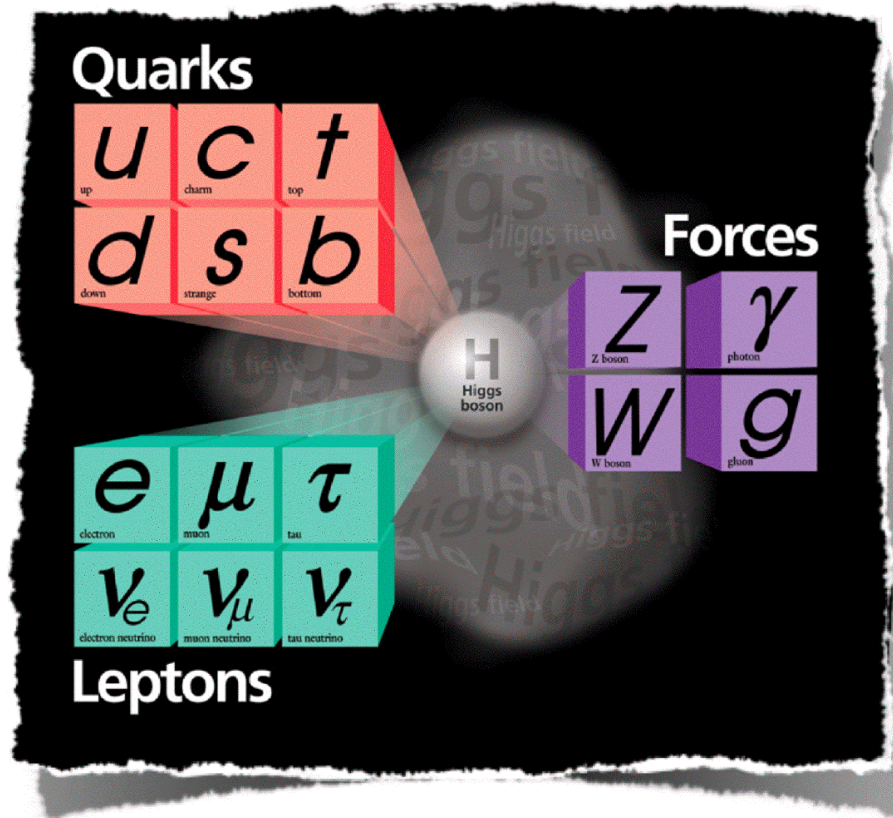
Hvordan kan en kraft, f.eks den elektriske frastødning mellem to ens
ladede partikler beskrives af partikel udveksling?

Synligt stof – Standard Modellen

2 slags 'stof-partikler':

quarker har alle ladninger

Leptoner har ikke farve
(og neutrinoer har ikke
Elektrisk ladning)



4 naturkræfter

Den elektromagnetiske kraft
elektrisk ladning (+/-)

Den stærke kernekraft
farve (farve/anti-farve)

Den svage kernekraft
Isospin/anti-isospin

Tyngdekraften
masse

Bemærk at de 4 (kendte) naturkræfter også er beskrevet ved
elementarpartikler

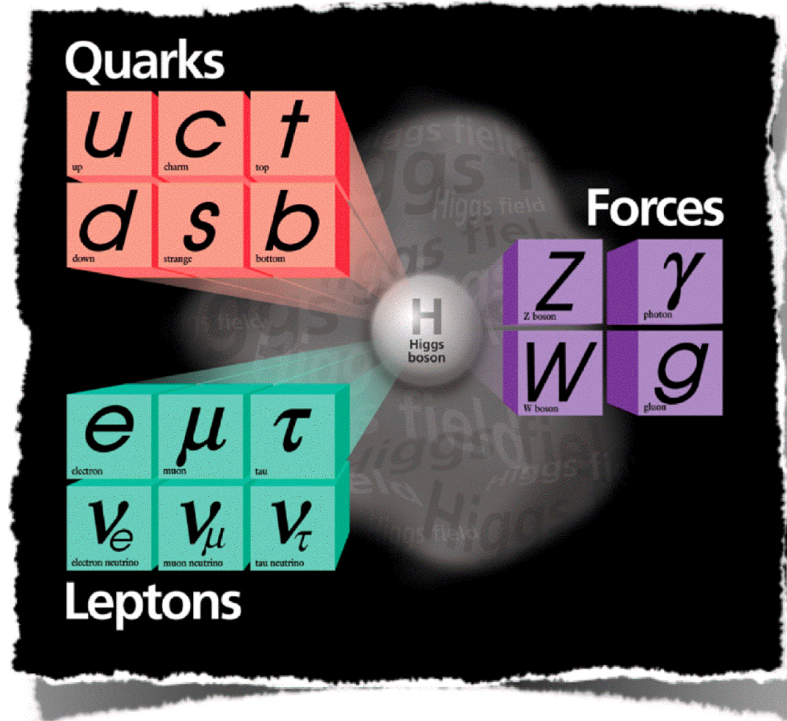
Hvordan kan en kraft, f.eks den elektriske frastødning mellem to ens
ladede partikler beskrives af partikel udveksling? Hvad med tiltrækning?

Synligt stof – Standard Modellen

2 slags 'stof-partikler':

Quarker har alle ladninger

Leptoner har ikke farve
(og neutrinoer har ikke
Elektrisk ladning)



4 naturkræfter

Den elektromagnetiske kraft
elektrisk ladning (+/-)

Den stærke kernekraft
farve (farve/anti-farve)

Den svage kernekraft
Isospin/anti-isospin

Tyngdekraften
masse

Bemærk at de 4 (kendte) naturkræfter også er beskrevet ved elementarpartikler

Stof partiklerne er også inddelt i 3 *familier* – hver familie er kun adskilt ved deres forskellige masse og det faktum at de tunge familier henfalder hurtigt

Mysterier i den synlige verden

Hvorfor er der 4 naturkræfter? Er det i virkeligheden manifestationer af 1 kraft ?
(såkaldt Grand unification)

Hvorfor er tyngdekraften så svag i forhold til de andre kræfter?

Hvorfor er der 3 familier af partikler med meget forskellig *masse*?
(En version af hierarki-problemet)

Hvorfor har nogle af de kraft-bærende partikler *masse*? (Higgs-mekanismen!)

Hvorfor er der ingen anti-*masse*? (Når der er anti-ladninger til alle andre kræfter)

Hvordan opstod *masse*?

Vi har desuden brug for mørkt stof for at forklare Universets *masse*. Hvad er mørkt stof?

Mysterier i den synlige verden

Hvorfor er der 4 naturkraefter? Er det i virkeligheden manifestationer af 1 kraft (Grand unification)

Hvorfor er tyngdekraften så svag i forhold til de andre kræfter?

Hvorfor er der 3 familier af partikler med meget forskellig *masse*?
(En version af hierarki-problemet)

Hvorfor har nogle af de kraft-bærende partikler *masse*? (Higgs-mekanismen)

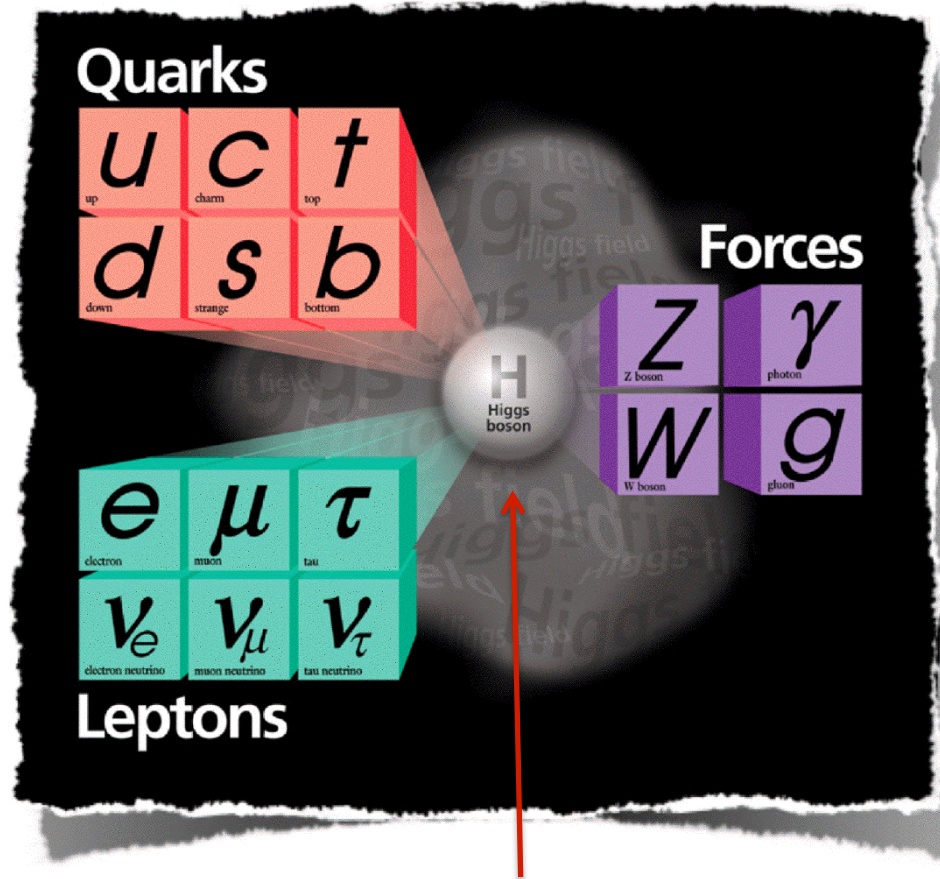
Hvorfor er der ingen anti-*masse*? (Når der er anti-ladninger til alle andre kræfter)

Hvordan opstod *masse*?

Vi har desuden brug for mørkt stof for at forklare Universets *masse*. Hvad er mørkt stof?

En masse ubesvarede spørgsmål om masse !

Elementarpartiklernes masse



Higgs mekanismen

Higgs mekanismen

Tænk på en berømtthed som folk meget gerne vil *vekselvirke* med
I et tomt rum har berømttheden *let* ved at bevæge sig, dvs hun/han har ingen *inerti*

Higgs mekanismen

Tænk på en berømtthed som folk meget gerne vil *vekselvirke* med

I et tomt rum har berømttheden *let* ved at bevæge sig, dvs hun/han har ingen *inerti*

I et fyldt rum stimler folk naturligt sammen og det er sværere for berømttheden at komme

I bevægelse...mængden har givet berømttheden *inerti* dvs. effektiv masse



Higgs mekanismen

Tænk på en berømtthed som folk meget gerne vil *vekselvirke* med

I et tomt rum har berømttheden *let* ved at bevæge sig, dvs hun/han har ingen *inerti*

I et fyldt rum stimler folk naturligt sammen og det er sværere for berømttheden at komme

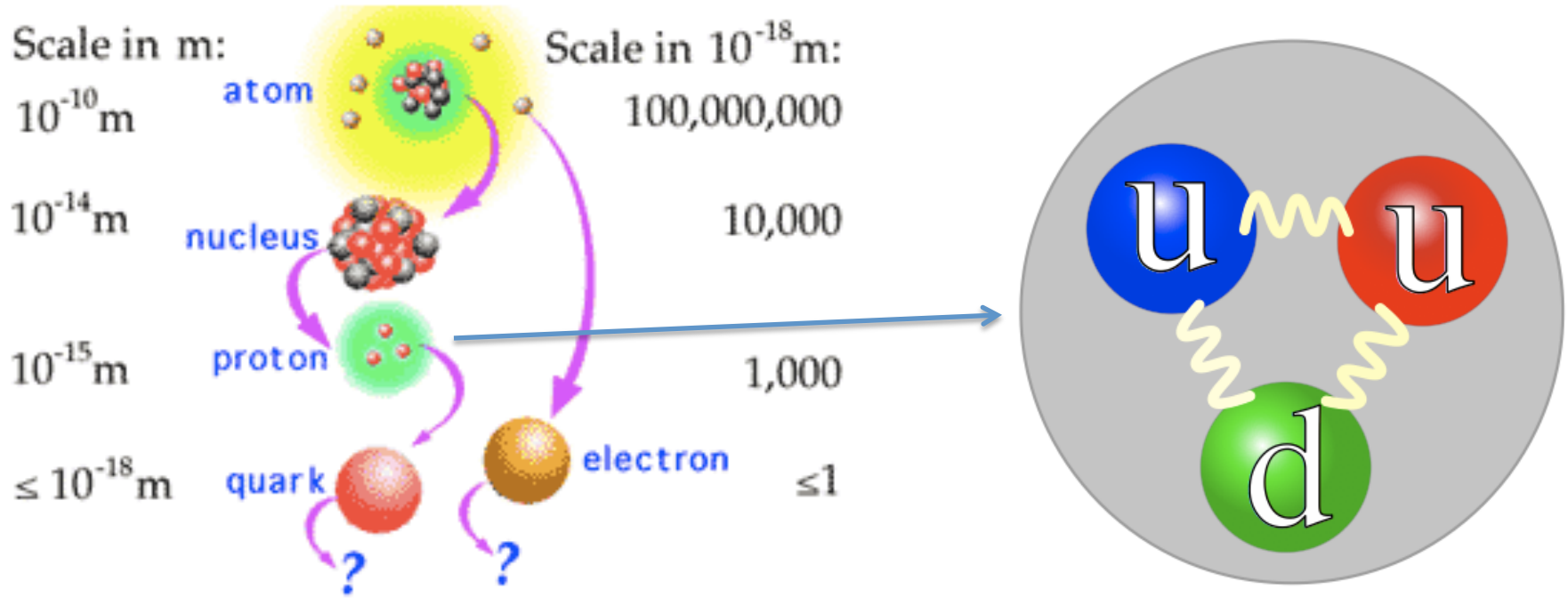
I bevægelse...mængden har givet berømttheden *inerti* dvs. effektiv masse



Masse selv kan opstå fra vekselvirkninger mellem partikler – det kender vi faktisk allerede fra *superledning* og *den stærke vekselvirkning*

Higgs mekanismen er netop et sådant *felt (folkemængde)* der fylder det tomme rum ved lave Energier og giver partiklerne masse, mens feltet forsvinder ved høje energier hvor partiklerne er effektivt masseløse

Energi-skalaer i naturen

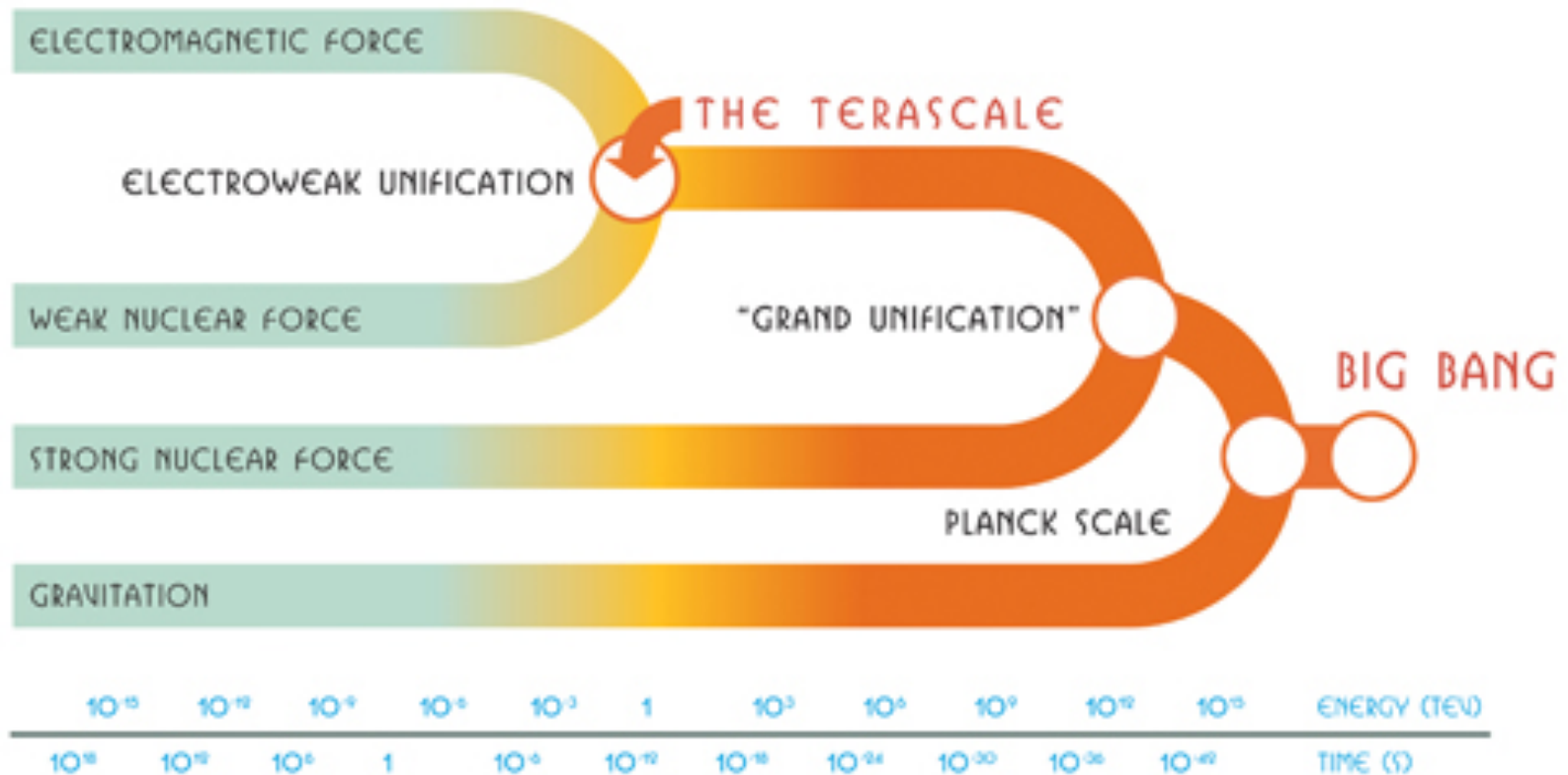


Protonen består af 2 up og 1 down quark, som tilsammen vejer ~ 0.01 GeV
Protonen selv vejer 1 GeV!

Protonens vægt kommer fra den energi der er bundet i de stærke vekselvirkninger
Mellem quarker og gluoner (kraftbærerne) inden i protonen

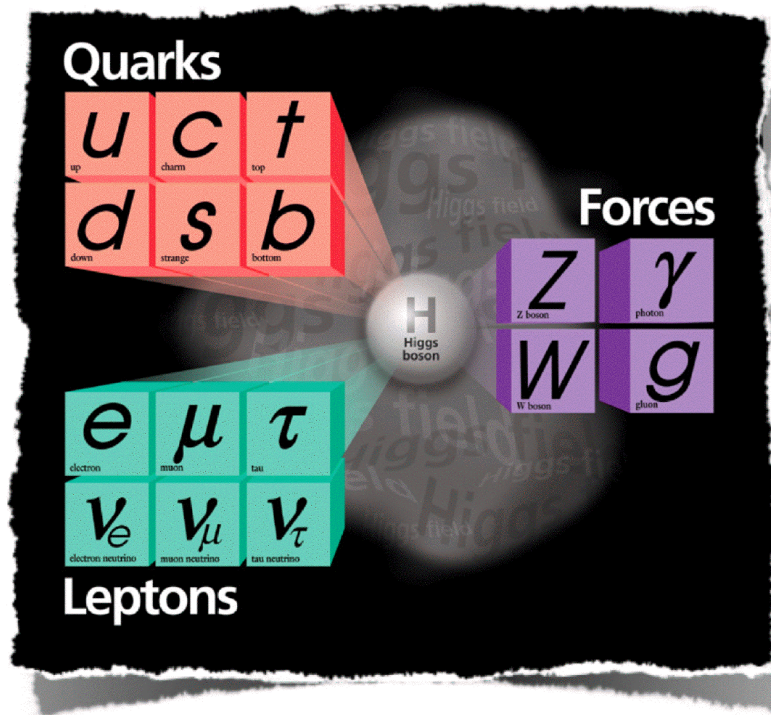
En lignende mekanisme gør fotonen massiv i en superleder!

Energi-skalaer i naturen



W/Z bosonerne er ~ 100 gange tungere end protonen, skalaen for higgs mekanismen er ~ 100 gange højere end skalaen for de stærke vekselvirkninger. Nye stærke vekselvirkninger er en naturlig mulighed

Standard modellen for partikel-fysik

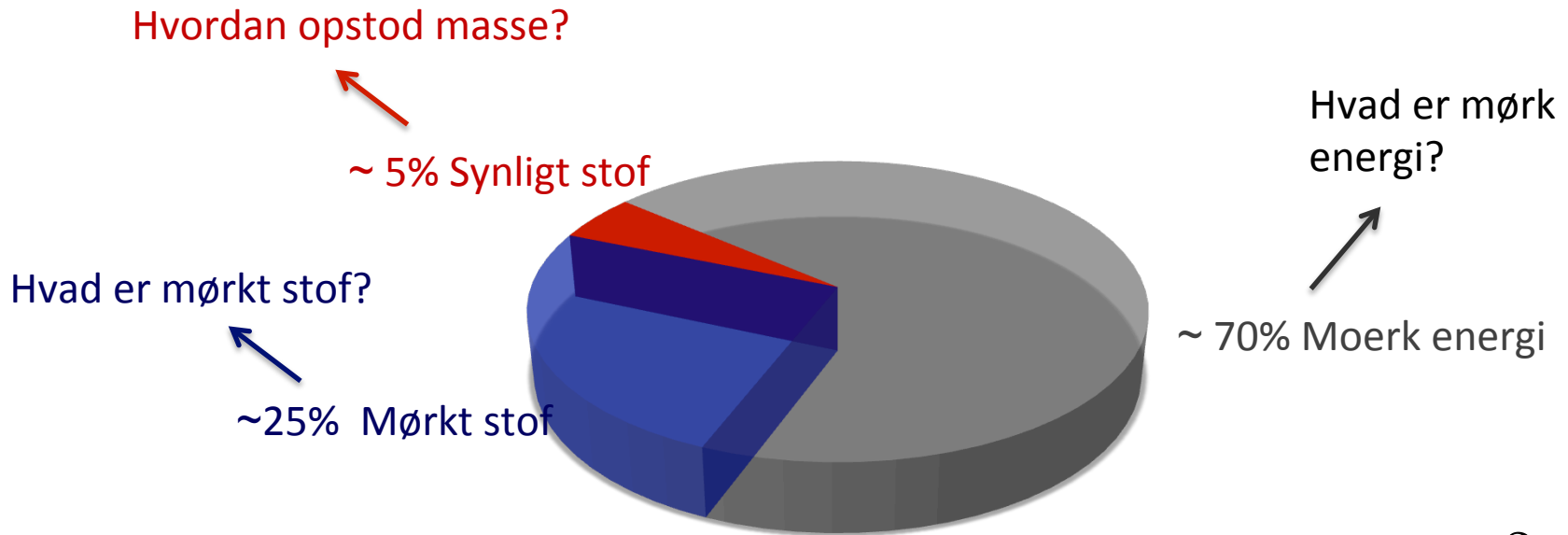


Vi tror Higgs mekanismen ligger bag elementarpartiklernes masse.
Men hvad ligger bag Higgs mekanismen!?

En ny *Higgs-partikel* - med eller uden nye (*super*)-symmetrier?
En ny stærk naturkraft (New Strong Dynamics/Technicolor)? Eller...?

Universets sammensætning

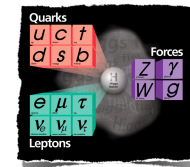
Universets masse/energi - budget



Hvorfor kan vi tale om masse og energi i samme budget?

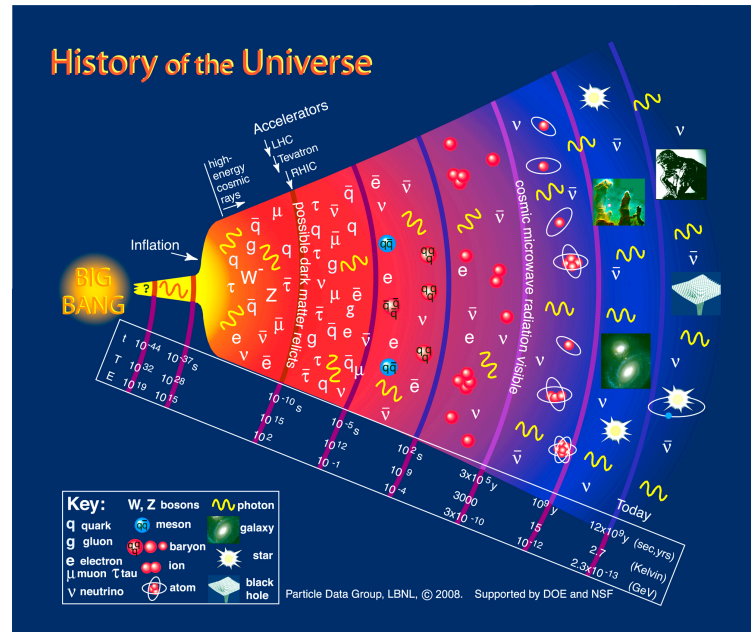
$$E = mc^2$$

Hvad består synligt stof af?



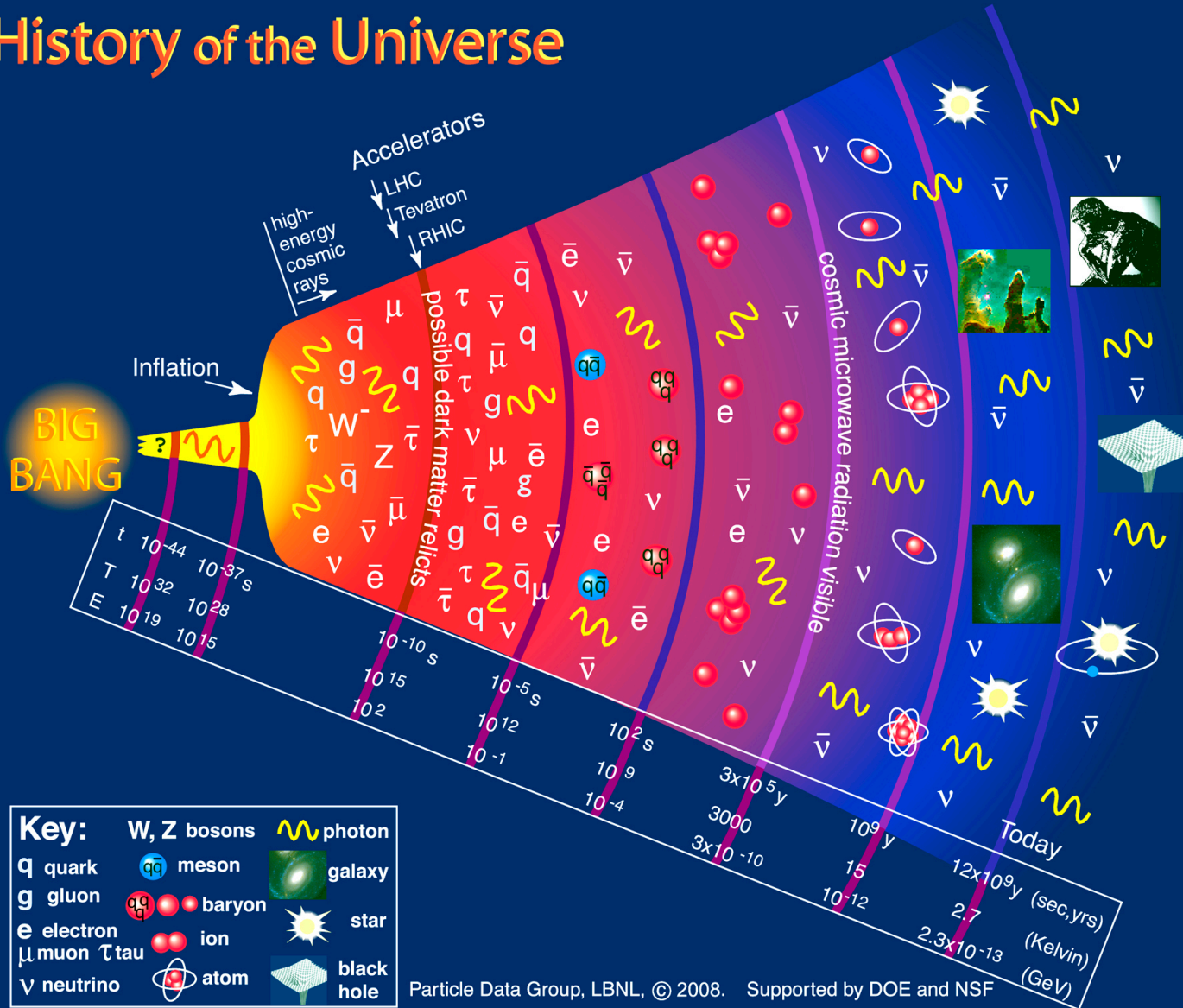
Hvorfor er elementarpartiklerne relevante for den kosmiske udviklingshistorie, når universet mest er tomt rum og kæmpestore galaksehobe?

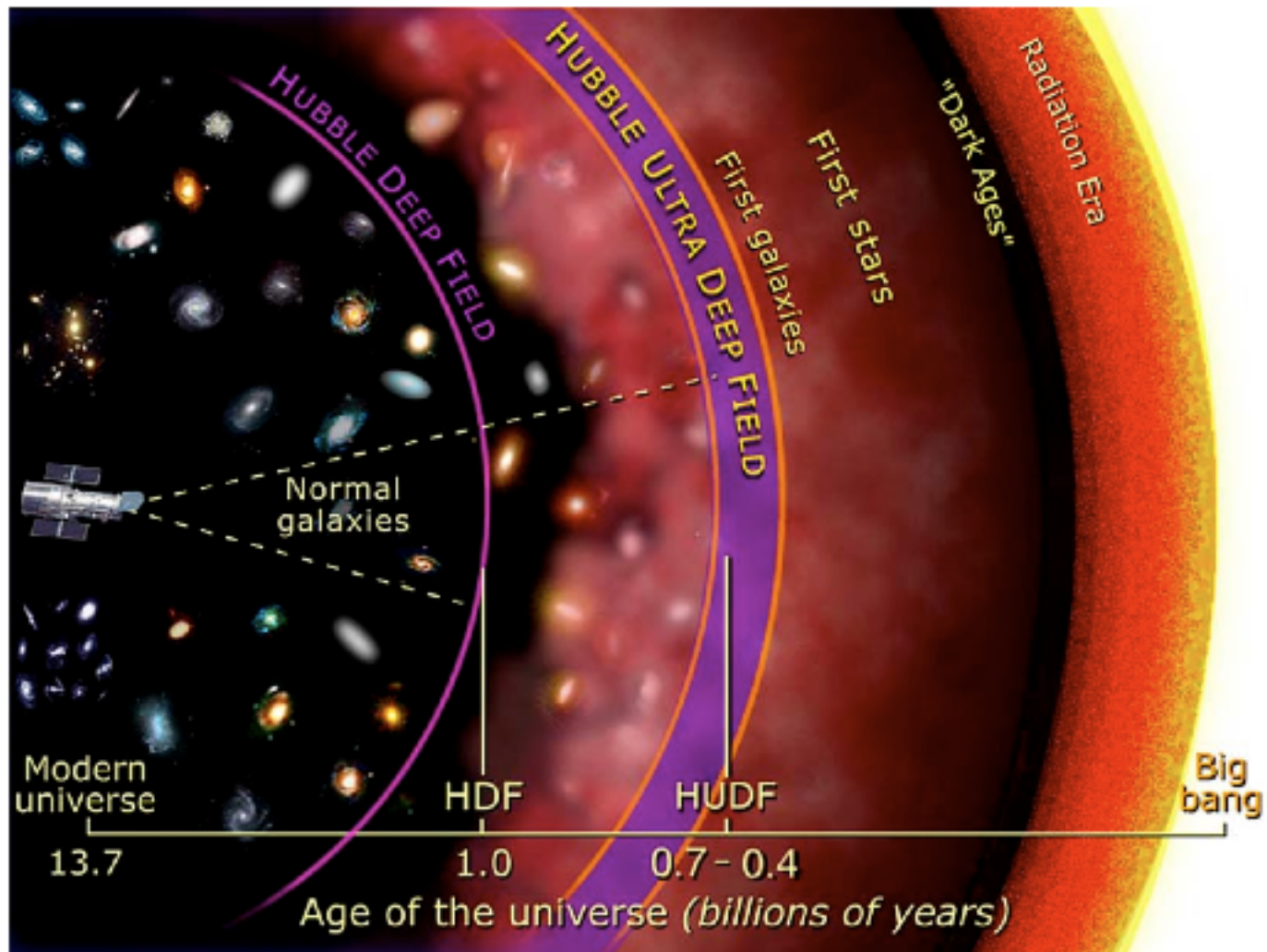
Den kosmiske scene for partikelfysikken – Verden makroskopisk



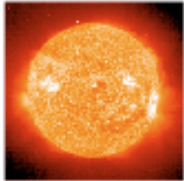
Universet startede i et *Big Bang*. Det tidlige univers var meget småt og meget varmt!
Alle elementar partikler, som quarker, (mørkt stof!) etc strømmede frit rundt.
Universets tidlige historie er med til at bestemme dets struktur idag, især pga. inflation

History of the Universe





Looking far away is the same as looking back into our past ...



We see the Sun as it was
8 minutes ago



We see the nearest star Proxima Centauri, as it was **4 years** ago



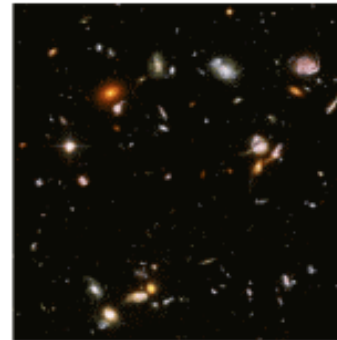
We see the Galactic centre as it was
30,000 years ago



We see our nearest galaxy Andromeda as it was
2 million years ago



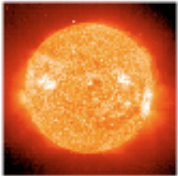
We see the Virgo cluster as it was
50 million years ago



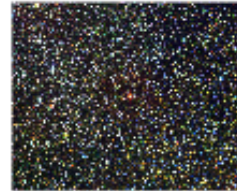
We see galaxies in the Hubble Ultra Deep Field as they were upto
12 billion years ago

Med teleskoper kan vi ikke se længere end til ~ 300.000 år før BB.

Looking far away is the same as looking back into our past ...



We see the Sun as it was
8 minutes ago



We see the nearest star Proxima Centauri, as it was **4 years** ago



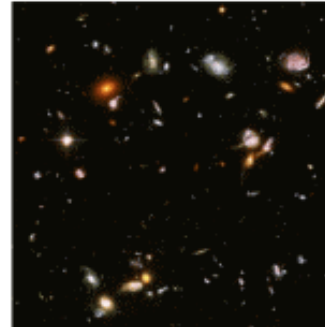
We see the Galactic centre as it was
30,000 years ago



We see our nearest galaxy Andromeda as it was
2 million years ago



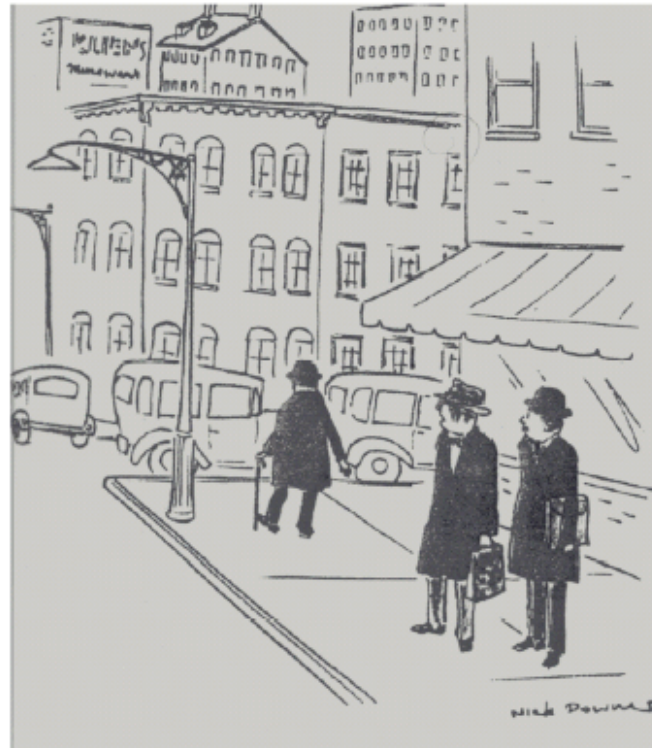
We see the Virgo cluster as it was
50 million years ago



We see galaxies in the Hubble Ultra Deep Field as they were upto
12 billion years ago

Hvorfor mener vi at Big Bang fandt sted?

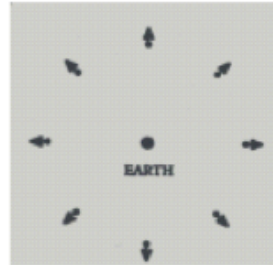
Hubble discovered that the *further* a galaxy is the *faster* it seems to be moving away from us



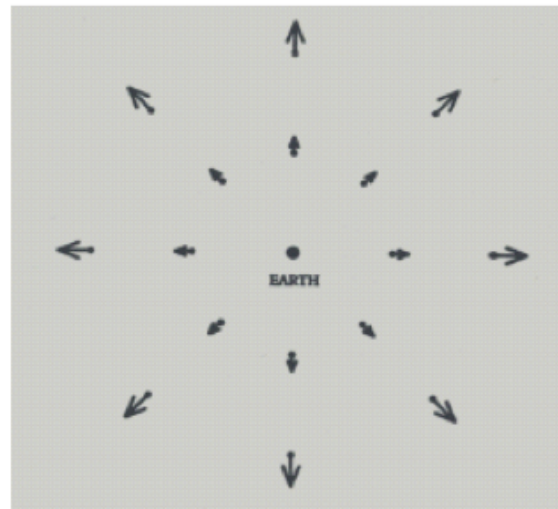
*"Every time I see Edwin Hubble,
he's moving rapidly away from me!"*

S. Sarkar CERN, 2008

Galaxies equidistant from us, all moving away at the same speed



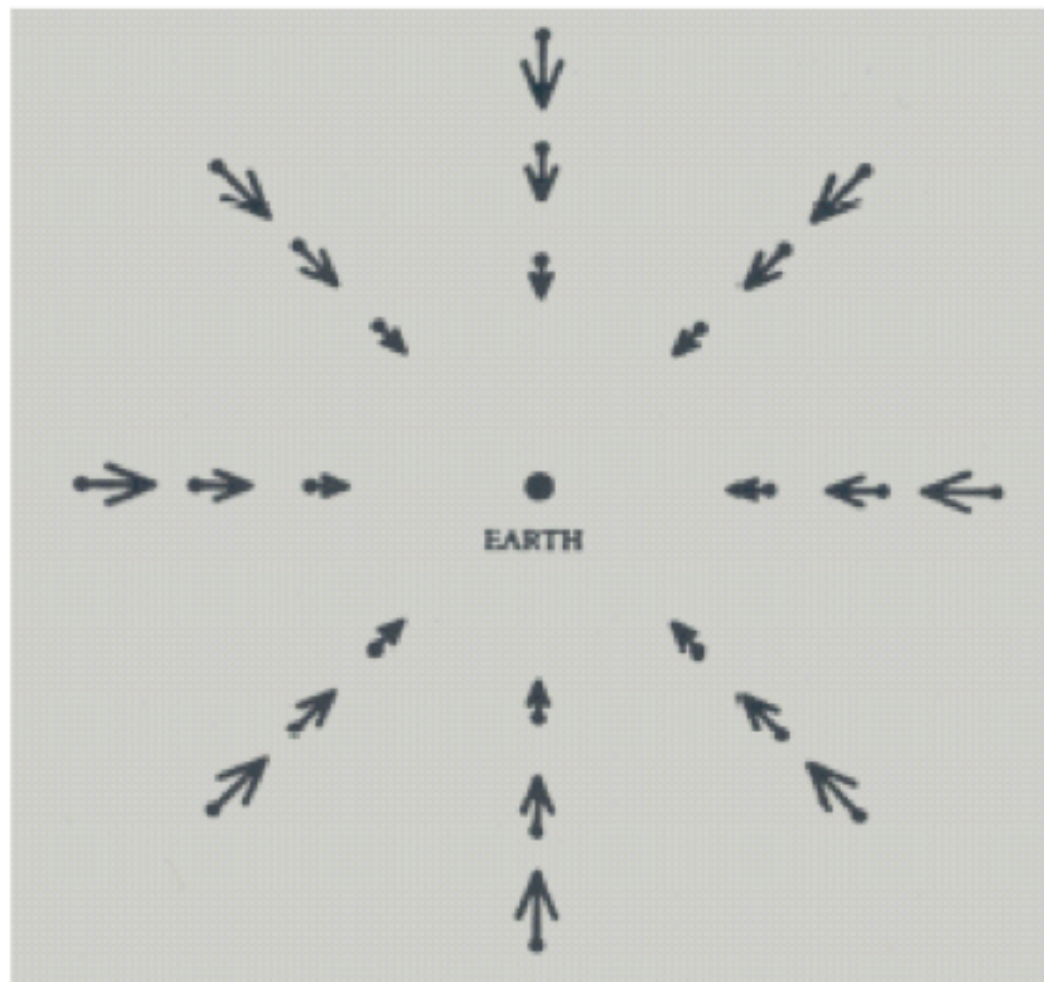
Galaxies twice as far, are moving away twice as fast



Tænk på en ballon der pustes op -> men *uden* rum omkring, ballonen er rum-tiden

S. Sarkar CERN, 2008

So going back in time, *all* galaxies will come together at the *same* instant at $\sim 1/H_0 \approx 14 \times 10^9$ yr (given the present expansion rate: $H_0 \approx 70$ km/s/Mpc)

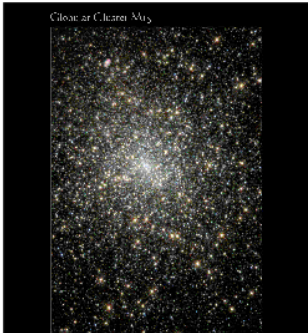


**i.e. the entire universe originated in a 'Big Bang' about 14 billion years ago
... but this was the birth of space-time, *not* an explosion in space!**

Noget mangler

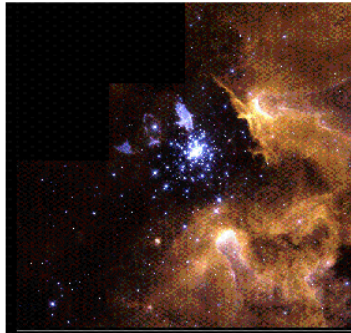
Stars

$\Omega \sim 0.005$



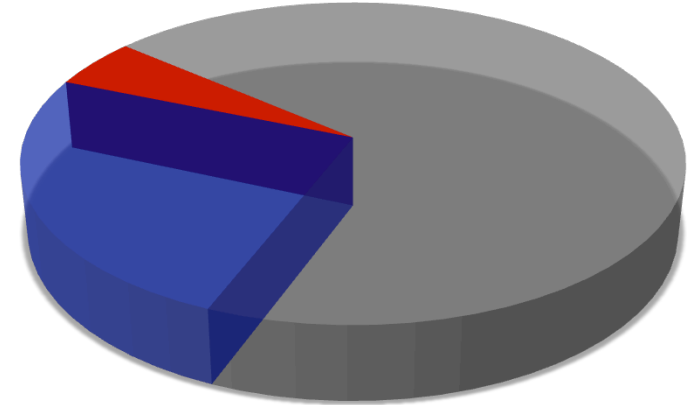
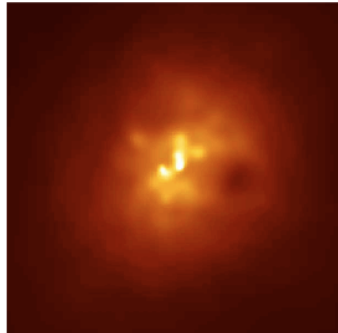
Interstellar gas

$\Omega \sim 0.005$



Hot gas in clusters

$\Omega \sim 0.03$



$\Omega=1$ er hele masse budgetet iflg. vores big bang model

Når den synlige masse kun bidrager $\sim 5\%$
må der enten være

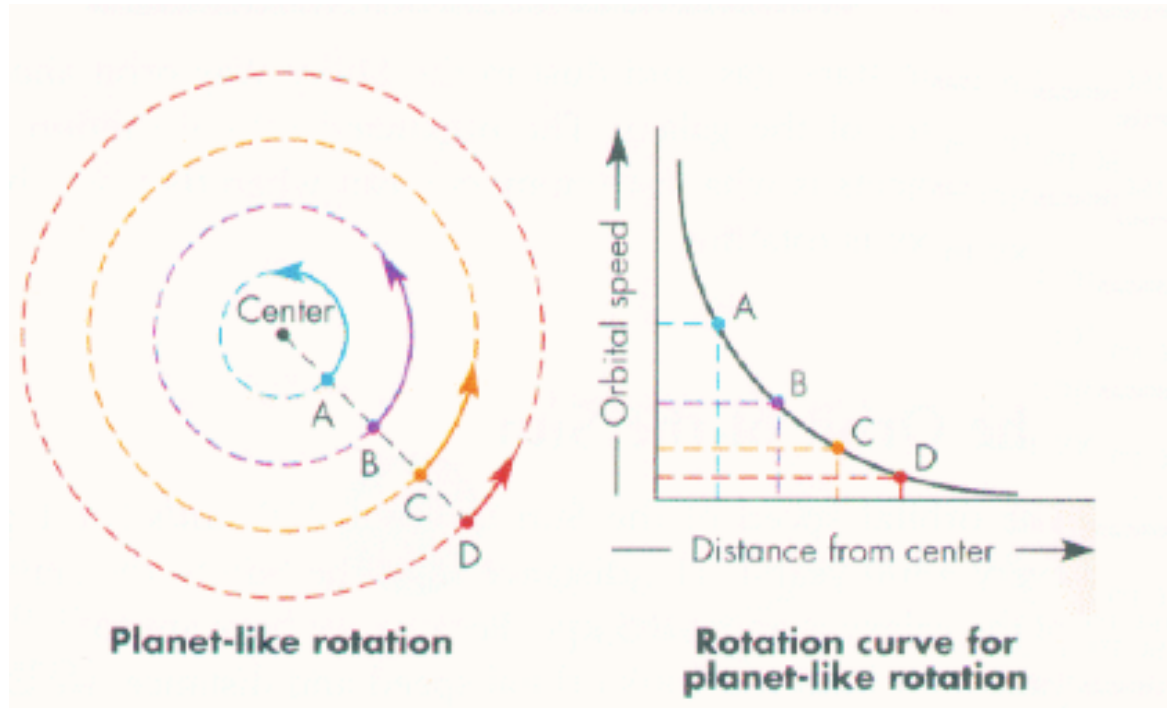
Nye partikler dvs mørkt stof udgøres af ny(e) elementarpartikler
eller vi må revurdere Newtons og Einsteins love for tyngdekraften!

'Observationer' af mørkt stof – 1

Spiral galakser

Fra Newtons love og *Virial Teoremet*: $E_{pot} = -2 E_{kin}$ finder vi rotationshastigheden af objekter i galaksen som funktion af deres afstand til galaksen

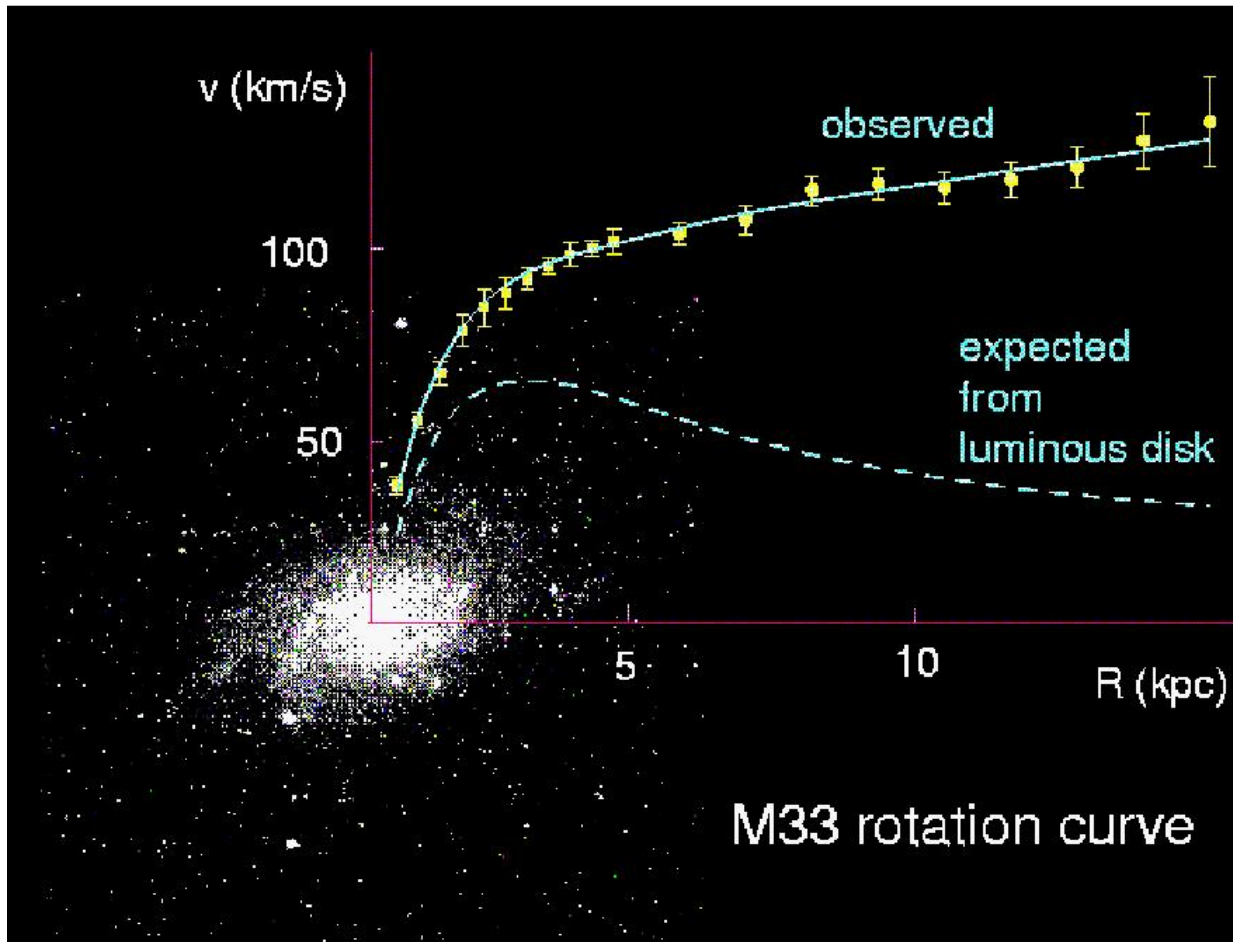
$$G m M(r) / r = m v^2 \text{ eller ...}$$



'Observationer' af mørkt stof – 1

Spiral galakser

Observationer viser I stedet for dette



'Observationer' af mørkt stof – 1

Spiral galakser

Noget stemmer ikke!

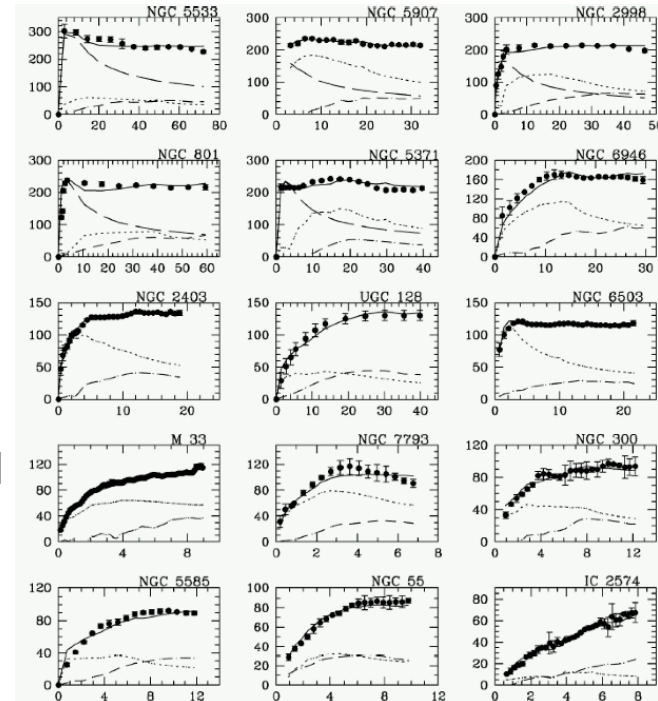
Er der noget galt med

Dynamikken dvs med
Newtons/Einsteins love

Som vi brugte til at bestemme hastighederne med

Eller:

Hvordan kan mørkt stof forklare disse
Observationer?



Sanders & Verheijen [astro-ph/9802240]

'Observationer' af mørkt stof – 1

Spiral galakser

Noget stemmer ikke!

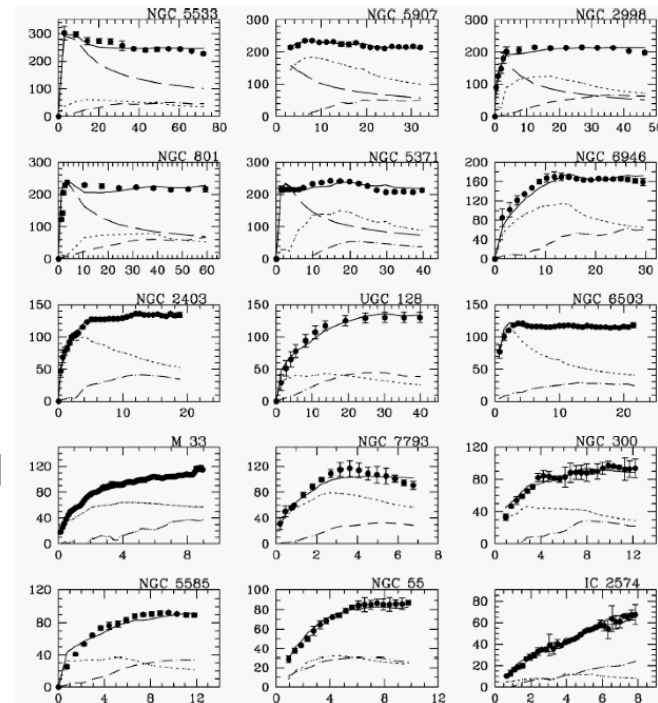
Er der noget galt med

Dynamikken dvs med
Newtons/Einsteins love

Som vi brugte til at bestemme hastighederne med

Eller:

Hvordan kan mørkt stof forklare disse
Observationer?

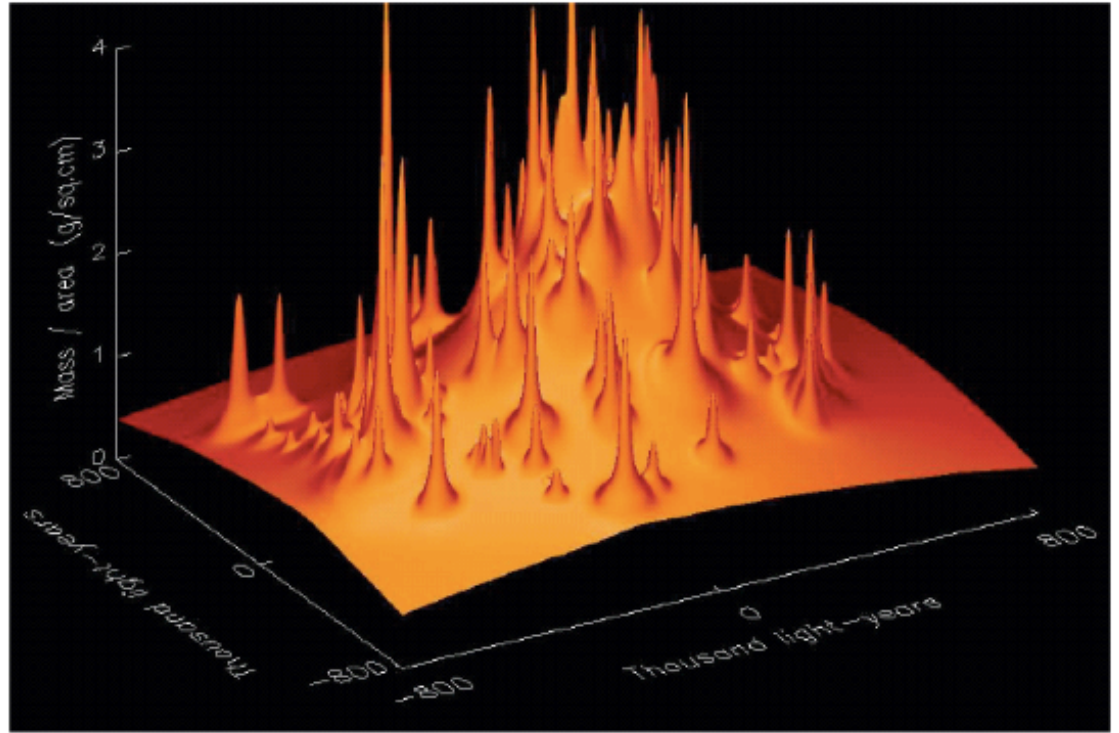


Sanders & Verheijen [astro-ph/9802240]

Hvis der er en 'halo' af mørk stof uden om galaksen med en massetæthed
 $\rho_{DM} \sim 1/r^2$ kan vi forklare observationerne

'Observationer' af mørkt stof – 2

Gravitational lensing



Tyngdepotentialet i nogle Galakse-hobe kan rekonstrueres via *gravitational lensing*
Det viser en komponent af jævnt fordelt usynlig masses i galaksehobe

‘Observationer’ af mørkt stof – 3

Bullet Cluster kollisionen

2 Galaksehobe er stødt sammen: Den ene som en kugle (til højre) gennem den anden. Røntgenstrålingen viser at de 2 centre for den synlige masse (gul) ikke stemmer overens med de to centre for den totale masse (de inderste grønne cirkler)

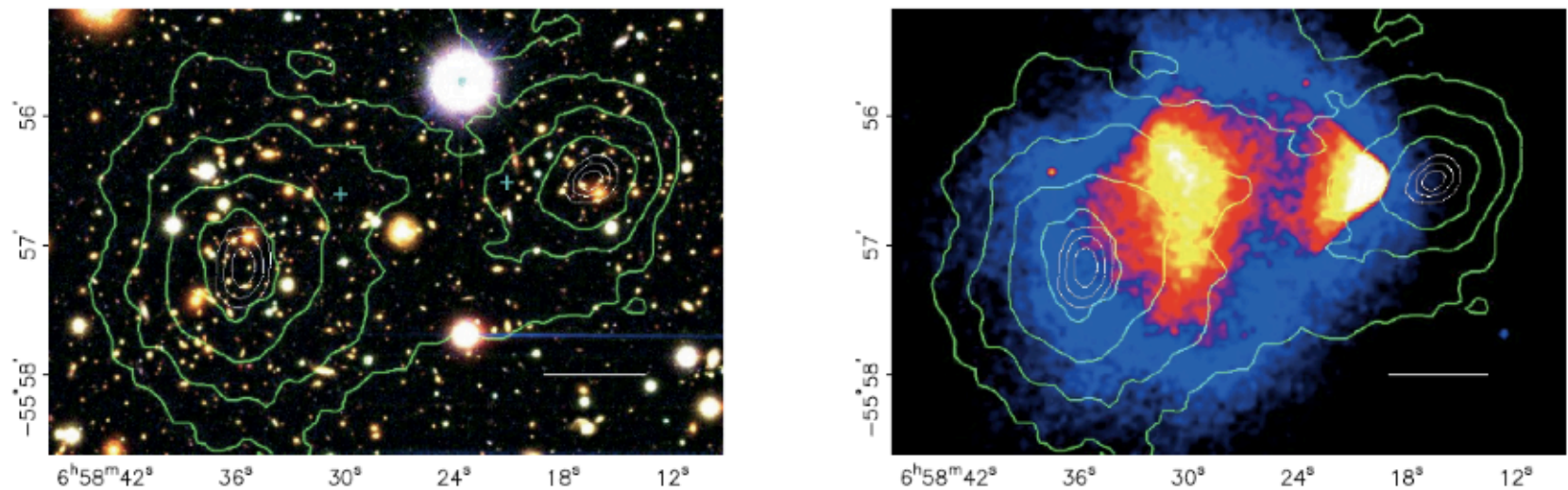


FIG. 1.—*Left panel:* Color image from the Magellan images of the merging cluster 1E 0657–558, with the white bar indicating 200 kpc at the distance of the cluster. *Right panel:* 500 ks *Chandra* image of the cluster. Shown in green contours in both panels are the weak-lensing κ reconstructions, with the outer contour levels at $\kappa = 0.16$ and increasing in steps of 0.07. The white contours show the errors on the positions of the κ peaks and correspond to 68.3%, 95.5%, and 99.7% confidence levels. The blue plus signs show the locations of the centers used to measure the masses of the plasma clouds in Table 2.

Clowe *et al* [[astro-ph/0608407](#)]

‘Observationer’ af mørkt stof – 4

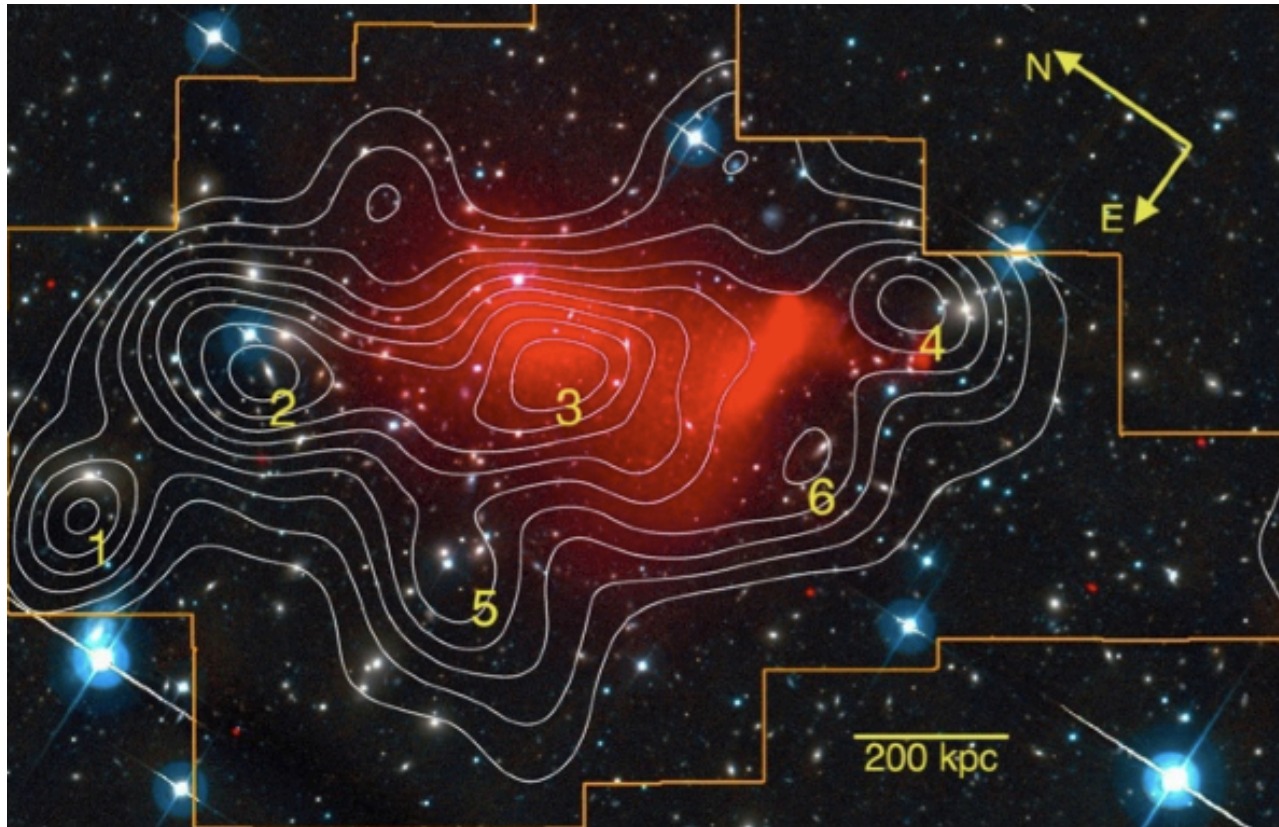
Bullet Cluster/Abell cluster kollisionenerne



Bullet cluster-kollisionen et stærkt indicie for mørkt stofs eksistens
for en måned siden kom nye observationer af Abell clusteren kollisionen...

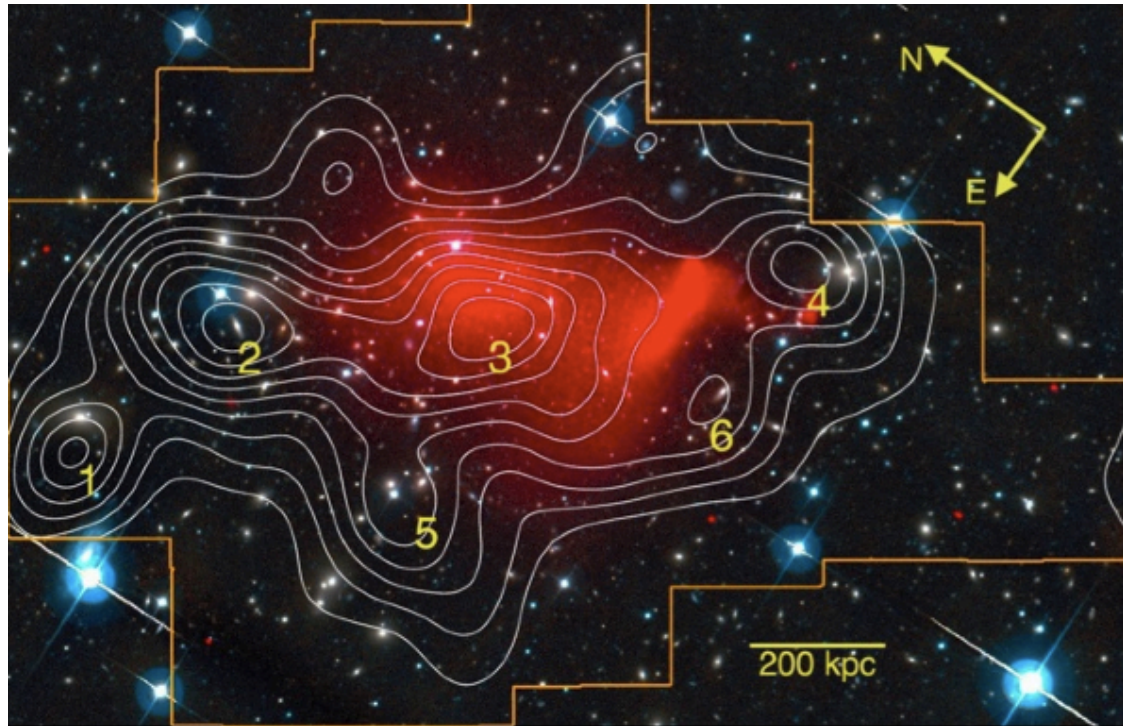
‘Observationer’ af mørkt stof – 4

Bullet Cluster/Abell cluster kollisionenerne



‘Observationer’ af mørkt stof – 4

Bullet Cluster/Abell cluster kollisionenerne



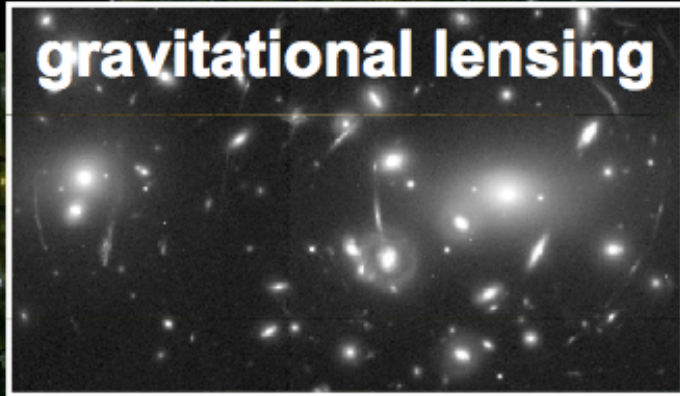
Måske giver Abell hoben nye indsigter i hvordan mørkt stof vekselvirker med sig selv!

Dark Matter

cluster dynamics



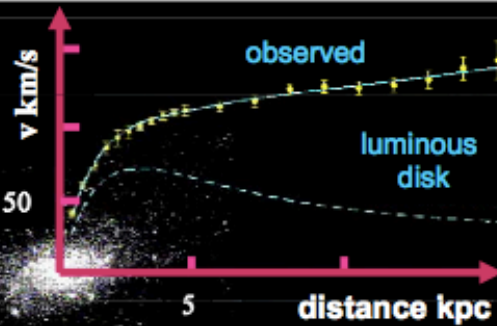
gravitational lensing



$$\Omega_M \sim 30\%$$

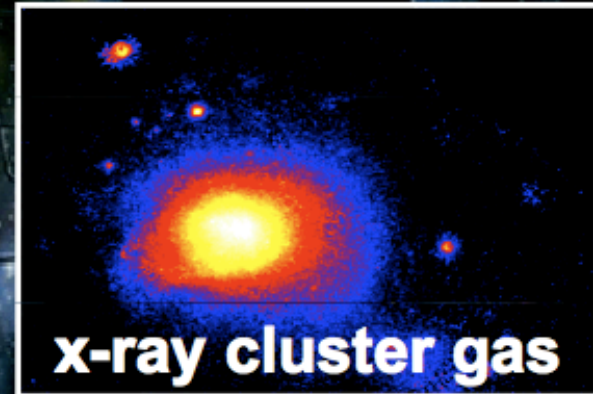
$$\Omega_B \sim 4\%$$

$$\Omega_i = \frac{\rho_i}{3H_0^2 / 8\pi G}$$

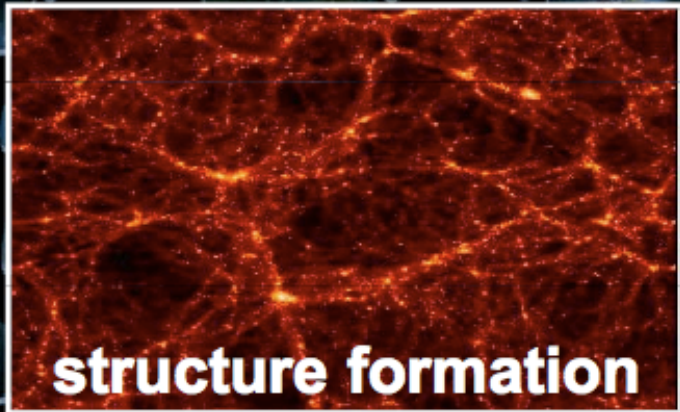


rotation curves

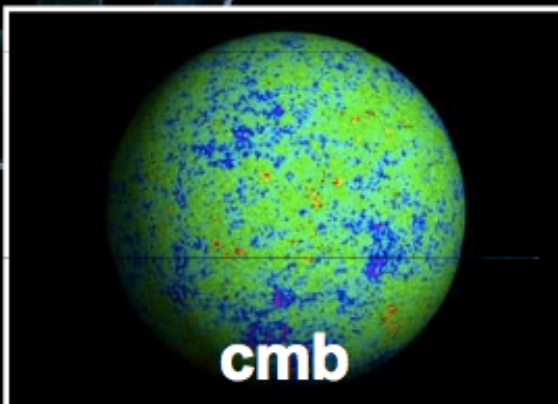
x-ray cluster gas



structure formation



cmb



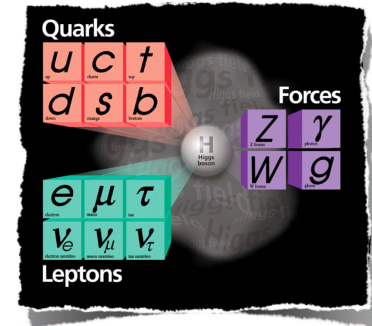
cluster collisions



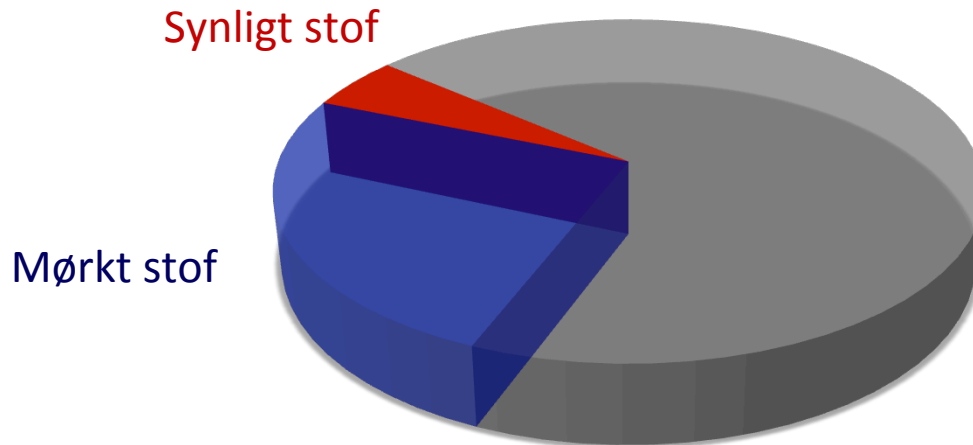
Opsummering

Vi har *to* Standard modeller i partikel fysikken og astro-partikel fysikken

- 1) Standard modellen for elementarpartiklerne
- 2) og de 4 (kendte) naturkræfter



- 2) Kosmologiens Standard Model Λ CDM



+ Inflation,
Baryogenesis,
(Partikelfysikkens Standard model)

I begge modeller er *masse* et centralt problem:
Hvad er *massens oprindelse* og hvad er Hovedbestanddelen af universets masse, det mørke stof

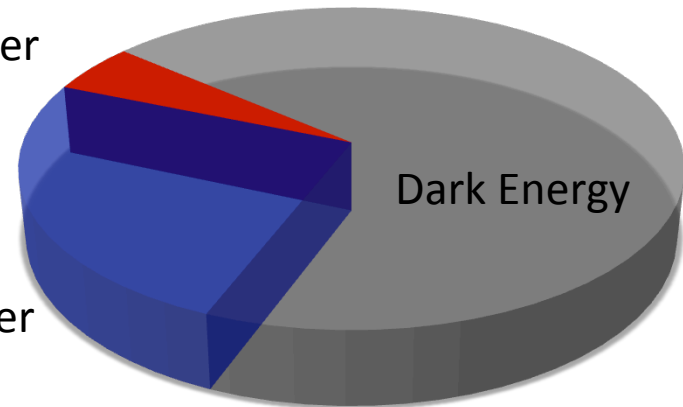
Mørkt stof – et partikelfysiks perspektiv

Synligt stof er (hovedsageligt) sammensat (protoner har substruktur) og *asymmetrisk* (dvs ingen antipartikler tilbage) **Matter**

Mængden af mørkt stof og synligt stof er (for en teoretisk fysiker) nogenlunde den samme:

$$\Omega_{\text{DM}}/\Omega_{\text{B}} \sim 5$$

Dark Matter



De fleste modeller for mørkt stof giver ikke noget link mellem Ω_{DM} and Ω_{B} og har brug for nye *ad hoc* symmetrier for at stabilisere DM partiklen (e.g. neutralino'en der stabiliseres af *R*-parity i supersymmetriske modeller)

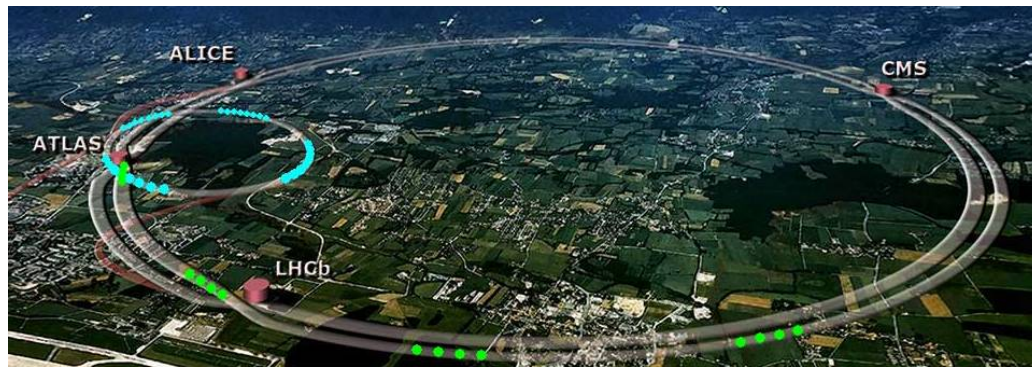
I modeller baseret på nye stærke vekselvirkninger, New Strong Dynamics/Technicolor, er DM partiklen sammensat (ligesom protonen), *asymmetrisk* og kræver ikke nogen *ad hoc ny* symmetry men er stabil på samme måde som protonen

Både ved CP3-Origins, SDU, og ved Oxford University forskes der intenst i *asymmetrisk Mørkt stof fra nye stærke vekselvirkninger*

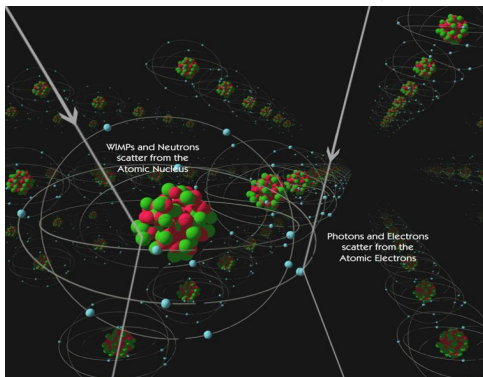
Kan vi direkte observere mørkt stof?

Der er i øjeblikket en kæmpe eksperimentel indsats for at afdække oprindelsen af masse og det mørke stof på partikel-niveau

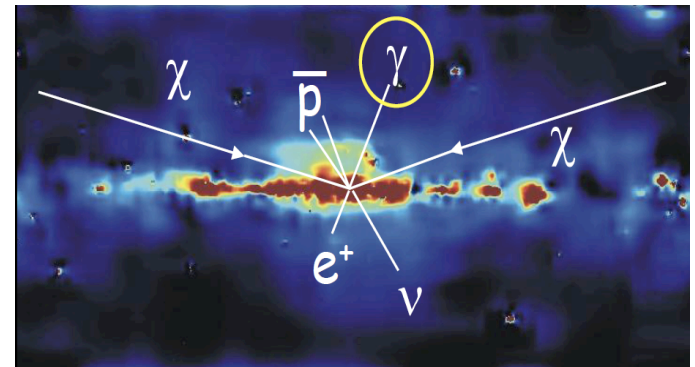
LHC eksperimentet leder efter spor af både Higgs mekanismen og mørkt stof



Direkte observations eksperimenter
(DM direct detection experiments)

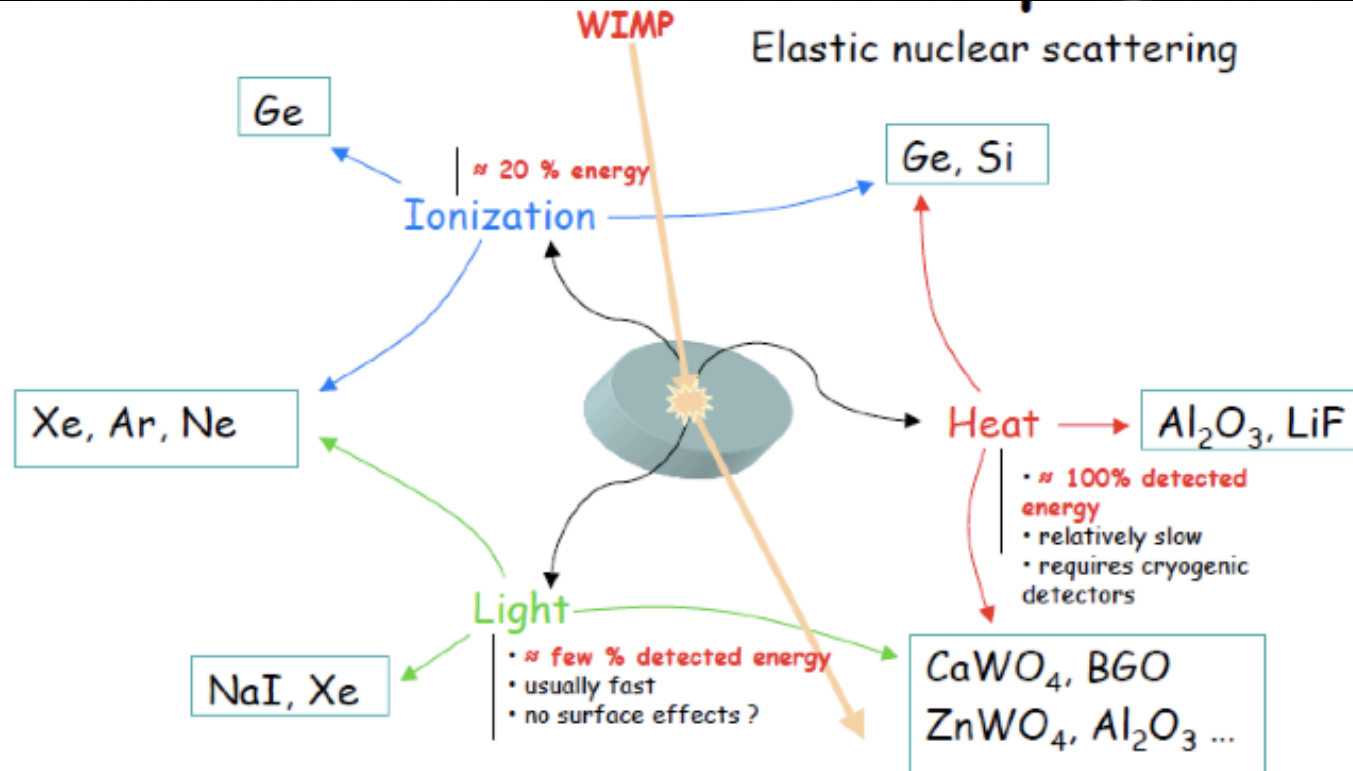
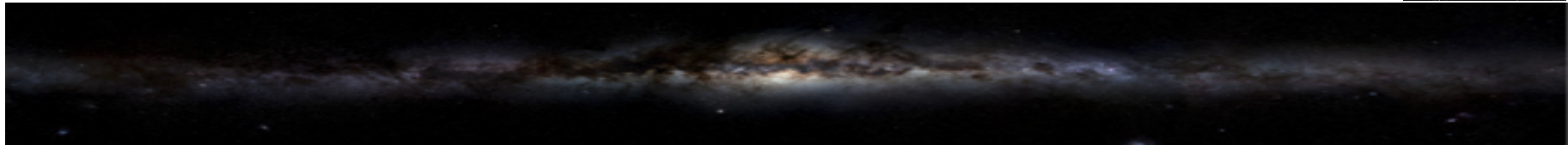
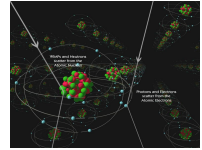


Astro-fysiske (sattelit) observationer

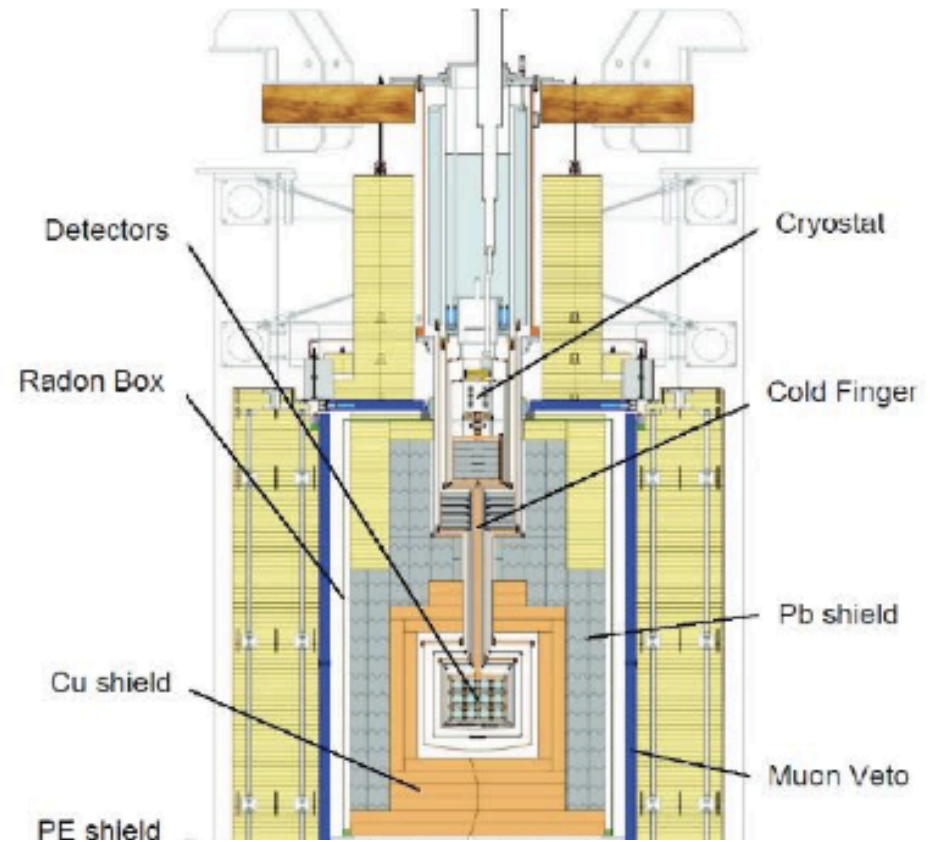


Direkte observation af mørkt stof - I

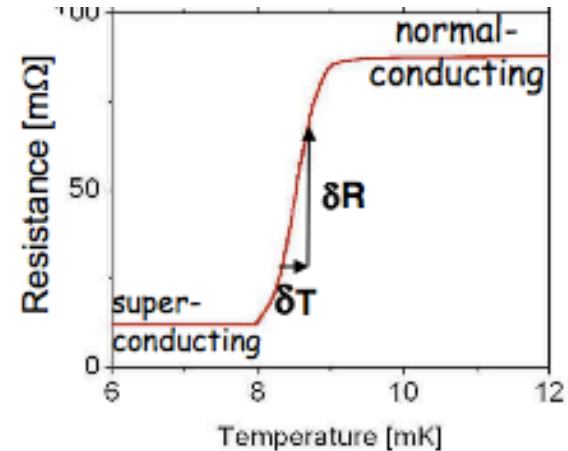
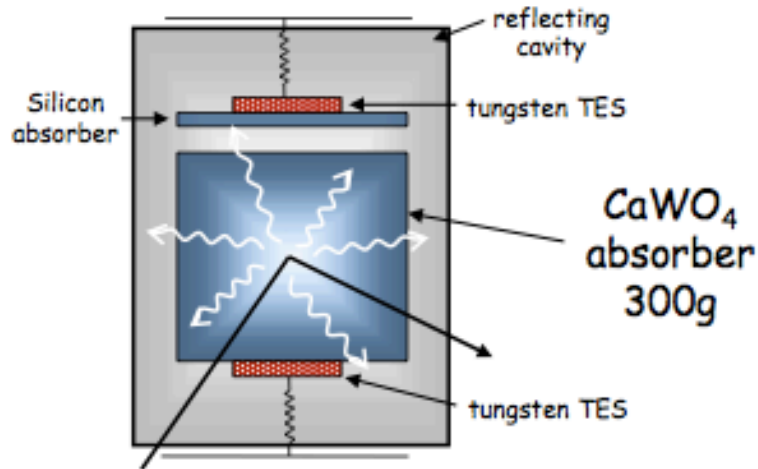
Direct detection/nuclear recoil detection eksperimenter



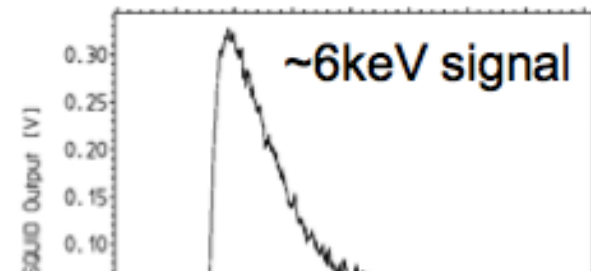
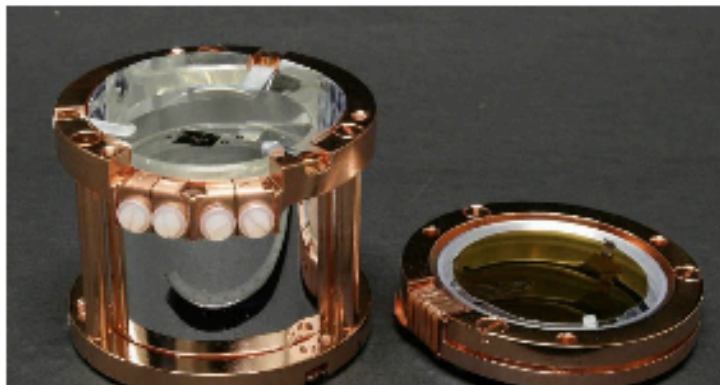
Direkte observation af mørkt stof - I



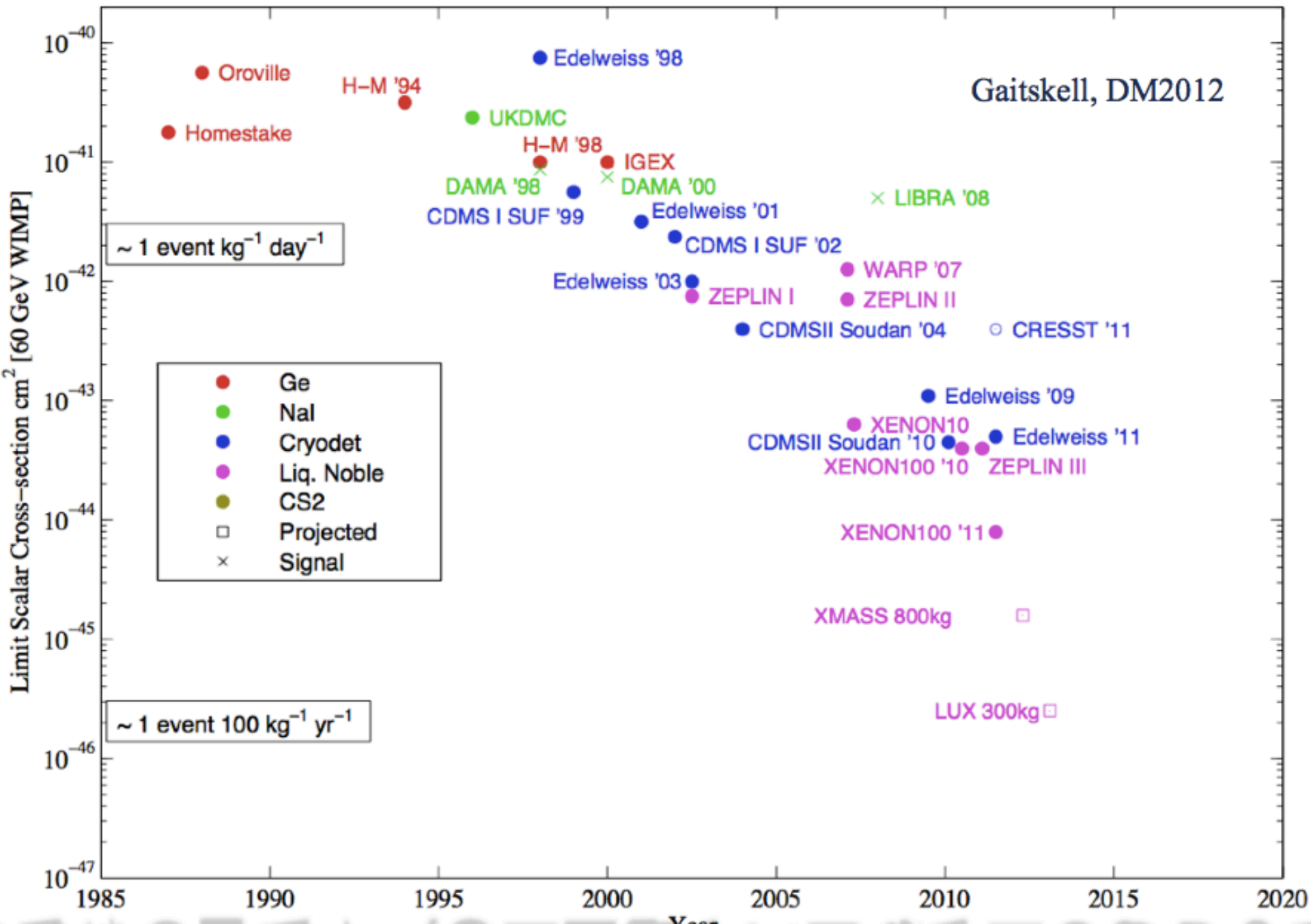
Direkte observation af mørkt stof - I



Width of transition: ~ 1 mK
Signals: few μ K
Stability: $\sim \mu$ K

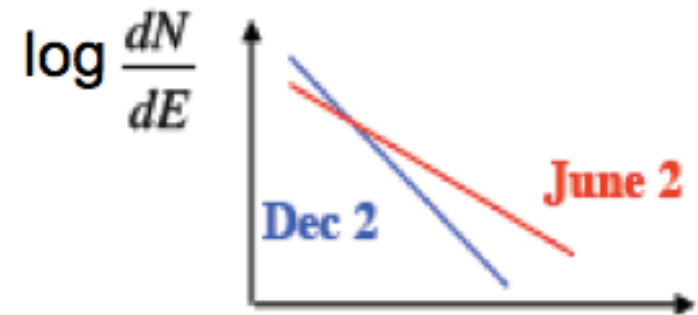
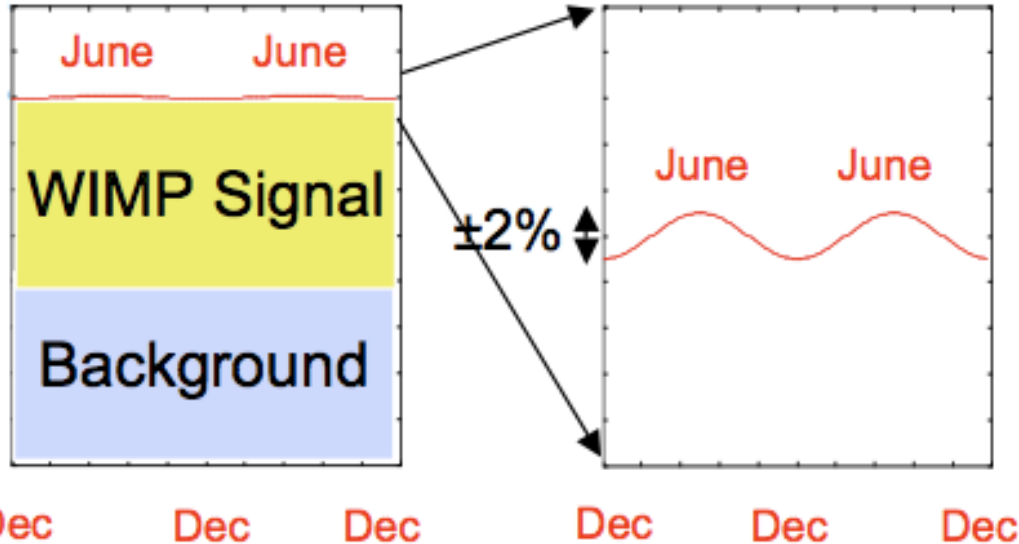
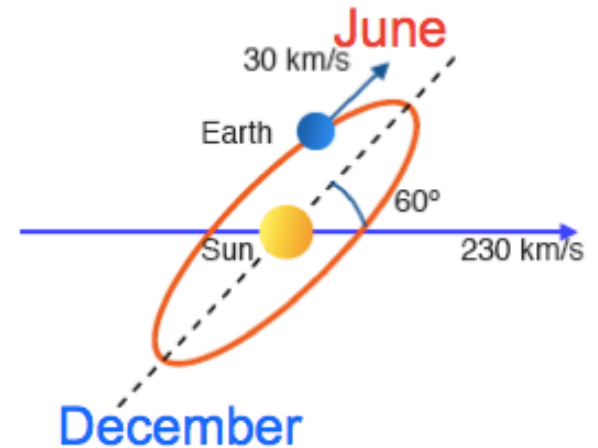


Dark Matter Searches: Past, Present & Future



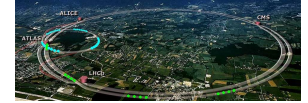
Direkte observation af mørkt stof - I

Event-rate og modulation

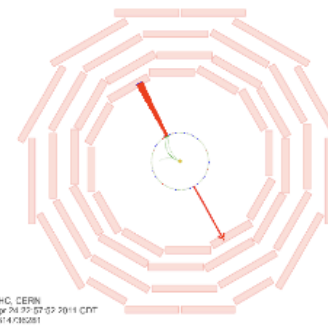
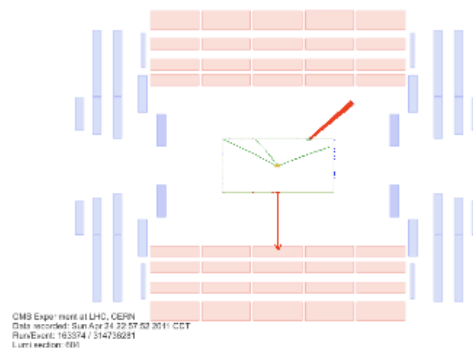
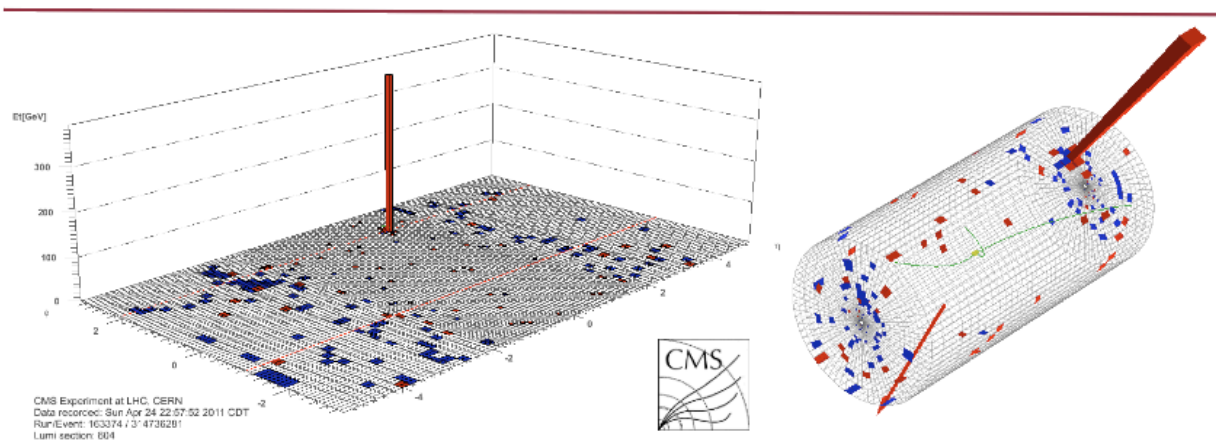


'Direkte' observation af mørkt stof - II

LHC eksperiment, manglende energi/manglende impuls observationer

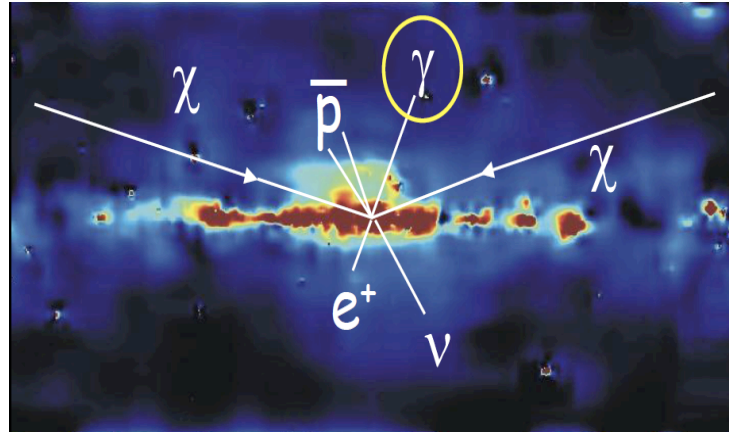


MONOPHOTON – EVENT DISPLAY



Direkte observation af mørkt stof - III

Sattelit observationer af annihilation/henfald af mørkt stof



Vi mener at kende den gnms tæthed af mørkt stof f.eks i vores galakse og områder med Høj DM tæthed vha metoder som tidligere beskrevet

Hvis der både er mørkt stof partikler og anti-partikler kan de af og til *annihilere* til kendte SM partikler som kan observeres.

Hvis der kun er partikler kan de af og til *henfalde* (men den gnms levetid må være længere End universets)

Hvordan kan vi skelne de to forskellige processer som funktion of DM tætheden?

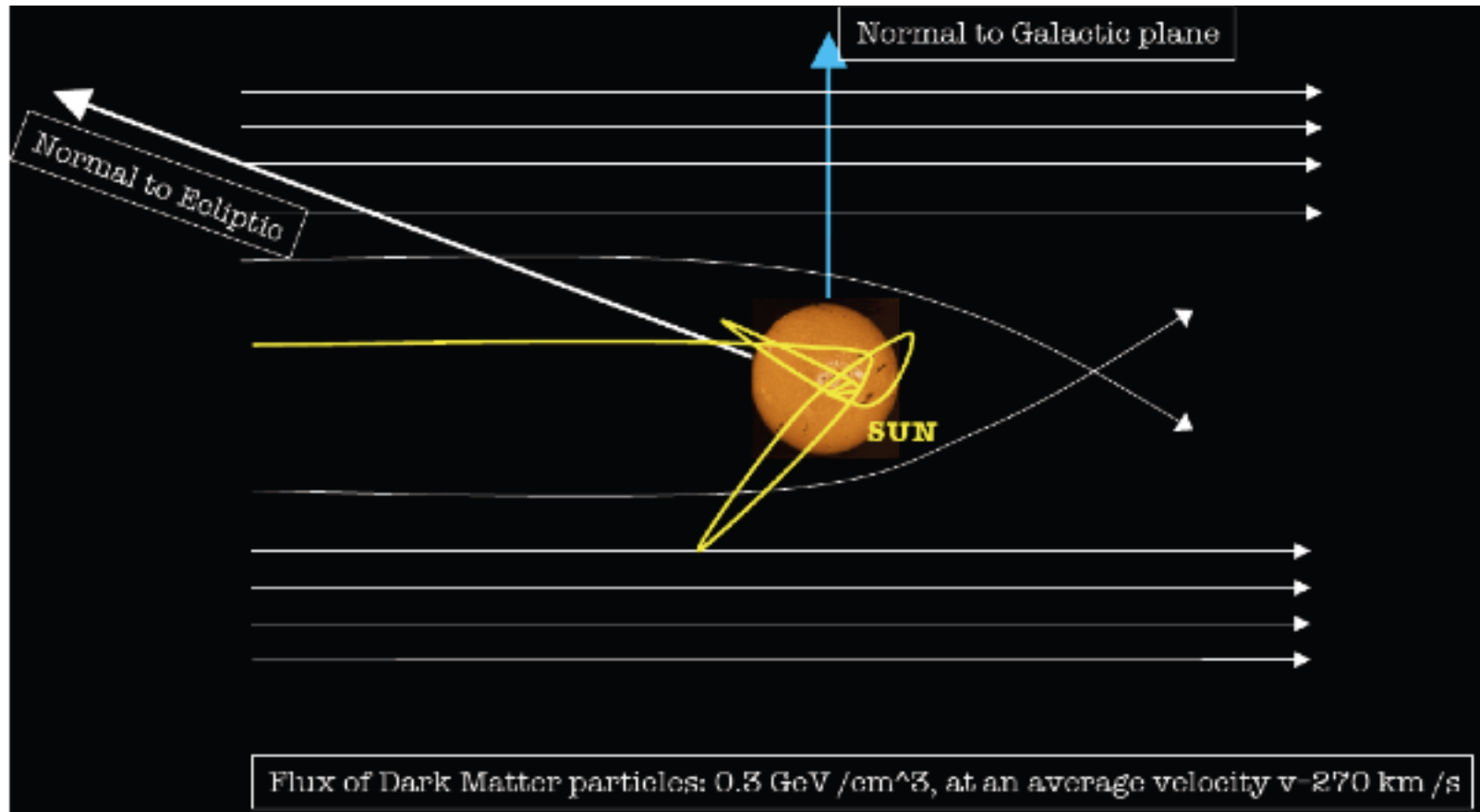
Direkte observation af mørkt stof - III

En mørk sol!

'A heart of darkness' New Scientist

'Dark matter may be building up inside the Sun' Wired magazine

(med S. Sarkar)



Opsummering

- Vi har *meget stærke* astrofysiske indicier for mørkt stofs eksistens
- Det er både muligt, og velmotiveret, at oprindelsen af masse, dvs *Higgs-mekanismen*, og *oprindelsen af mørkt stof* stammer fra den samme type ny fysik (nye partikler og/eller ny(e) naturkræfter)
- Der er en intens teoretisk og eksperimentel forskningsindsats i jagten på svarene.
- Stærk dansk indsats: CP3-Origins er et af de mest aktive centre indenfor forskning i modeller af mørkt stof baseret på nye stærke vekselvirkinger. Dark center I København er dedikeret til bedre at forstå astrofysiske konsekvenser af DM.