

# Powerpoint version med medie filer?

- Skriv til [beck@nbi.dk](mailto:beck@nbi.dk)



Jagten på universets gåder...

Rejsen til det ukendte...

Standardmodellens herligheder

“Og dens vitale mangler”

Partikelfysikkens Hvorfor? - Hvordan? - Hvad?

Jørgen Beck Hansen  
Niels Bohr Institutet  
November 2023

# Hvor kommer det hele fra ?



# Begrebet "Grundelementer"

I Aristoteles verdenbillede var der 4 grundelementer



ELEMENTS			
Hydrogen	1	Strontian	86
Azote	5	Barytes	68
Carbon	46	Iron	56
Oxygen	7	Zinc	58
Phosphorus	9	Copper	58
Sulphur	13	Lead	90
Magnesia	20	Silver	190
Lime	28	Gold	190
Soda	28	Platina	190
Potash	48	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.).

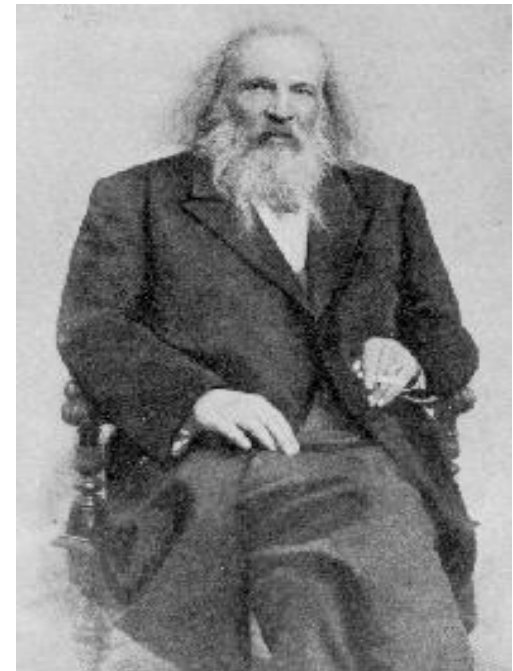
**Periodic Table of the Elements**

1	IA																2	0															
1	H																	He															
2	Li	IIA																Ne															
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar															
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr															
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe															
6	Cs	Ba	* La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn															
7	Fr	Ra	+ Ac	Rf	Ha	106	107	108	109	110																							

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

Det Periodiske System:  
Mendeleev (1869)



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.

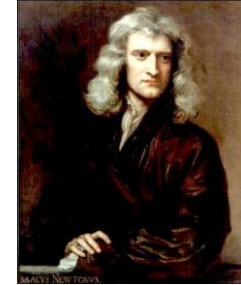


Navn	Demokritos
Født	ca. 460 f.k.
Død	ca. 370 f.k.

"Men: Kan stof deles uendeligt?"



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

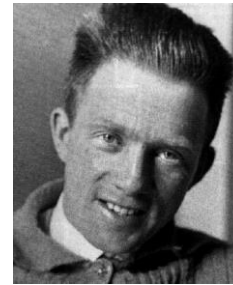


Klassisk fysik (1687)

Småt

hurtigt

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



Kvantemekanik (1913)



Speciel Relativitetsteori (1905)

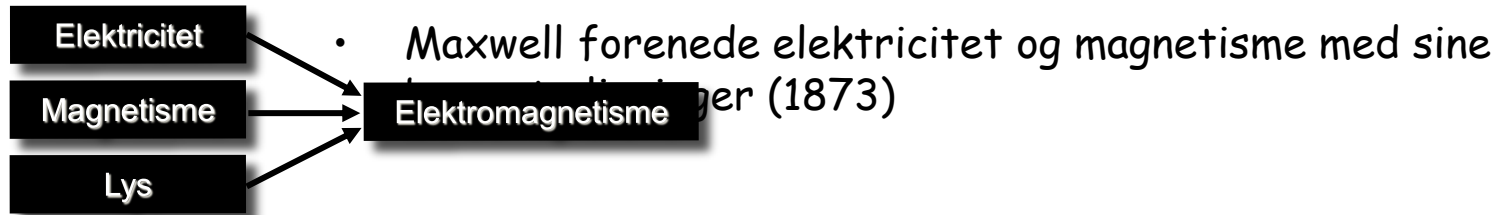
Teorien er formuleret indenfor rammerne af **Relativistisk Kvante-Felt-Teori**



Kvante-Felt-Teori (1940's)

# Partikelfysikkens paradigme: Foreningen af teorier

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



• Dirac introducerede elektron-teori (1926)

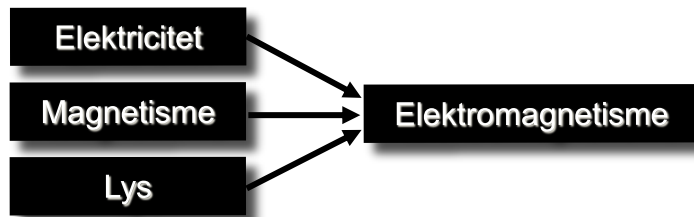
• Teoretisk arbejde af Feynman, Schwinger og Tomonga resulterede i en teori for elektroner og fotoner med meget præcise forudsigelser

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ &= \rho / \epsilon_0 \\ &= 0 \end{aligned}$$



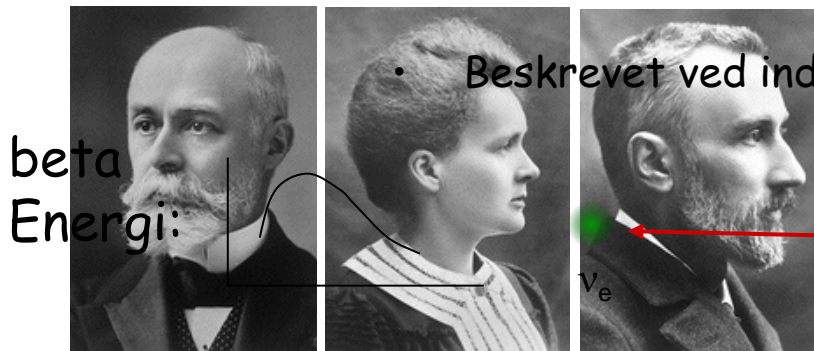
# Partikelfysikkens paradigme: Foreningen af teorier

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

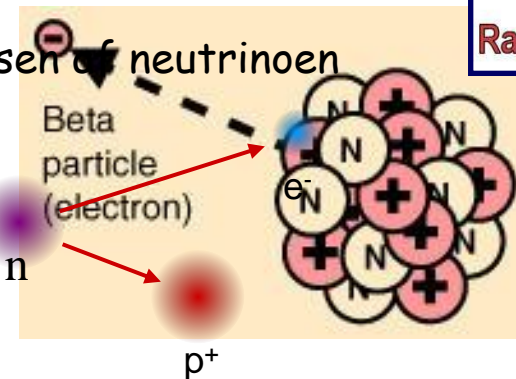


Beta henfald  
Neutrino

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



- Beskrevet ved indførelsen af neutrinoen



# Interlude: Neutrinoens fødsel



Wolfgang Pauli

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der  
Gesamvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut  
der Eidg. Technischen Hochschule  
Zürich

Zürich, 4. Des. 1930  
Ulrichstrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst  
anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich  
angesichts der "falschen" Statistik der  $N$ - und  $Li-6$  Kerne, sowie  
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg  
verfallen um den "Wechselssatz" (1) der Statistik und den Energiesatz  
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale  
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,  
welche den Spin  $1/2$  haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und  
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie  
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen  
müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und  
jedenfalls nicht grösser als  $0,01$  Protonenmasse. - Das kontinuierliche  
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim  
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert  
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron  
konstant ist.

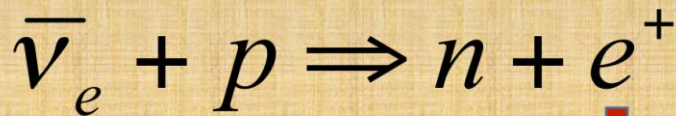
# Opdagelsen af neutrinoen

1956: discovery of the neutrino

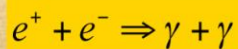
Det tog 26 år at opdage neutrinoen. Cowan og Reines anbragte en detektor tæt på en reaktor i South Carolina og observerede det inverse beta henfald (få hændelser/time) Reaktoren gav

$10^{19}$  neutrinos/sec

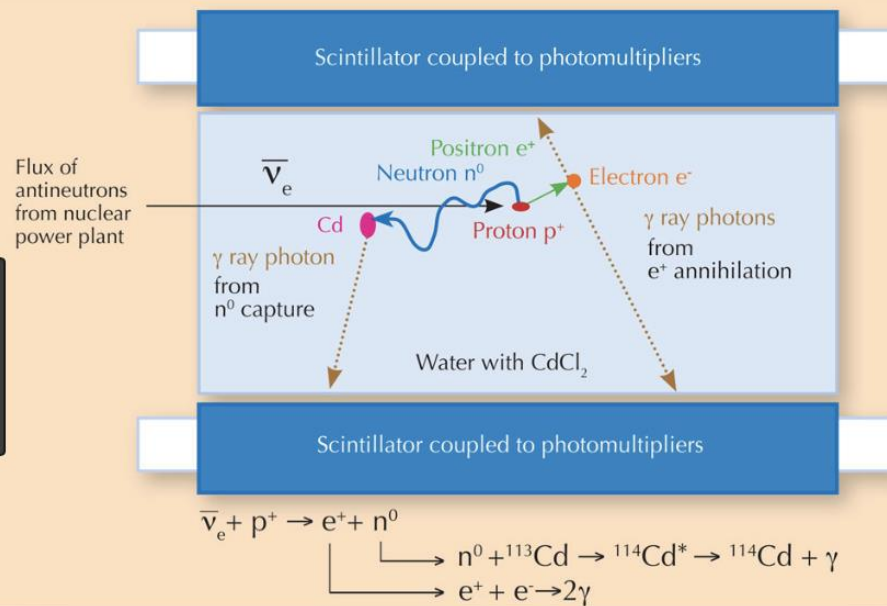
Neutrinoen eksisterer!



5  $\mu$ sekund forsinkelse



n-capture by cadmium





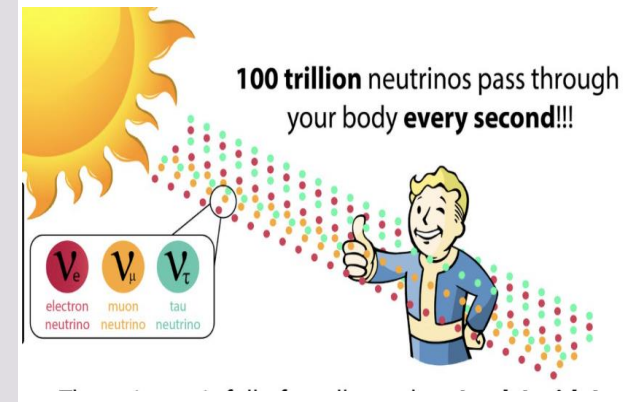
# Neutrinoen

- Neutrinoer er **fundamentale partikler**
- Neutrinoer er **Spøgelses-partikler**
- Trillions ( $10^{12}$ ) af neutrinoer passserer per sekund gennem din krop I gennem hele livet! De kommer fra solen
- Neutrinoer kræver et **lys-year af bly** ( $\sim 10^{13}$  km) for at kunne stoppes med 50% chance
- Der er **en milliard neutrinoer for hvert atom i Universet**. Der er  $\sim 3 \cdot 10^8$  neutrinoer per kubik meter - "relic neutrinos"
- **Det enorme antal må betyde at de er vigtige.....**  
**Men de er svære at fange**



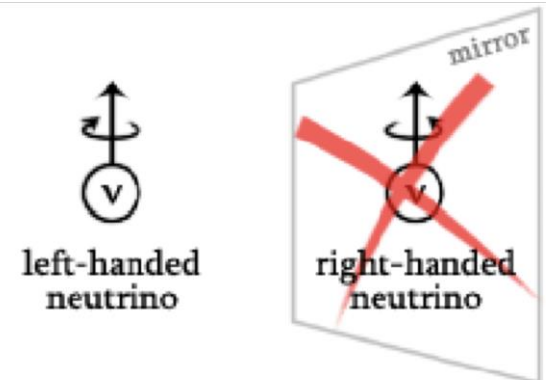
**FACT:** about 65 million neutrinos pass through your thumbnail every second.

Learn Something  
New Every Day  
LSNED.com



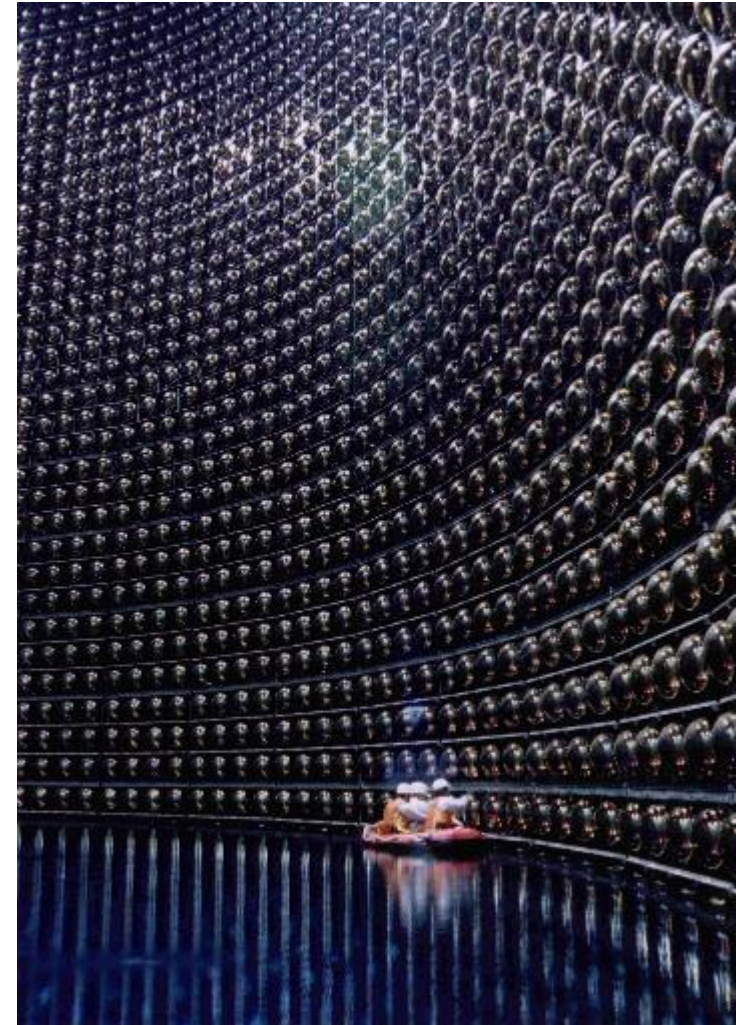
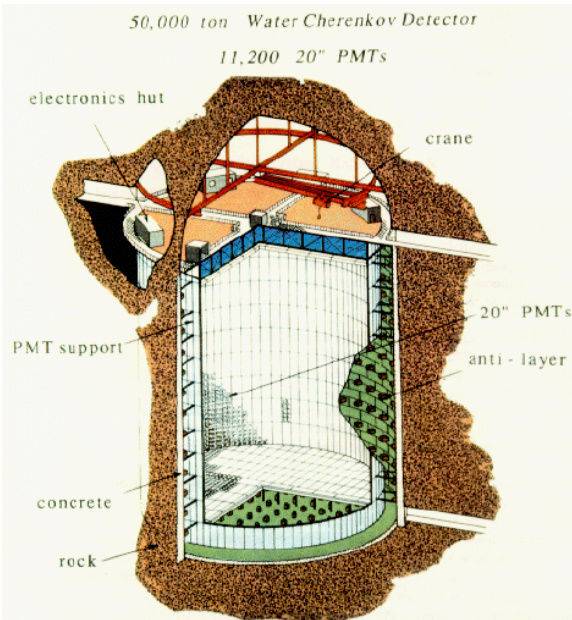
**100 trillion** neutrinos pass through your body **every second!!!**

$\nu_e$   $\nu_\mu$   $\nu_\tau$   
electron neutrino muon neutrino tau neutrino

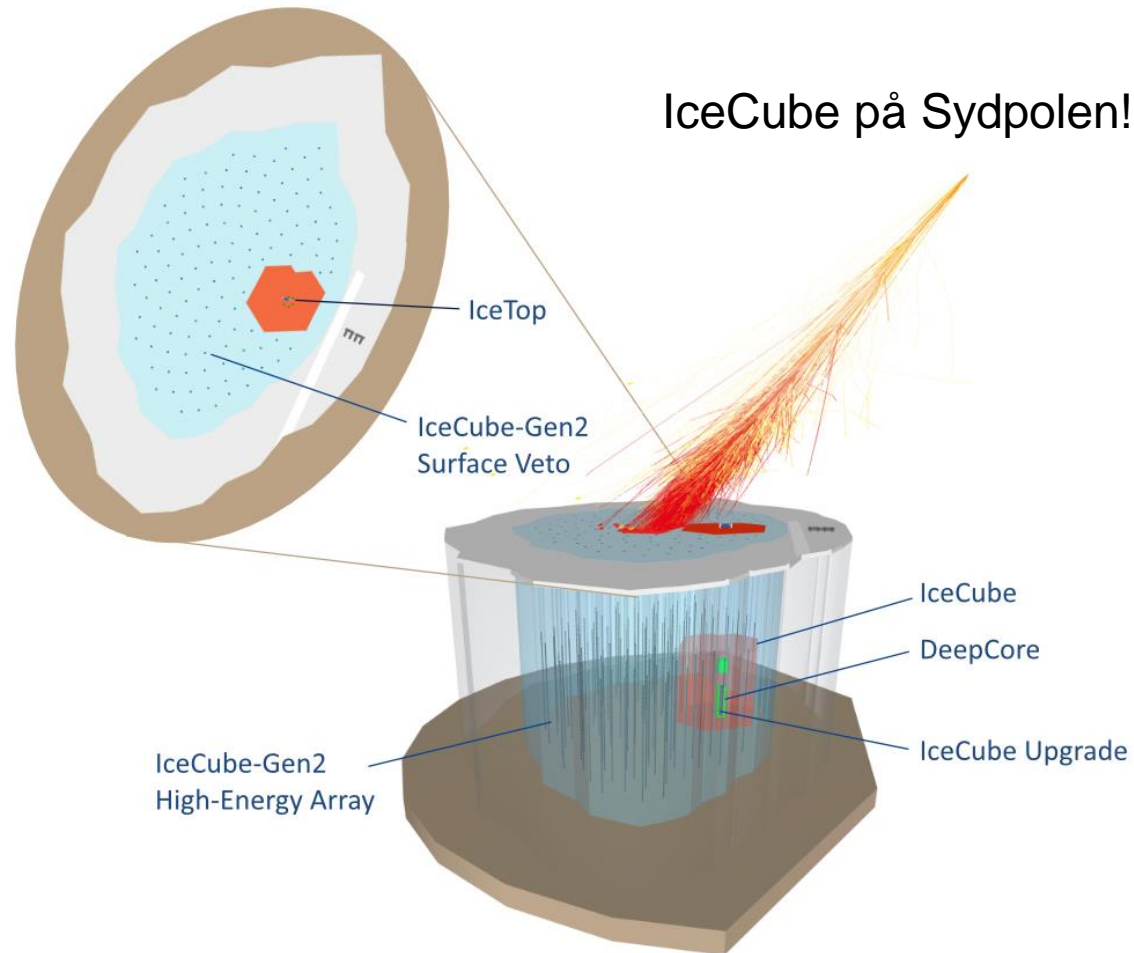


# Kunsten af "fange" den flygtige neutrino!

- Kamiokande og Super-Kamiokande  
(Masatoshi Koshiba, Rochester PhD 1955, Nobel Laureate 2002)



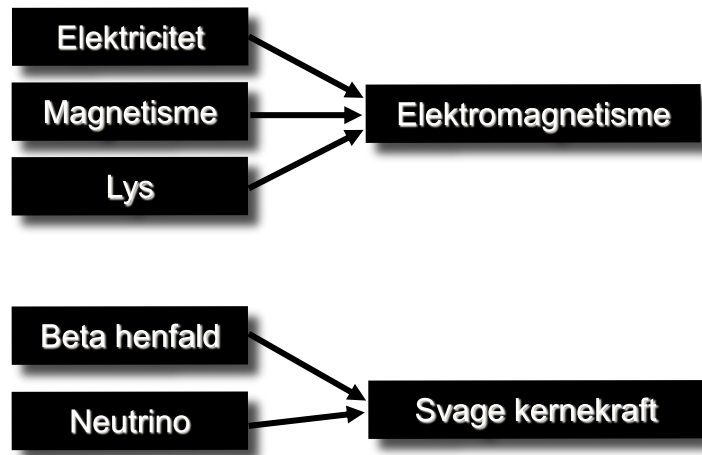
# Verden største neutrino observatorium?





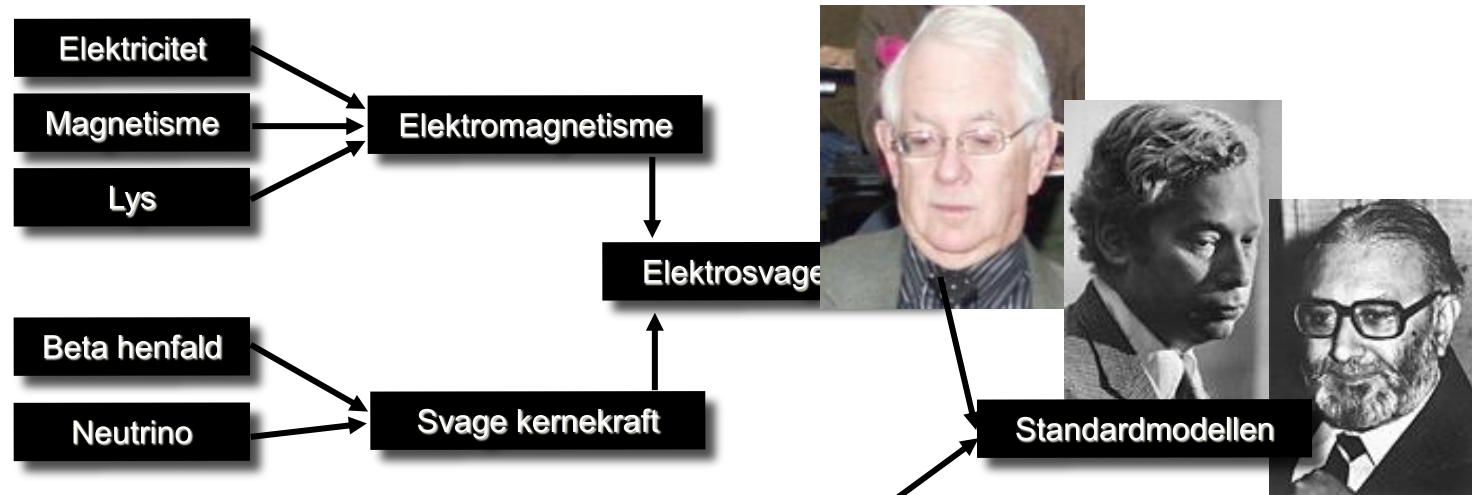
# Partikelfysikkens paradigme: Foreningen af teorier

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



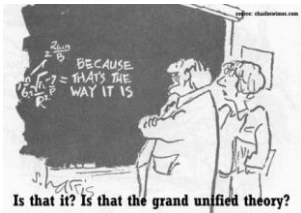
# Partikelfysikkens paradigme: Foreningen af teorier

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



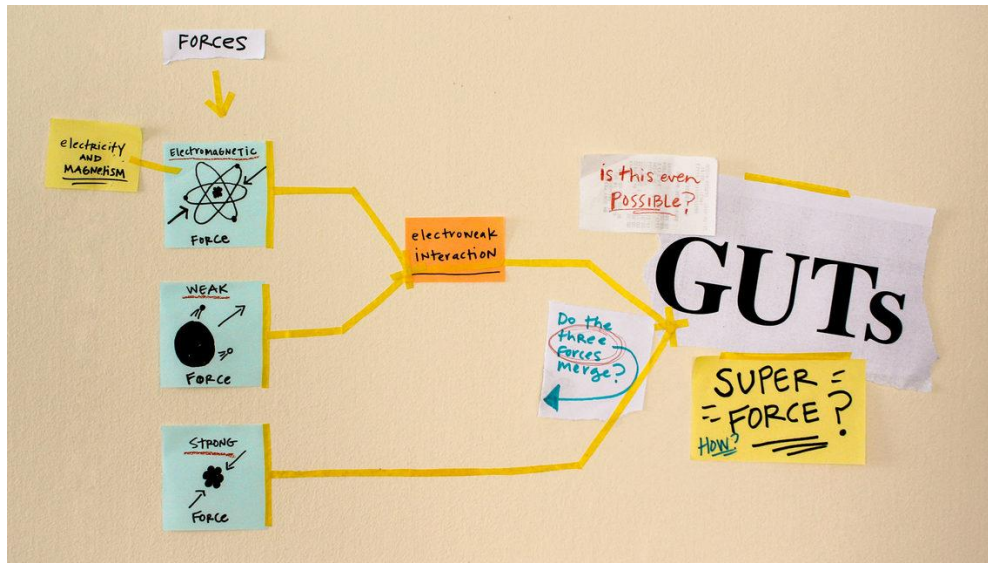
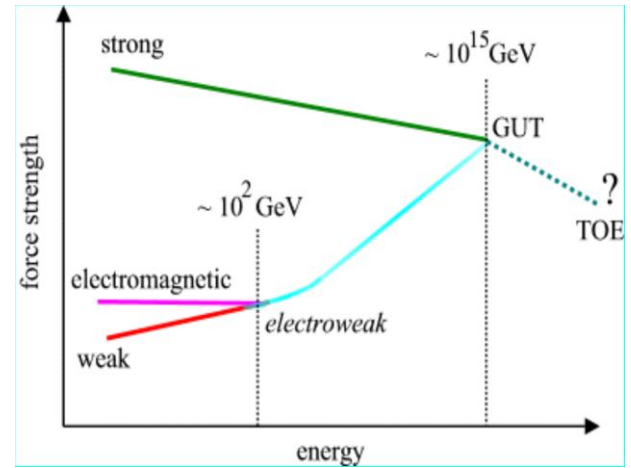
Weinberg og Salam (1967/1968) beskrev hvorledes elektromagnetisme og stærke kernekraft kunne forenes i en teori, hvor den svage kernekraft blev formidlet af tre partikler:  $W^+$ ,  $W^-$  og  $Z^0$

- Disse partikler blev observeret ved CERN i 1983



# No GUT, no glory

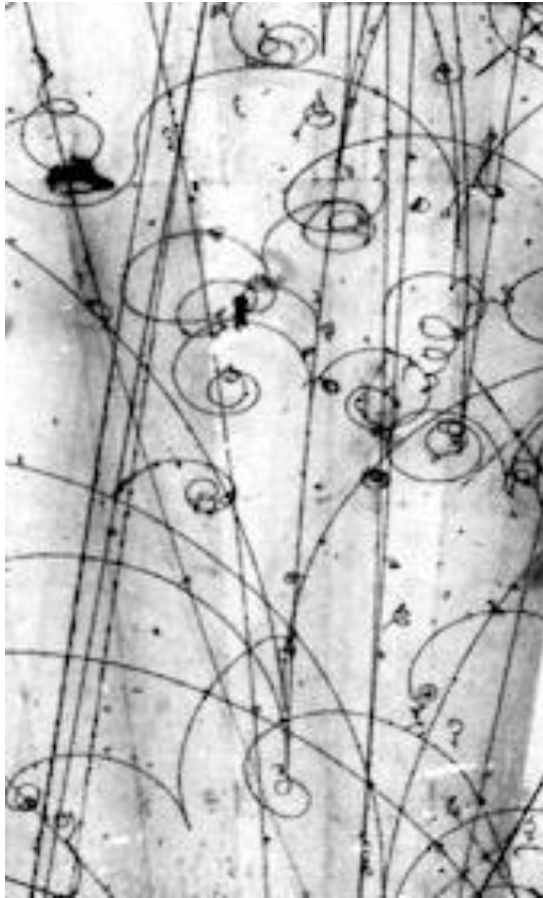
- Kræfternes styrkeforhold er ikke konstant!
- Antyder at der findes en **forenet kraft** som virkede umiddelbart efter Universets fødsel:



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

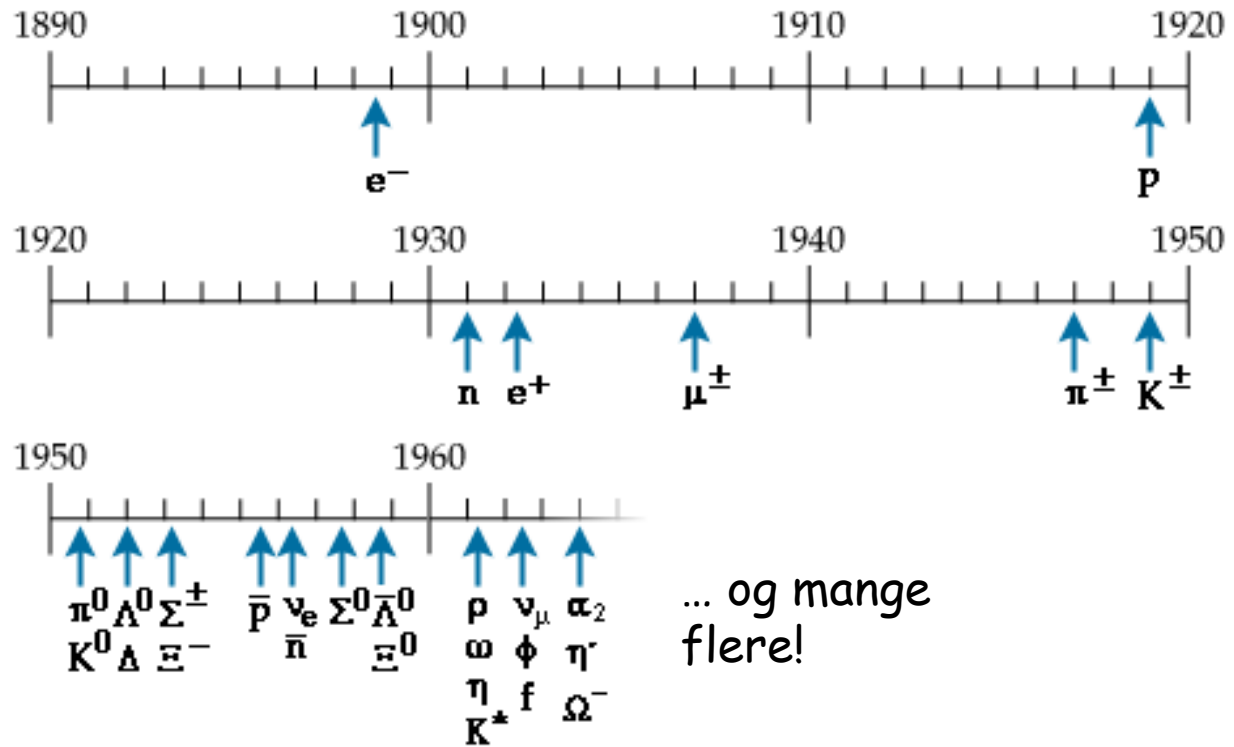


# Nye Typer af Stof...



Fermilab: Bubble Chamber Photo

Et væld af partikler er opdaget igennem tiden...



Mere end 200 partikler...

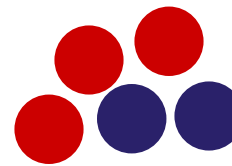
Der må være et system...

# Standardmodellen: Det nye periodiske system

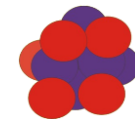
Vores forståelse af universets opbygning og virkemåde på den mindste skala er idag samlet i partikelfysikkens Standardmodel

Kvarker	u	c	t
	d	s	b
Leptoner	e	$\mu$	$\tau$
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
Stof partikler (fermioner - spin $\frac{1}{2}$ )			

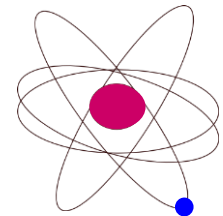
Atomer består af protoner, neutroner og elektroner



Protoner og neutroner

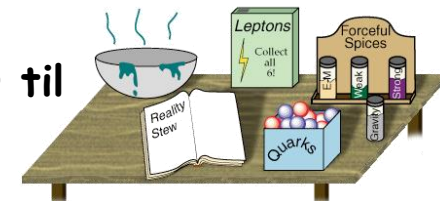


Atomkerne



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 ( $L_\mu$ )
- Tau(on)-leptontal ( $L_\tau$ )



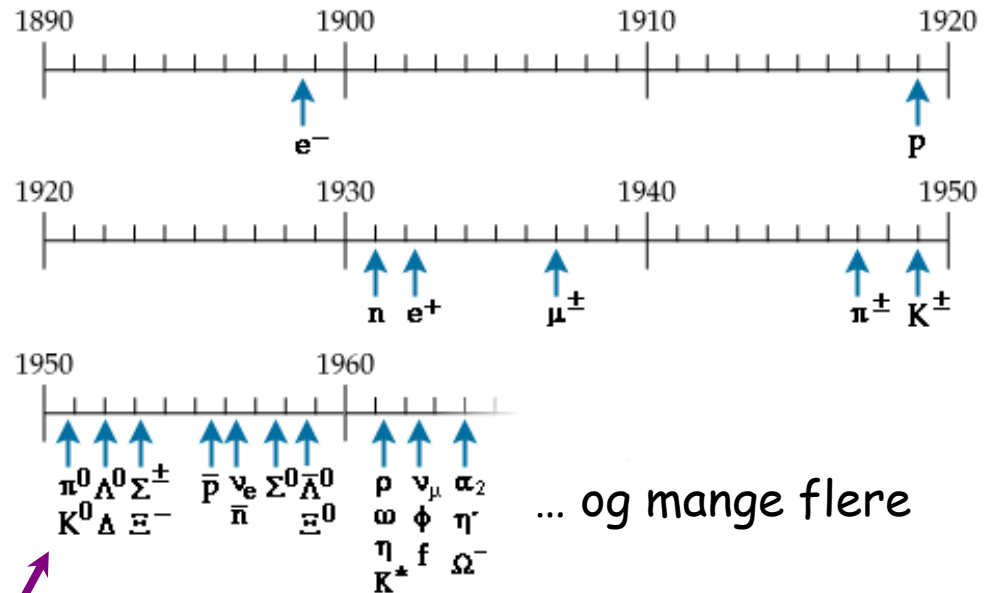
**Nul** for kvarker

- 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

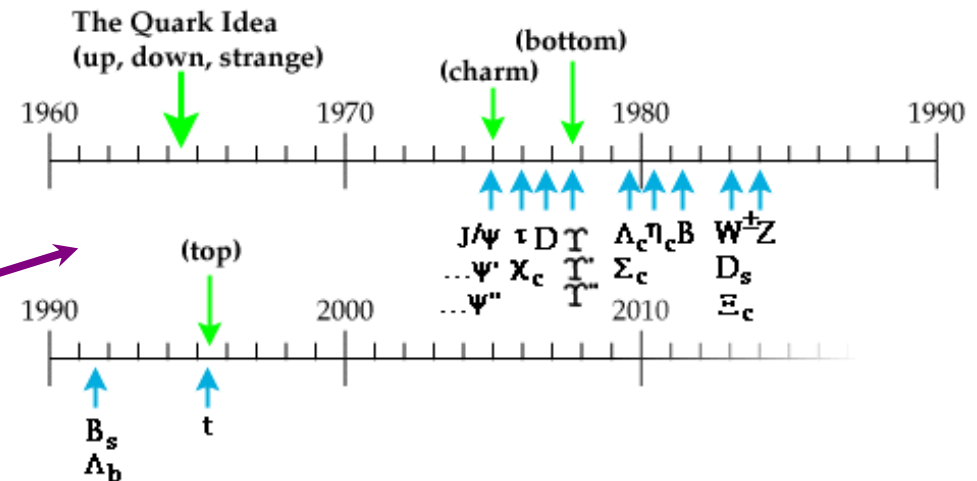
- Kollisioner mellem elektroner og kerner i kosmiske stråler og ved partikel-acceleratorer startende i 1930'erne førte til opdagelsen af mange nye partikler



- Nogle var forudsagt; mange andre var uventede

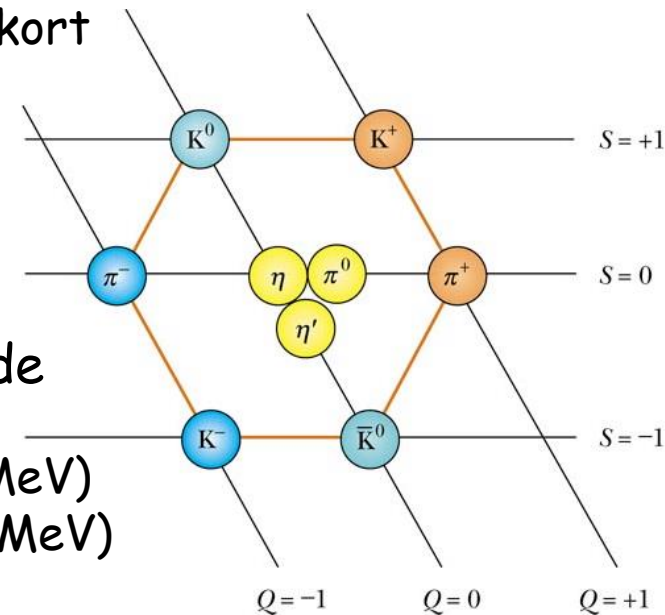
- Først regnede man dem alle for elementære

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



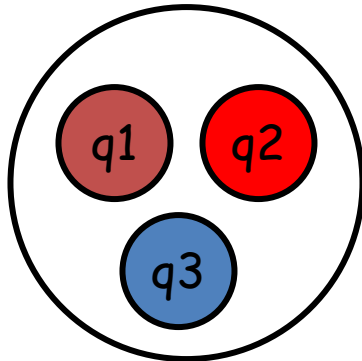
# Kvarkmodellen

- 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:  $\pi^+$ (140 MeV)  $\pi^-$ (140 MeV)  $\pi^0$ (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

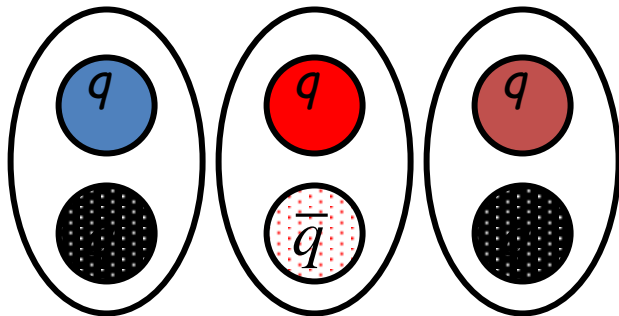
To klasser af hadroner tilladt i kvarkmodellen:



## BARYONER

Eksempler:

$$\text{proton} \equiv uud \quad ; \quad \text{neutron} \equiv udd$$



## 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

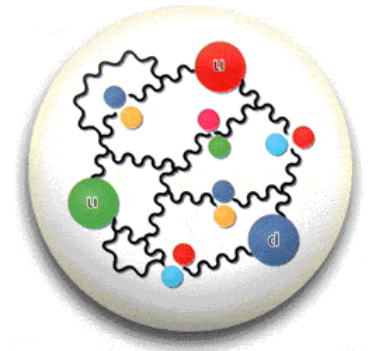
# Farveladning - kvantetal

- For at passe med kvark modellen, er det nødvendigt med tre forskellige farveladninger, benævnt:

Rød, Grøn og Blå

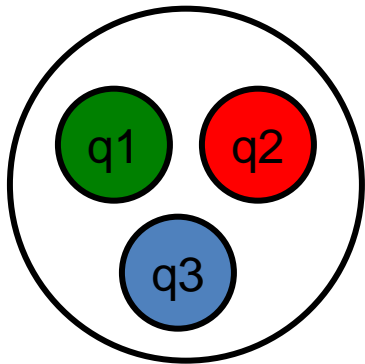
- Navnene angiver matematiske frihedsgrader og har INTET med synlige farver at gøre (men drager nytte af analogier fra farvelæren)
- Kvarker er bundet sammen i en proton (hadron), ved at udveksle en voldsom masse gluoner og skaber derved et farvefelt stærkt nok til at overvinde den elektriske frastødning mellem kvarkerne

“Protonen består af en gigantisk suppe af gluoner og ekstra (anti)-kvarker”



# Tilbage til kvarkmodellen...

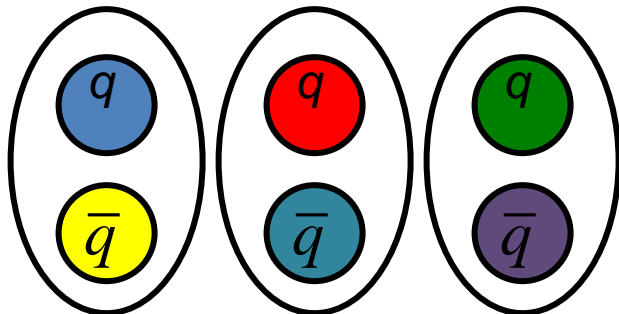
Den stærke kraft - kraften mellem farveladninger - tillader kun "farveløse" frie partikler:



**BARYONER**

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

**MESONER**

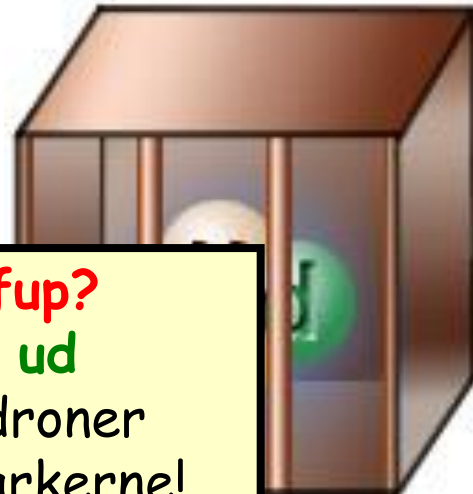


GRØN + ANTIGRØN = "FARVELØS"  
RØD + ANTI RØD = "FARVELØS"  
BLÅ + ANTI BLÅ = "FARVELØS"

Alle hadroner opdaget til dags dato er farveløse..

# Kvarkernes evige fangeskab

- Den stærke kraft bliver stærkere ved store afstande
- Partikler med farve-ladning kan derfor ikke isoleres

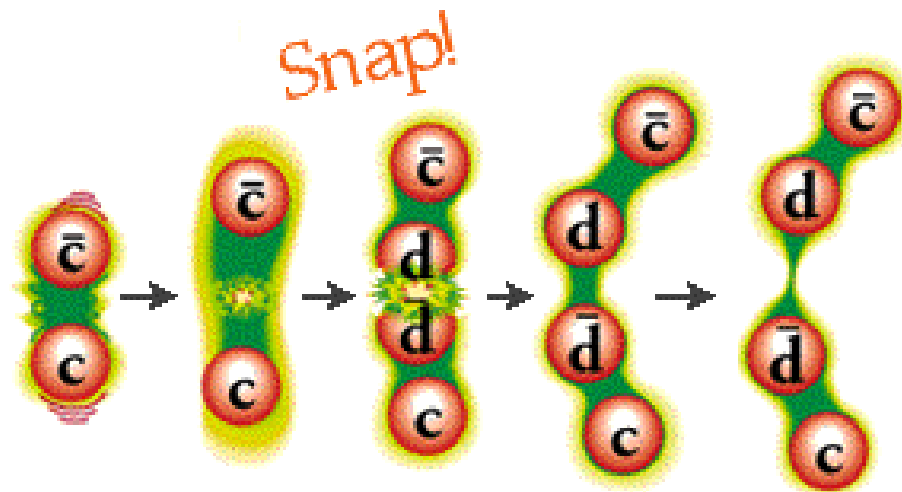


**Ikke se en kvark? Men er det så ikke fup?**

Nej - det er **eksperimentelt bekræftet ud over enhver tvivl** at protonen og andre hadroner består af dele med egenskaber magen til kvarkerne!  
Ydermere viser eksperimenterne at der er **3** farver!

**Derfor**




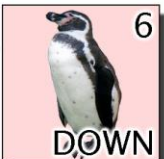





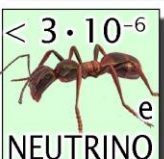
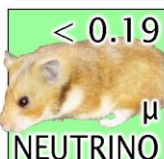

- Kvark og antikvark har samme masse og spin, men modsat ladning
- Kvark og antikvark kan binde sig sammen til hadroner
- Gluoner er bærere af den stærke kraft
- Hvis en kvark trækkes væk fra sin nabo, strækkes farve-feltet mellem de to
- Til sidst bliver energien i farvefeltet så stor at nye kvark-antikvark-par dannes i feltet





# Standardmodellen: Hvad holder det sammen?

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

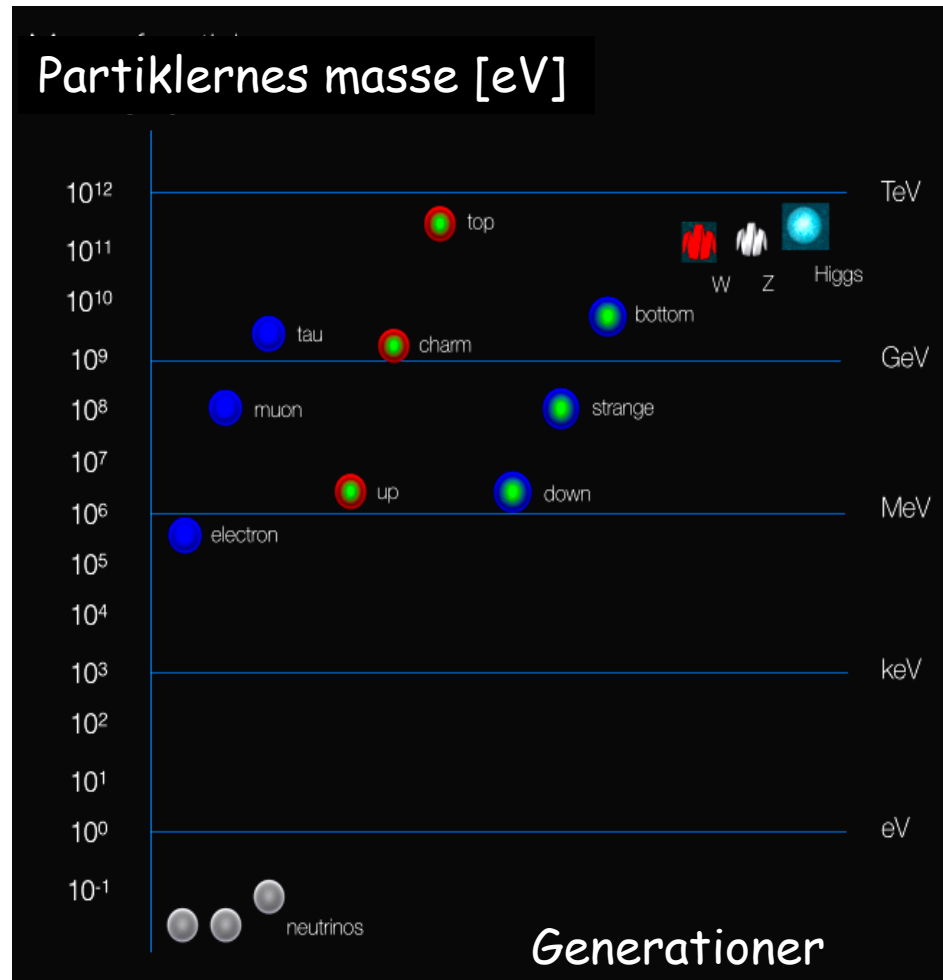
Kvarker	 2.75 UP	 1300 CHARM	 178000 TOP
	 6 DOWN	 110 STRANGE	 4500 BOTTOM
Leptoner	 0.511 ELECTRON	 105.7 MUON	 1777 TAU
	 $< 3 \cdot 10^{-6}$ NEUTRINO $e$	 $< 0.19$ NEUTRINO $\mu$	 $< 18.2$ NEUTRINO $\tau$
	Stof partikler (fermioner - spin $\frac{1}{2}$ )		



- 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

$$\Delta x = \hbar c / M c^2$$

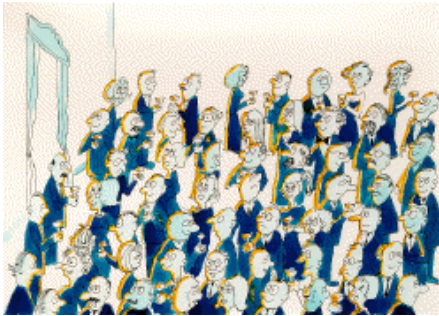
# Men hvad bestemmer partiklernes specifikke masse?



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

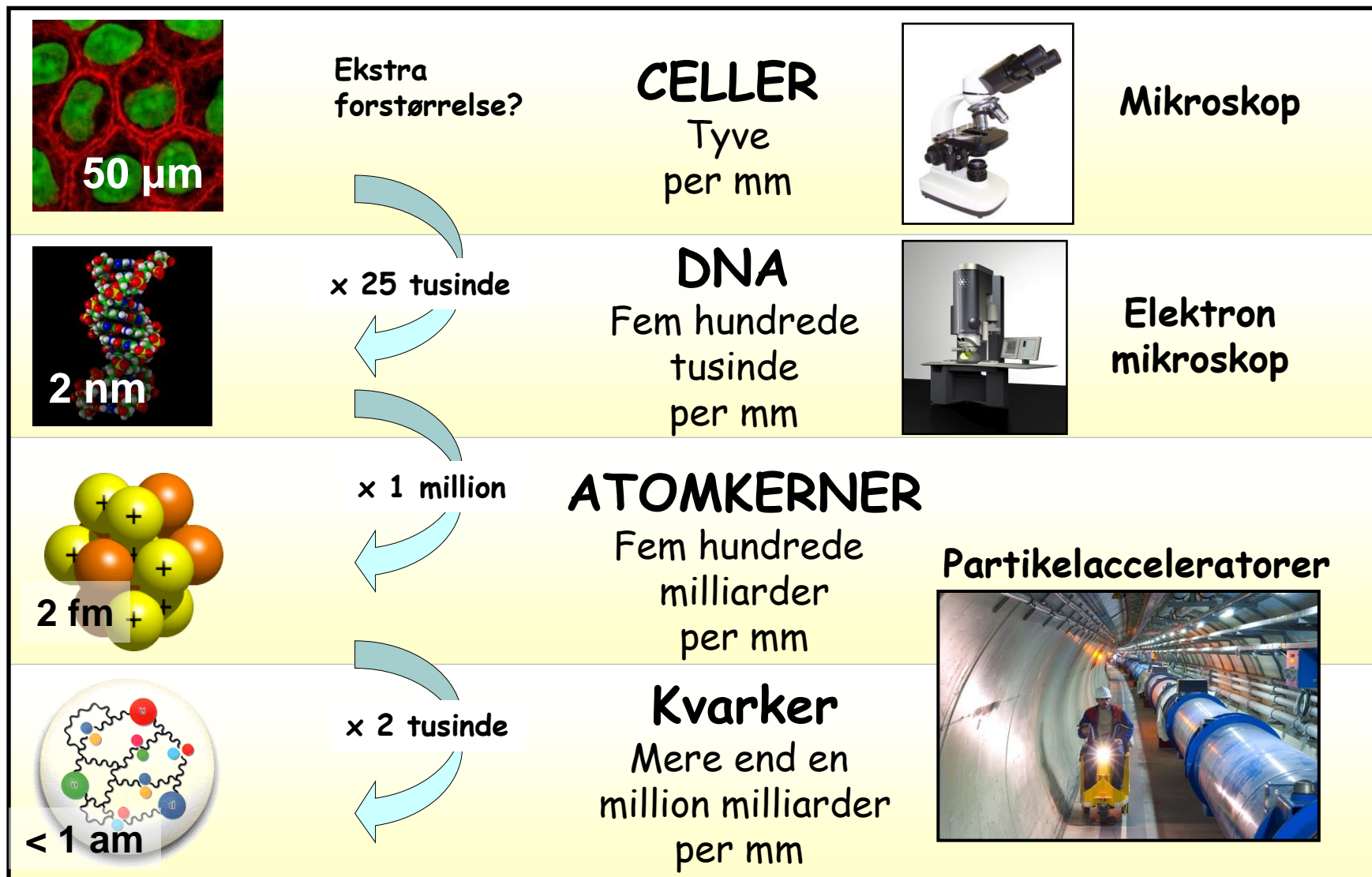


Folk stimler sammen om ham, og han får vanskeligere ved at komme frem; han har fået større masse p.g.a. vekselvirkning med omgivelserne



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

# Naturens mindste byggestene



Partikelfysik er (NANO)<sup>2</sup>=ATTO-fysik!



# 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 qu  
g gl  
e ele  
m m  
n ne

det

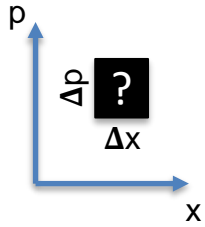
at

af

Moderne partikelfysik i en  
nøddeskal?



# Den **magiske** ligning



$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (\hbar \approx 10^{-34} \text{ Js})$$

The uncertainty  
in position...

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

...times the uncertainty  
in momentum...



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**



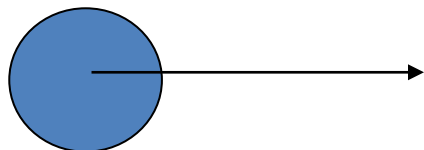
Prince de Broglie, 1892-1987

# Tak til: Louis de Broglie

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

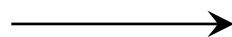
$$E = h\nu; \lambda = h/p$$

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



En fri partikel med lineær impuls  $p$

En partikel med impuls  $p$  er afbilledet som en bølge



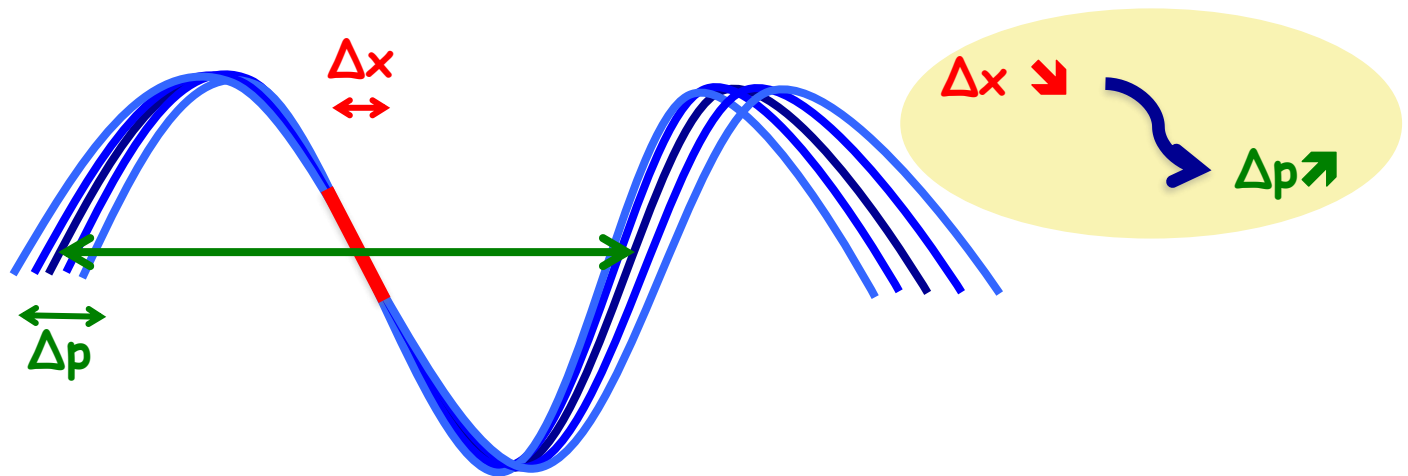
Stof-bølge med de Broglie bølgelængde

$$\lambda = h/p$$

$$\psi(x) = A \cos(kx - \omega t + \varphi)$$

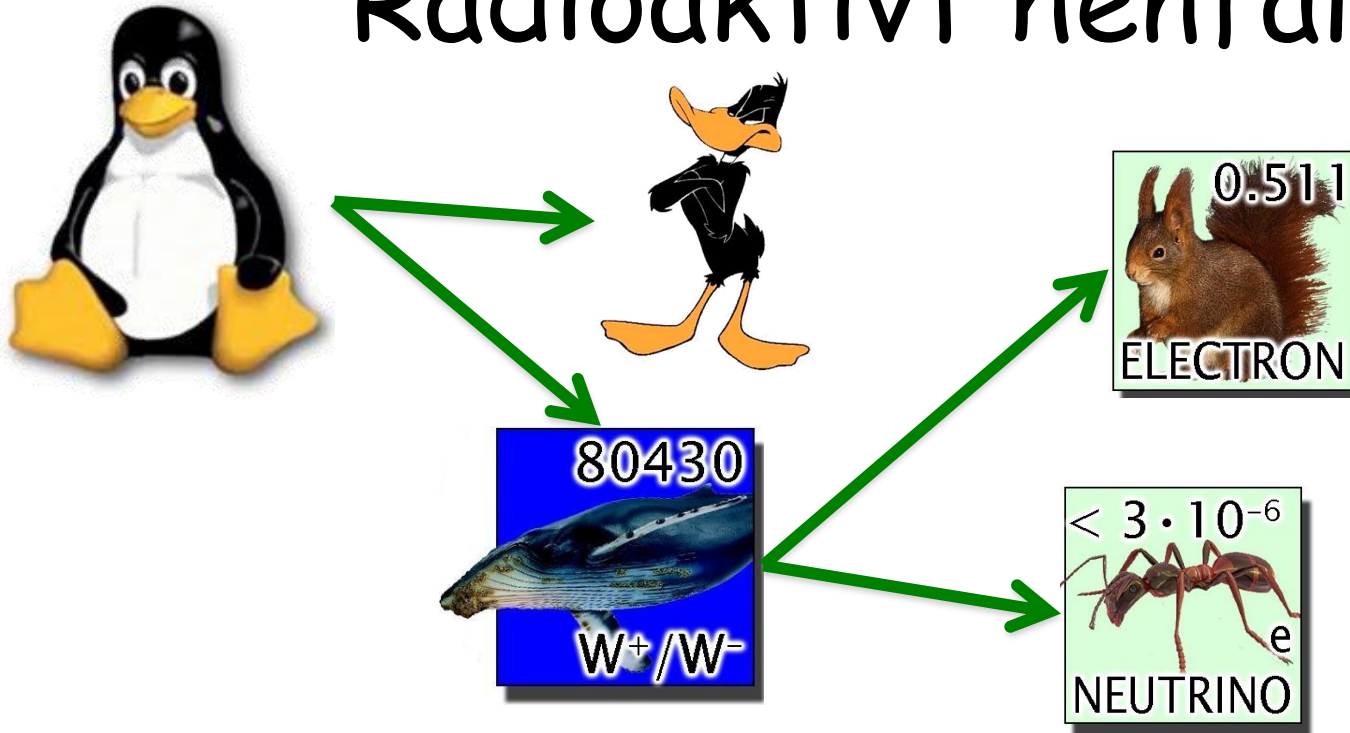
# Altså: Usikkerhedsrelation

- 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  $\Delta E$ ) bare den er på plads igen i løbet af **kort tid ( $\Delta t$ )**
- 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

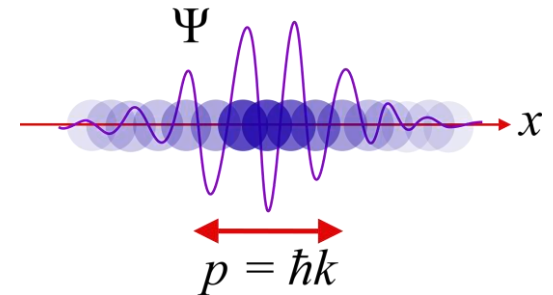
Speciel relativitetsteori:

$$E = mc^2 = \gamma m_0 c^2 \quad \text{Invariant masse (hvilemasse)}$$
$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

- Små partikler beskrives med

Kvantemekanik:

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



Anvendt speciel relativitetsteori og kvantemekanik!

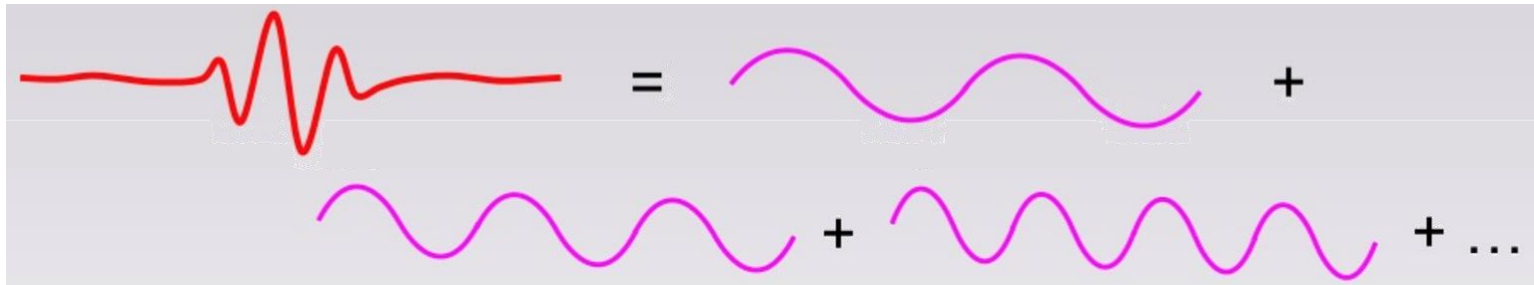
- Plus en **stor pose med nye partikler** og begreber
- Resultatet er: **Kvante-felt-teori**

# Kvante-felt-teori (QFT)

- QFT er **ikke en erstatning for kvantemekanik** - det er en formulering af kvantemekanik
- Alle konfigurationer beskrives af værdier af relativistiske felter,  **$\phi(x)$** .
- En kvantetilstand beskrives stadig ved en bølgefunktion,  **$\Psi[\phi(x)]$** .
- Eksempler: **Elektromagnetisk felt, elektron felt, top-kvark felt, ....**

# Partikler fra felter

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

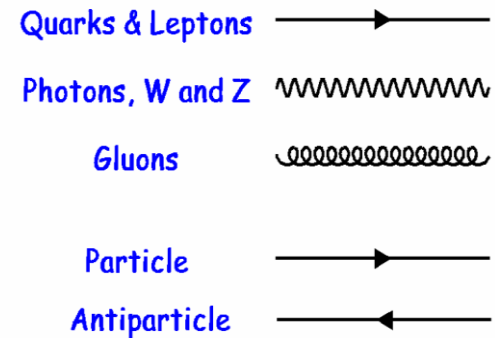
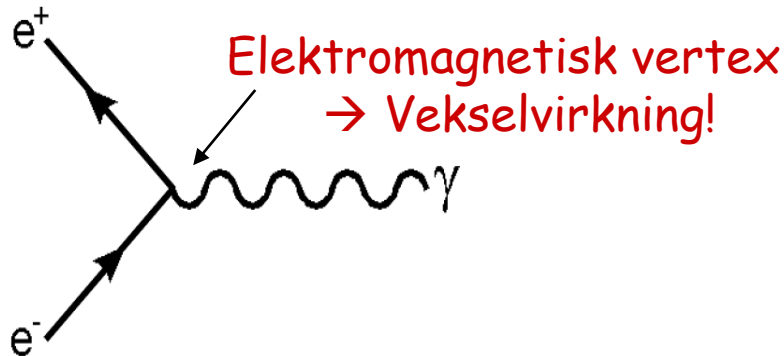


- Hver mode er en simpel bølge (fast frekvens)
- Energien er bestemt af bølgelængde og antal partikler
- Kvante-felt-teori beskriver en partikel som en sum af elementære svingninger.



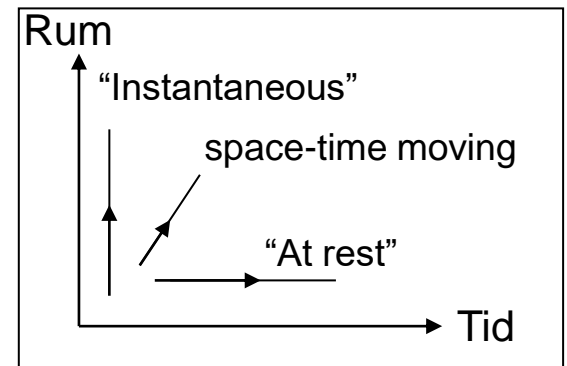
# Feynman diagrammer

- R. Feynman udviklede en diagram teknik til at repræsentere processer i partikelfysik (1940+).



- Regler og betingelser

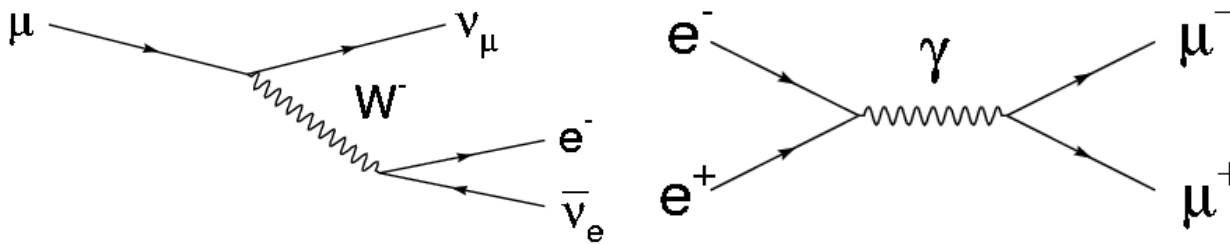
- Tid løber fra venstre mod højre
- En pil pegende mod **højre** indikerer en **partikel**
  - mod **venstre** en **antipartikel**
- Hver gruppe af partikler har en separate stil
- For hvert vertex gælder:
  - **Bevaret**: farveladning (kvarker/gluoner), elektrisk ladning, impuls, og angulær impuls
  - **Brudt**: energi ( $E^2 \neq \vec{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4$ ) (**virtuel**)



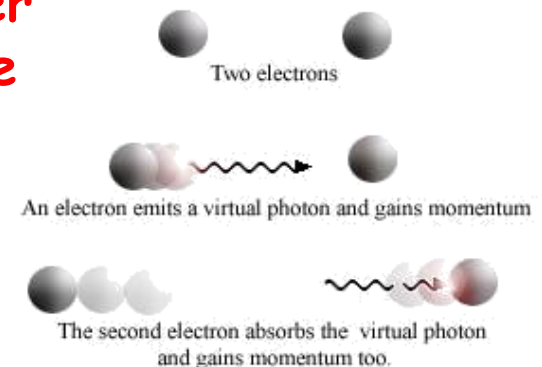
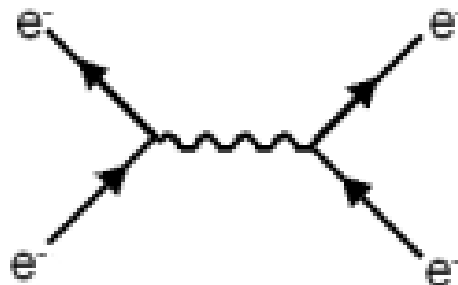
# Feynman Diagrammer

Feynman og hans diagrammer

- Feynman diagrammer er en billedlig repræsentation af
  - Sandsynligheder for partikelreaktioner
  - Et **feynman diagram angiver "Amplitude-kvadrat" / sandsynlighed** (kvantemekanik)
- Feynman diagrammer og tilhørende regler gør beregninger nemme
- Eksempler:  $\mu^- \rightarrow e^- \nu_e \bar{\nu}_\mu$  or  $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$  sammenstød.




Hver linje og knude har en streng matematisk betydning for den endelige beregning. Regler og regneteknik er for komplicerede til dette kursus!



# (Og så endelig FORMLEN! 😊)

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

+ Hidden ingredients



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

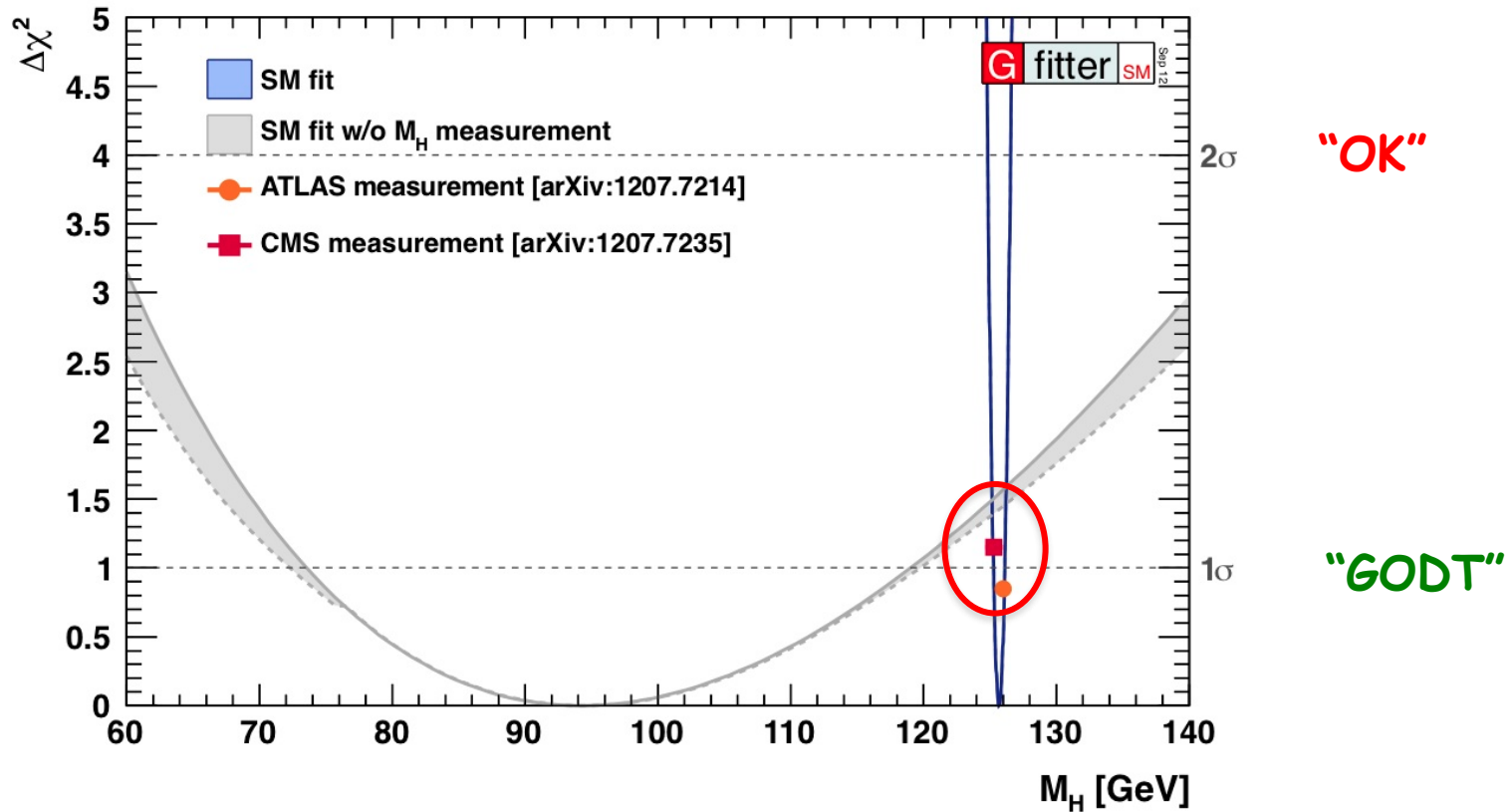
$$L = (E_{\text{kin}} - E_{\text{pot}}) / m^3 \text{ (energitæthed)}$$

- 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



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

Slut?

Higgs'en er jo fundet?

Nej! Mange fundamentale  
spørgsmål er ubesvaret...

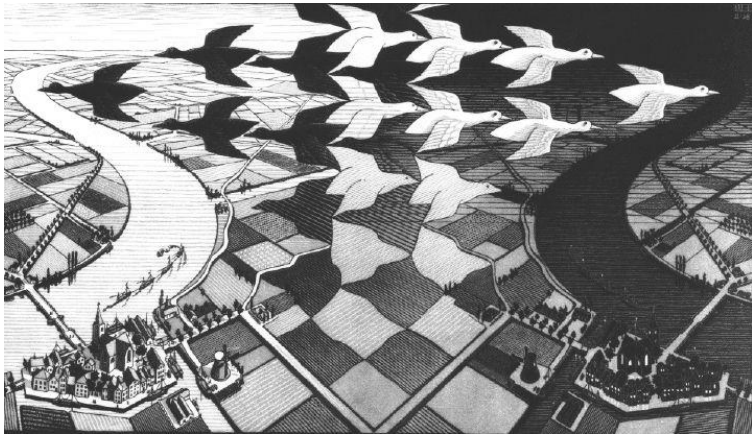
**Faktisk burde universet eller vi  
ikke eksistere!**

Problemer,

Problemer,

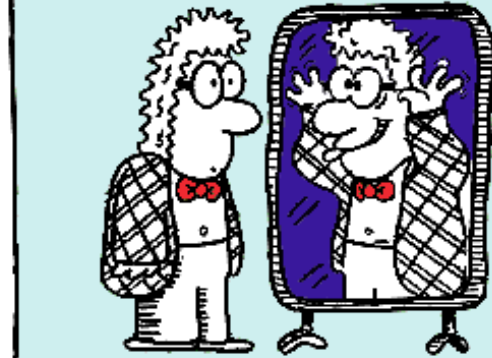
**Problemer!**

# Hvor er alt anti-stoffet?



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

*Det kosmiske spejl virkede  
tilsyneladende ikke korrekt*



Universet gemmer over en subtil  
forskell 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?

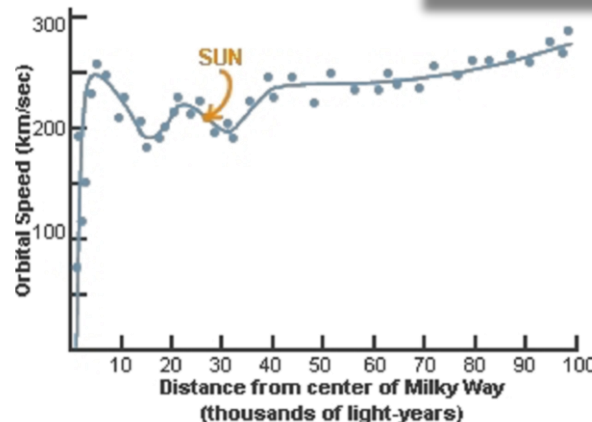
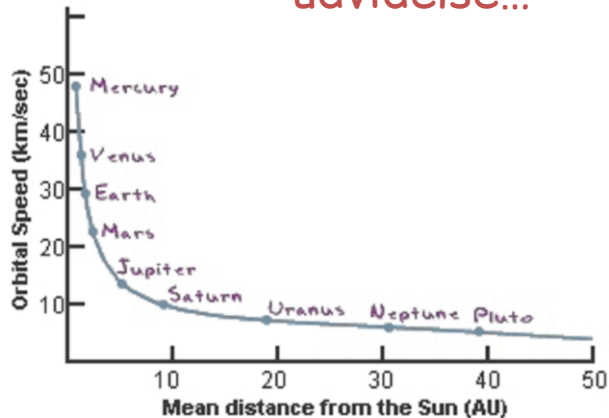
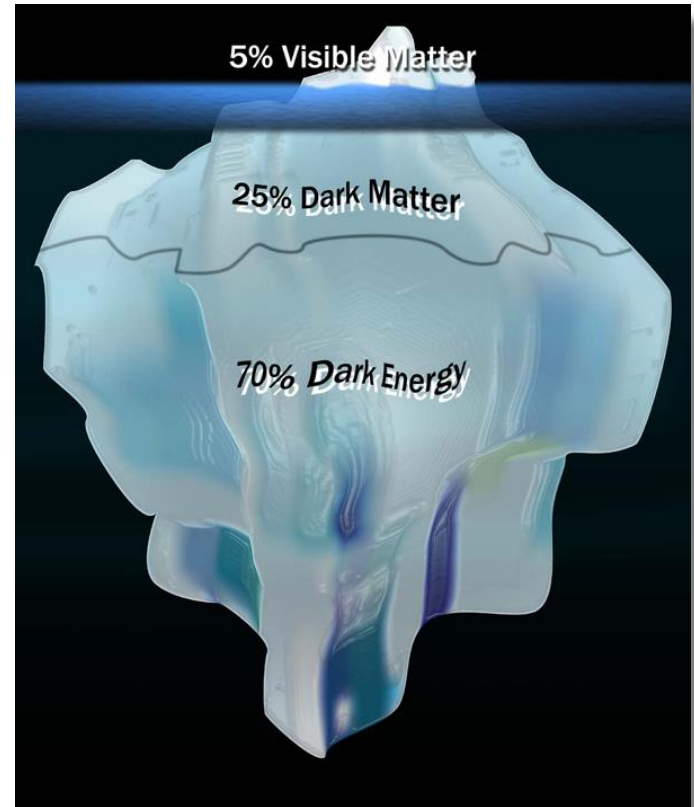
**Normalt:** Består af atomer  
Inkluderer stjerner,  
planeter, mennesker...

**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...

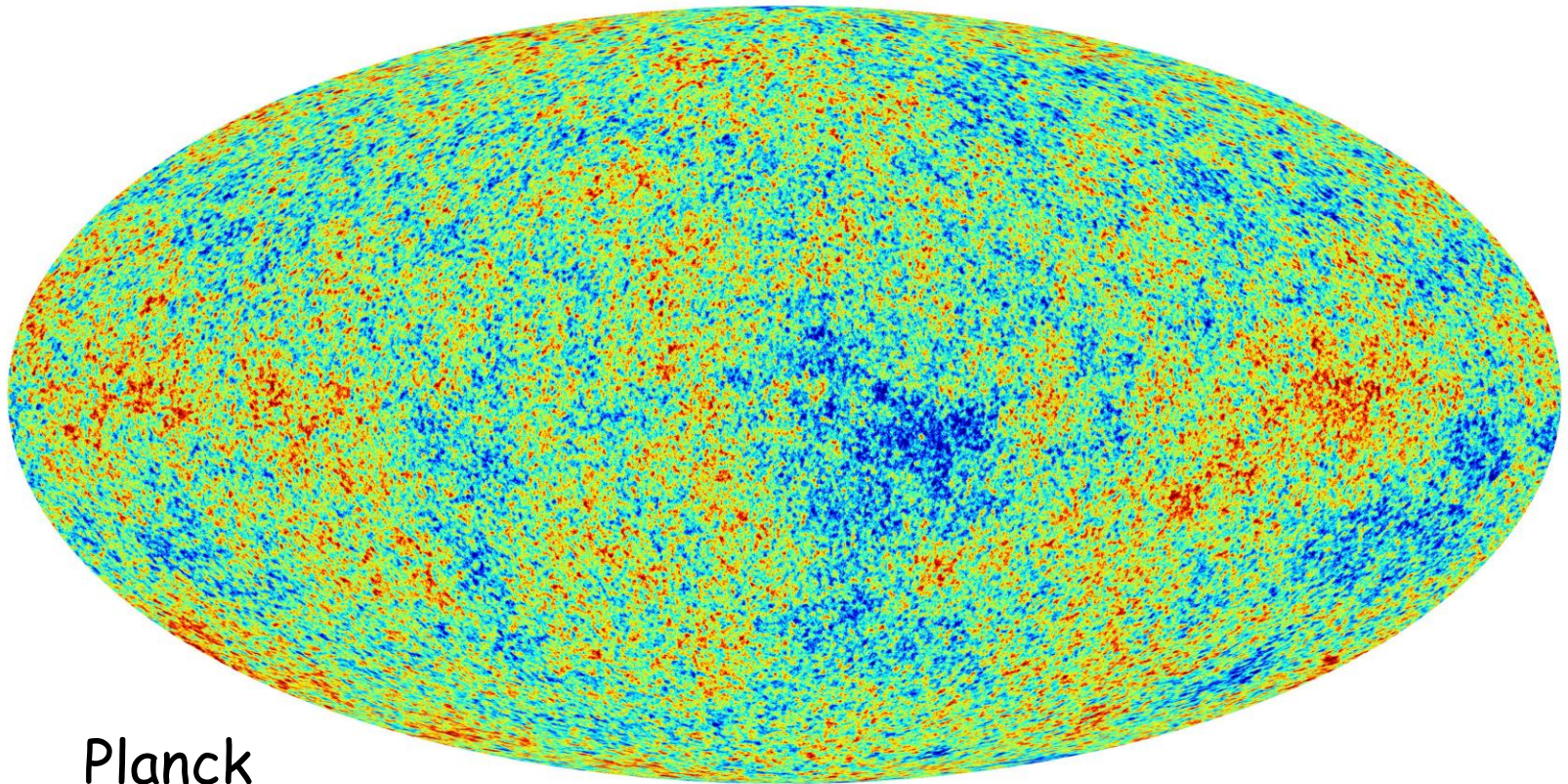




# Hvad er mørk energi?

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



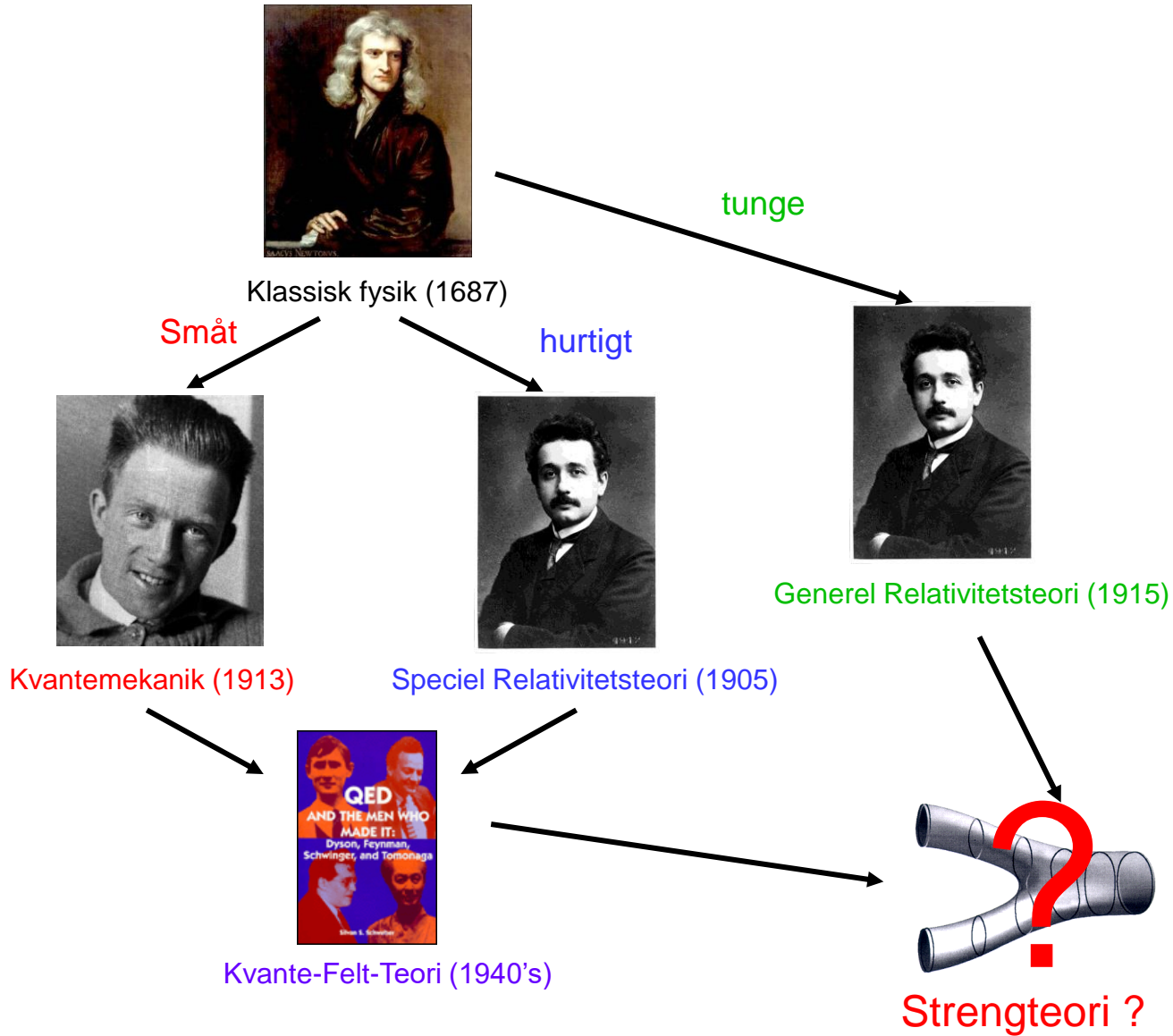








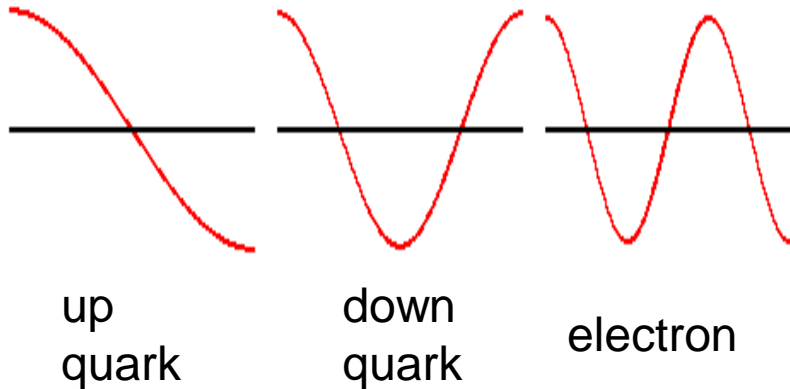
# Løsningen?



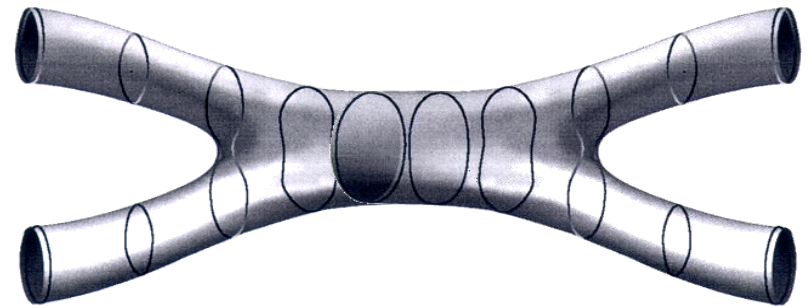


# I Strengteori er Partikler Strenge

Forskellige Vibrationer →  
Forskellige Partikler



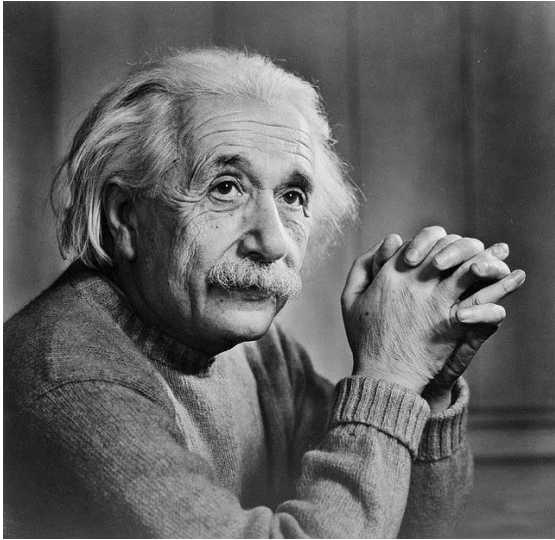
Streng sammensmeltning →  
Partikel reaktioner



Strengteori realiserer Einstein's drøm om en forenet teori

Ultimativt håber vi på at finde en teori,  
som forklarer alt uden input parametre.

# En teori om Alting: Strengteori



Einstein

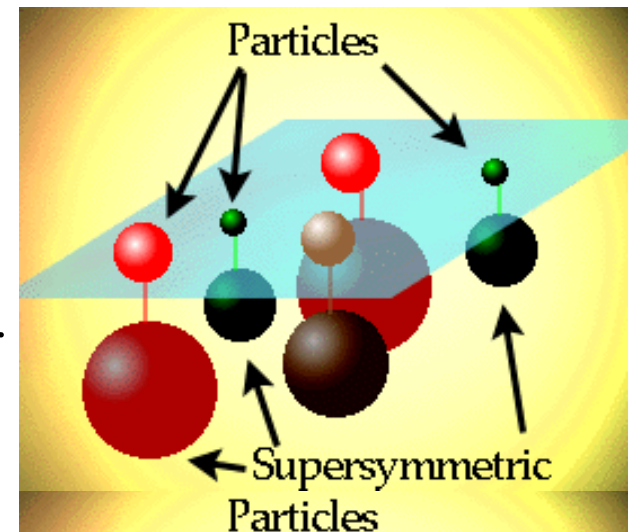
"...there are no arbitrary constants ... nature is so constituted that it is possible logically to lay down such strongly determined laws that within these laws only rationally determined constants occur (not constants, therefore, whose numerical value could be changed without destroying the theory)."



# 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

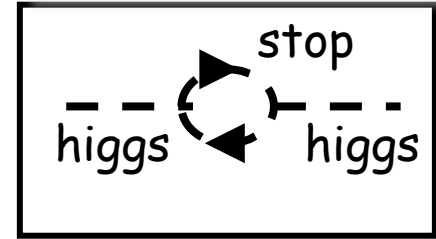
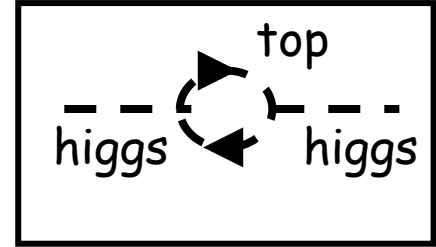
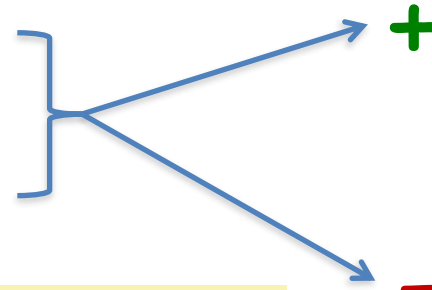


# Hvorfor Supersymmetri?

- **Higgs-partiklens masse**

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

Higgs-partiklens masse bliver nu automatisk lille



Facit:  $\delta m_H \approx 0$

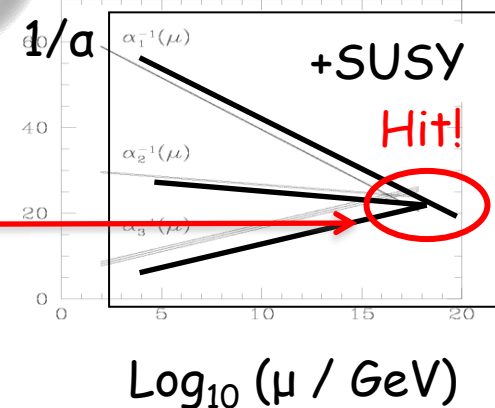
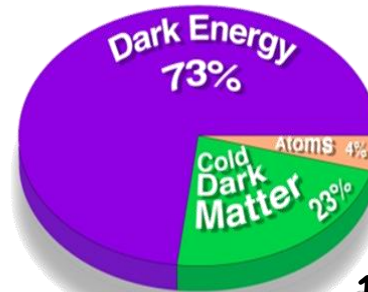
- Men spartiklerne skal veje mindre end ca. 1000 GeV

- **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



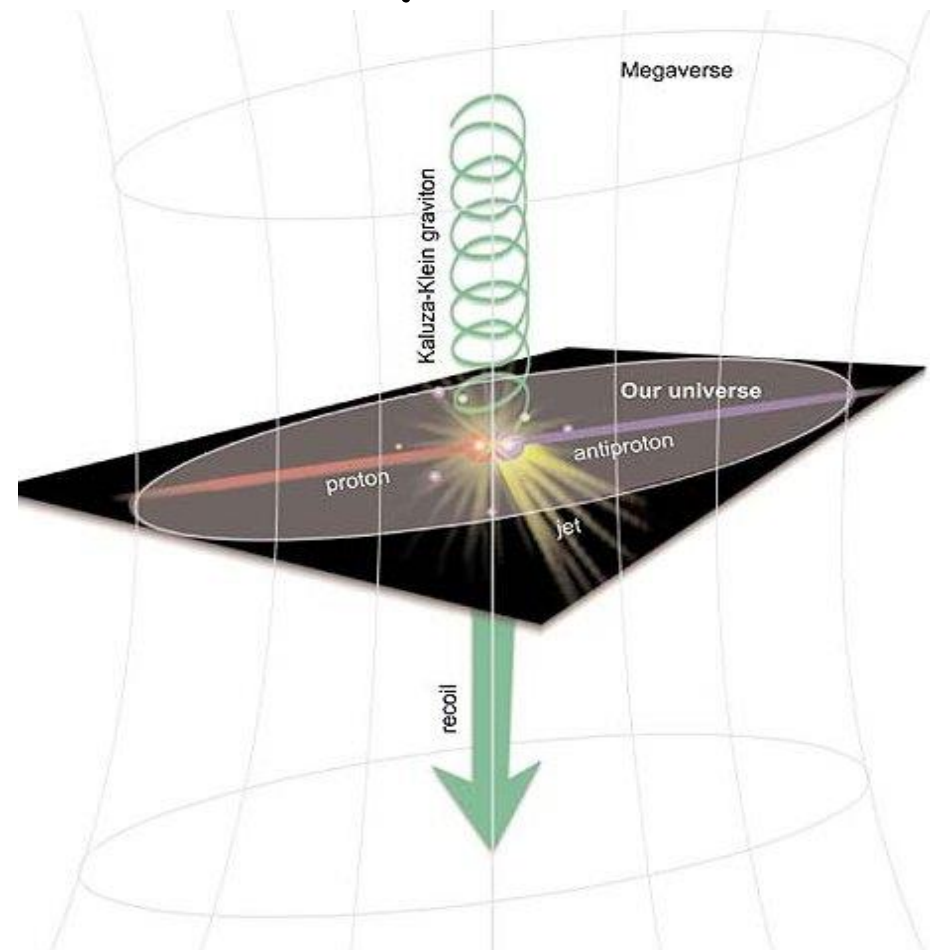


# Ekstra dimensioner - hovedideen

Det traditionelle billede



Det nye billede



# Problemet med tyngdekraften - Svag?

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

Facit:  $\delta m_H \approx 0$

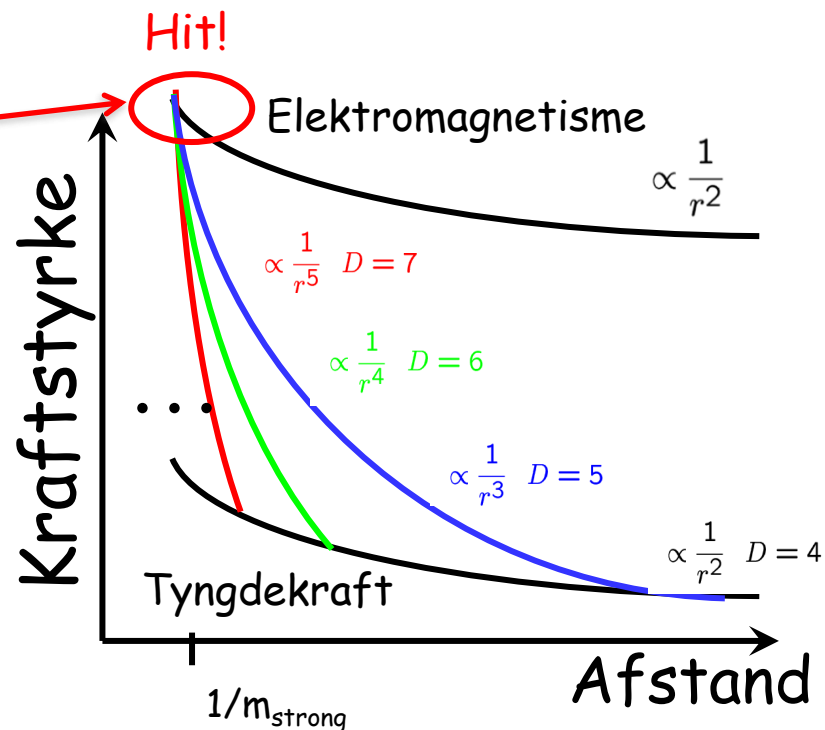
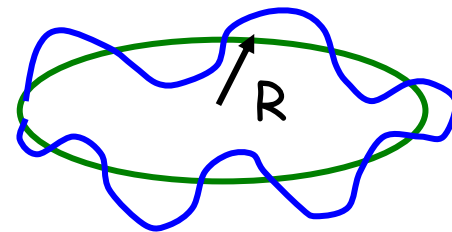
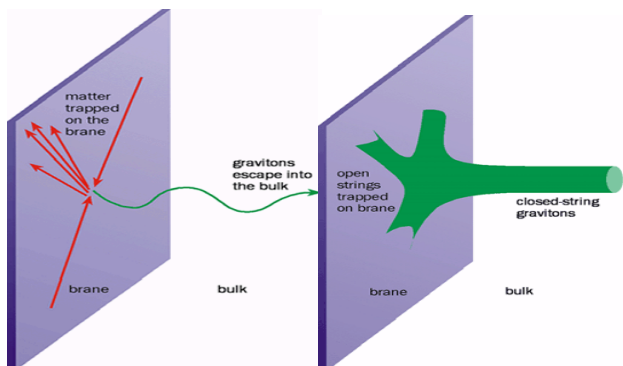
- Modeller med Ekstra dimensioner har også ekstra partikler

**KK-partikler** kunne være **mørkt stof**

- Ekstra dimensioner **forbedrer** kræfternes forening!

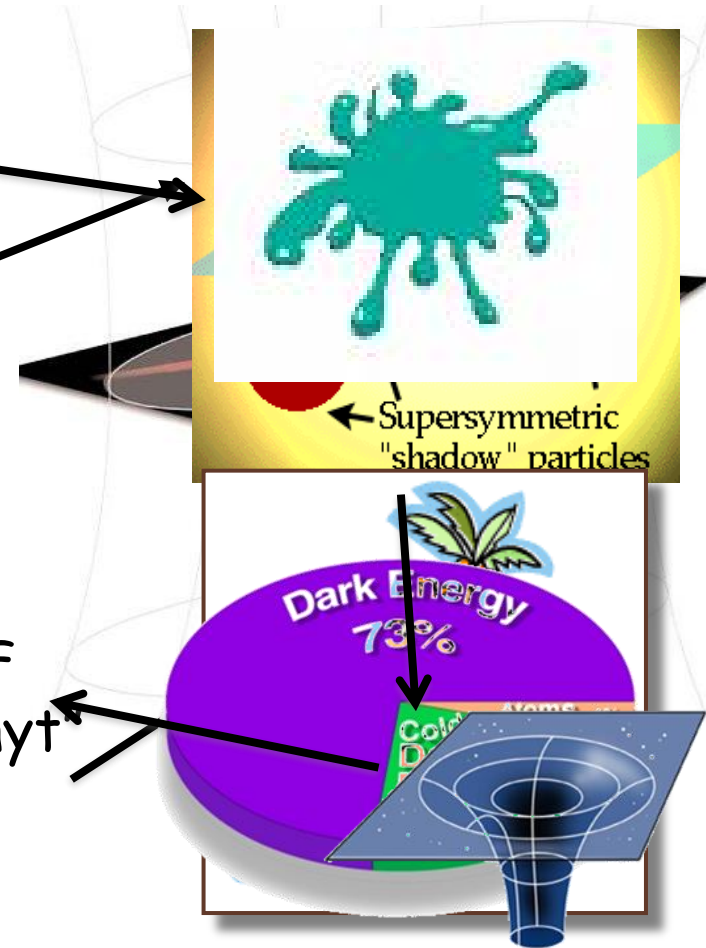
- Der findes modeller med ekstra dimensioner

**UDEN en Higgspartikel**



# Hvad håber vi at se?

1. **Fundet!!? → Higgspartiklen**
  - Hvis Higgs: Studere den
  - **Hvis ikke 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!

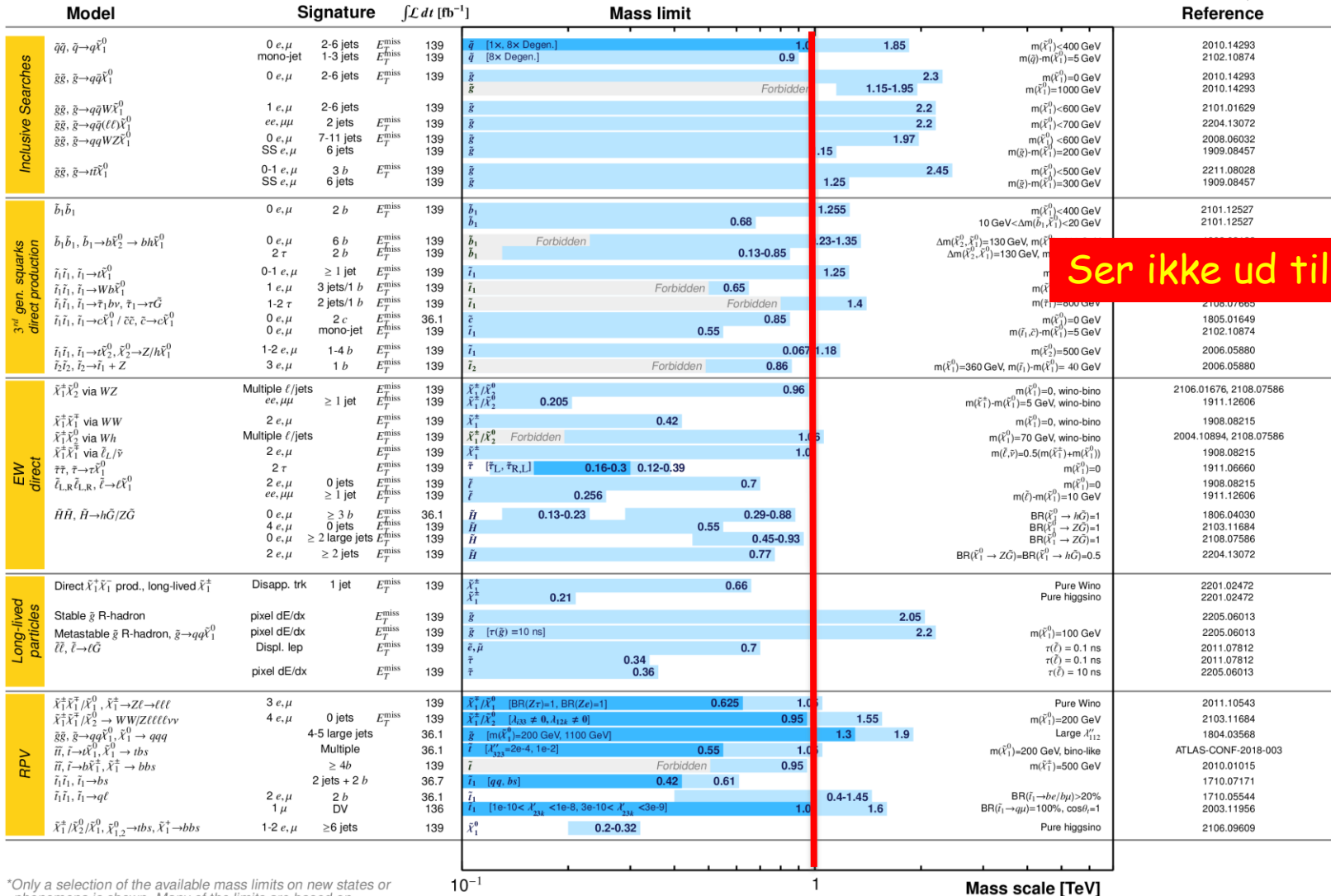
# Er verden supersymmetrisk? ATLAS scoretavle

ATLAS SUSY Searches\* - 95% CL Lower Limits

March 2023

ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 13$  TeV



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<sup>-1</sup>

1

Mass scale [TeV]



# Har vi glemt en ekstra dimension?

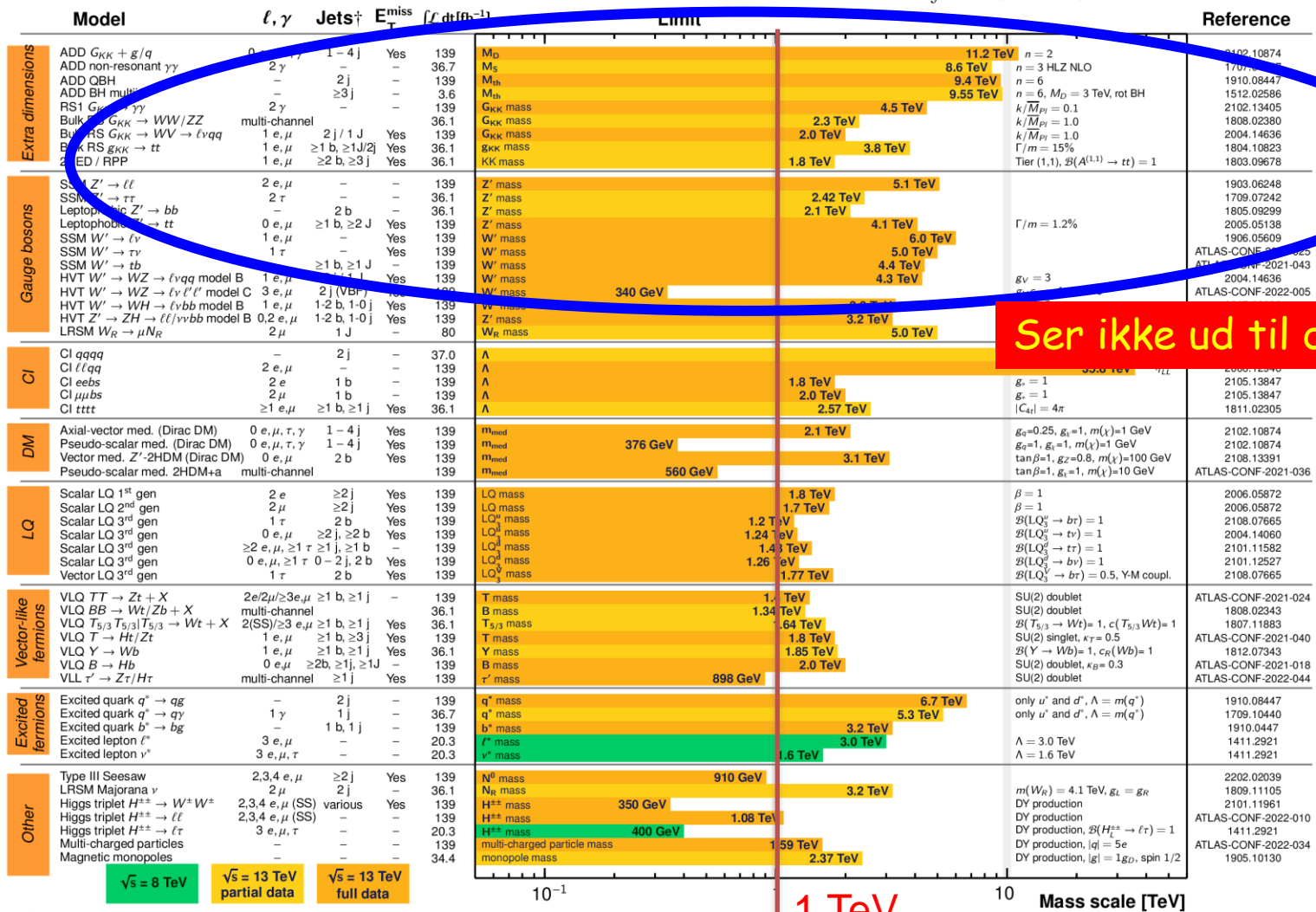
ATLAS Heavy Particle Searches\* - 95% CL Upper Exclusion Limits

Status: July 2022

ATLAS Preliminary

$$\int \mathcal{L} dt = (3.6 - 139) \text{ fb}^{-1}$$

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



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

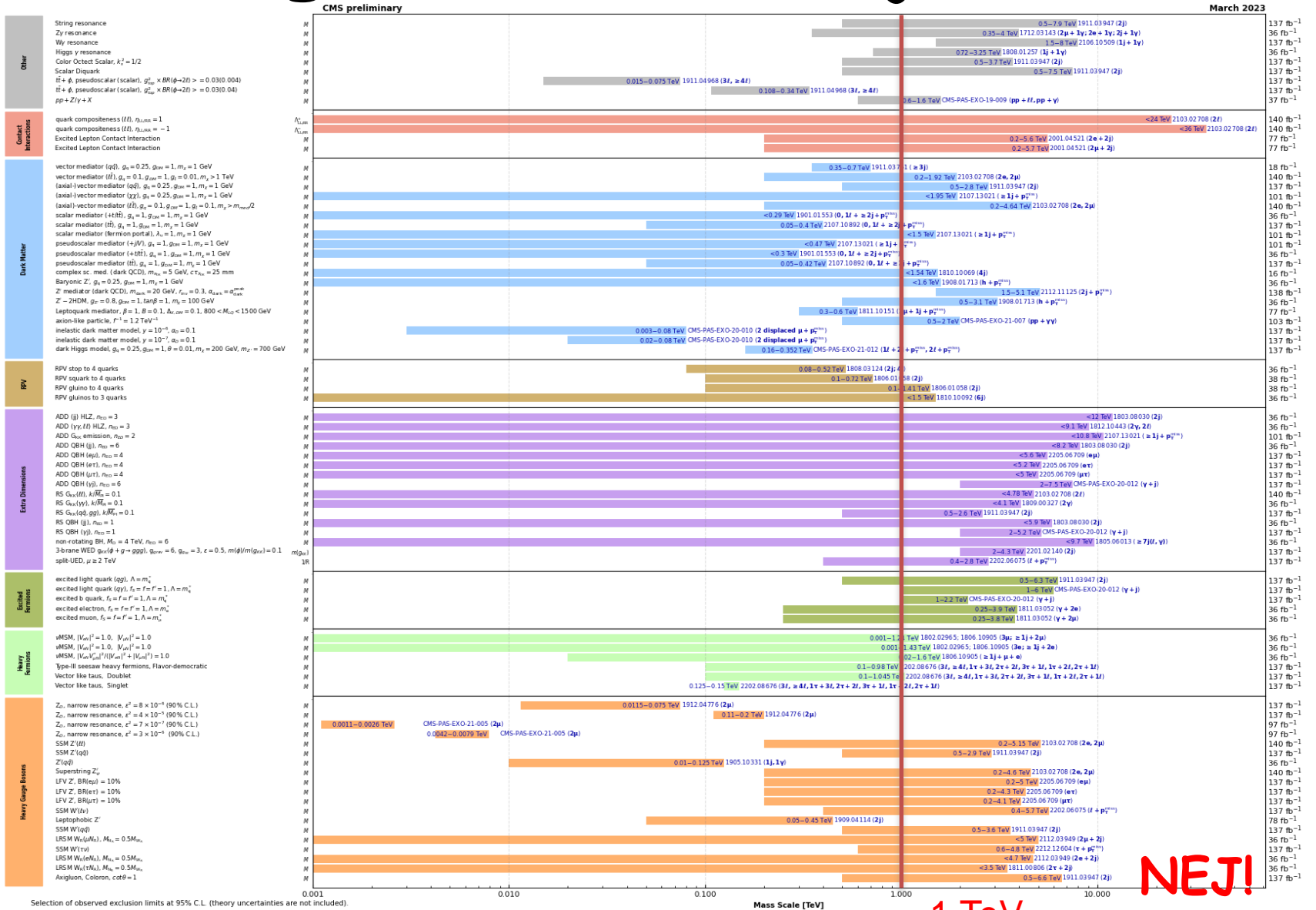
†Small radius (large radius) jets are denoted by the (l)jet(s).

Ingen opdagelser - ENDNU!



# Tager ATLAS fejl.... ?

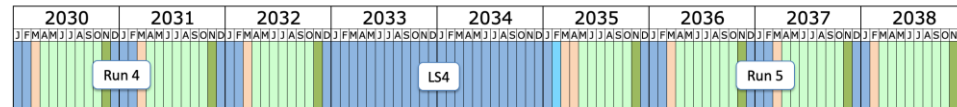
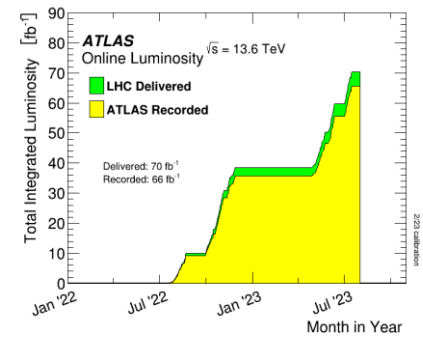
Overview of CMS EXO results



NEJ!

# SÅ jagten på det ukendte er ikke slut!!!!

- LHC "sæson 3" er i gang
  - Startede 5. juli 2022
  - Planlagt slutning November 2025



■ Shutdown/Technical stop  
■ Protons physics  
■ Ions  
■ Commissioning with beam  
■ Hardware commissioning/magnet training

Google: "LHC page one"

https://op-webtools.web.cern.ch/vistar/vistars.php

LHC Page 1

Vistar

LHC Page1 Fill: 8315 E: 6800 GeV t(SB): 10:54:09 27-10-22 07:25:03

**PROTON PHYSICS: STABLE BEAMS**

Energy: 6800 GeV IB1: 2.20e+14 IB2: 2.30e+14

Beta\* IP1: 0.30 m Beta\* IP2: 10.00 m Beta\* IP5: 0.30 m Beta\* IP8: 2.00 m

Inst. Lumi [(ub.s)<sup>-1</sup>] IP1: 12178.01 IP2: 8.51 IP5: 12529.67 IP8: 337.10

IBCT Intensity and Beam Energy Updated: 07:25:02

Instantaneous Luminosity Updated: 07:25:00

Comments (26-Oct-2022 20:53:04)

\*\*\* STABLE BEAMS \*\*\*  
 IP1/5 B\* levelling  $\mu = 54$  (+/- 2.5%)  
 IP2/8 : separation levelling  
 XRP IN

BIS status and SMP flags

	B1	B2
Link Status of Beam Permits	true	true
Global Beam Permit	true	true
Setup Beam	false	false
Beam Presence	true	true
Moveable Devices Allowed In	true	true
Stable Beams	true	true

AFS: 25ns\_2462b\_2450\_1737\_1735\_180bpi\_17inj\_2INDIV PM Status B1: ENABLED PM Status B2: ENABLED

LHC ATLAS

Vistar

Thu 27 Oct 2022 07:28:26 AM C

ATLAS EXPERIMENT

Run Number: 438181. Event Number: 3084410063

Date: 2022-10-27 07:25:32 CEST

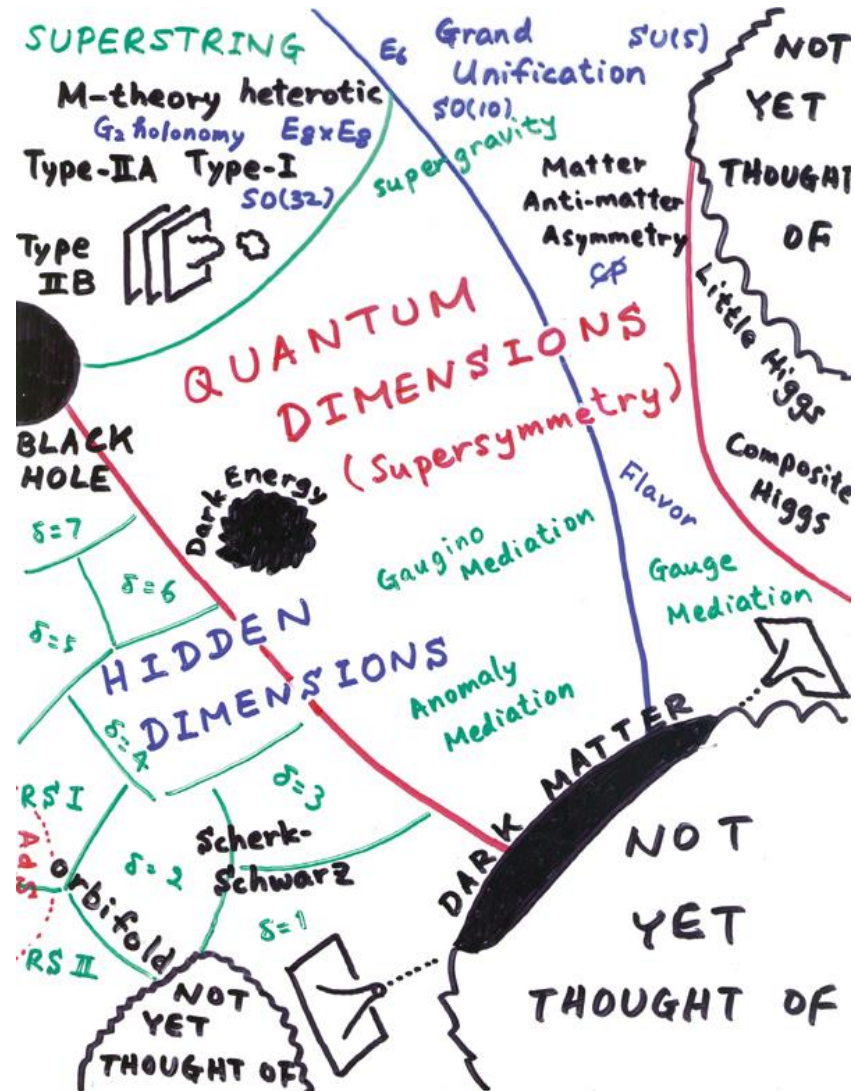
Snapshot of a proton collision directly from the ATLAS experiment

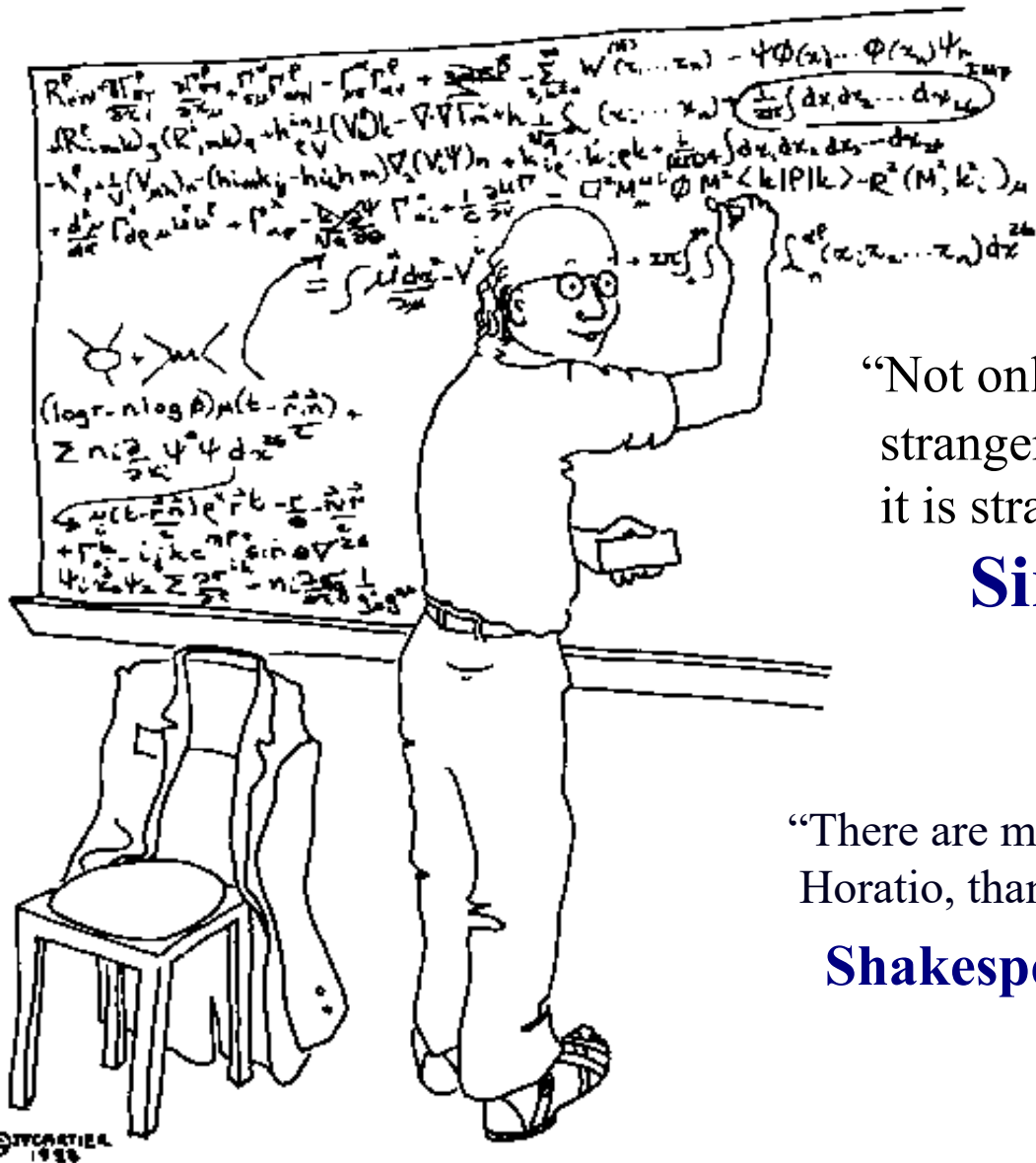
Fokus: Higgs, b-kvarker, top kvarker og naturligvis: nye partikler!

# Hvilken vej har naturen valgt?



Naturen holder kortene godt skjult for os!  
Men vi har mange ideer!





“Not only is the universe stranger than we imagine, it is stranger than we can imagine.”

**Sir Arthur Eddington**

“There are more things in heaven and earth, Horatio, than are dreamt of in our philosophy.”

**Shakespeare, Hamlet, act 1, sc. 5, l.**

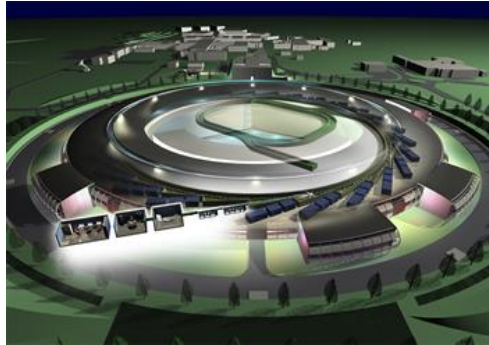
*“At this point we notice that this equation is beautifully simplified if we assume that space-time has 92 dimensions.”*

# 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



# CERNs "mission"



Forskning



Forsker træning



Uddannelse

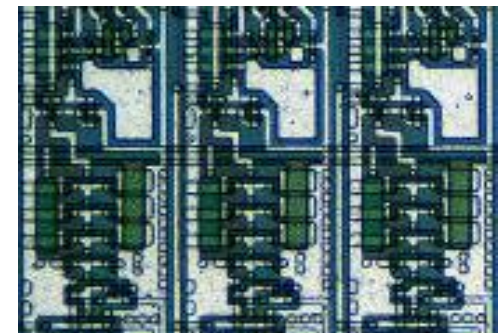
# Partikelfysik "Spin-offs"



Computer



Medicinsk apparatur



Teknologi