



Universums dolda dalar

Torbjörn Sjöstrand

Institutionen för astronomi och teoretisk fysik
Lunds Universitet

Astronomiska Sällskapet Tycho Brahe, 29 september 2021



- Född 1954 i Malmö.
- Aktiv i MARS från 6e klass genom gymnasiet.
- Läste matematik och fysik i Lund, fr.a. teoretisk fysik.
- Doktor i teoretisk fysik 1982.
- Utomlands i många år, främst 9 år på CERN.
- Professor i teoretisk partikelfysik 2000.
- Sammanslagna med astronomi ~2010.
- Seniorprofessor sedan 2020.



LUND UNIVERSITY

Astronomiska Sällskapet Tycho Brahe
Skånska Ingenjörsklubben
26 januari 2012, Malmö

Mörk materia: en resa från universum till partikelfysik

Torbjörn Sjöstrand

Institutionen för astronomi och teoretisk fysik

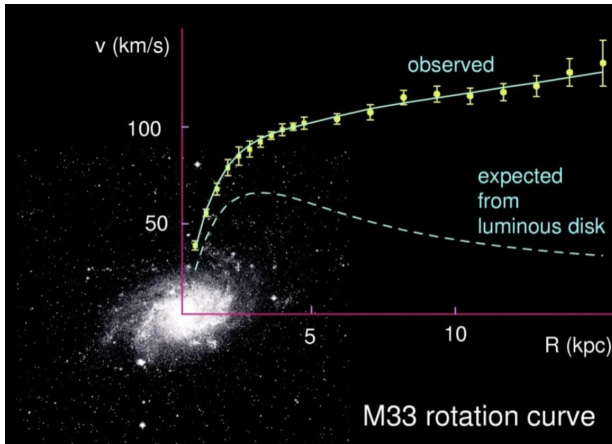
Lunds universitet

- ★ Varför tror vi att mörk materia finns? (Astronomi, kosmologi)
 - ★ Vad kan den vara? (Teoretisk partikelfysik, kosmologi)
- ★ Hur kan vi lära oss mer om den? (Experimentell partikelfysik, astropartikelfysik)

Varför samma ämne?

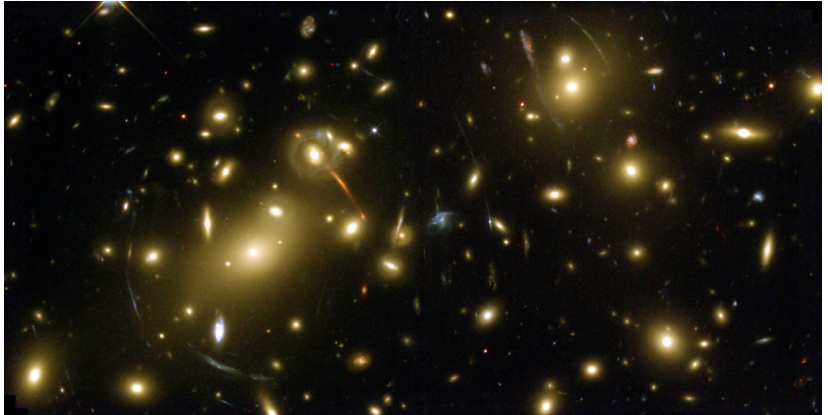
- En liten del av min verksamhet som partikelfysiker, men den del som ligger närmast astronomi.
- Bevisen för mörk materia kvarstår.
- Förhoppningar om snabb upptäckt vid LHC har grusats.
- Paradigmskifte för teoretiska tankar och modeller.
- Dolda dalar har blivit mycket populärt.
Eng.: Hidden Valleys = Hidden Sectors = Secluded Sectors
- Min datorkod (i PYTHIA) användes för nästan alla experimentella simuleringar av dolda-dalar-scenarier.
- Studeras också av experimentella partikelfysiker i Lund.
- Många möten, t.ex. “Advanced School on Physics of Dark Matter and Hidden Sectors”, Lund/Zoom, 18 - 21 oktober.

Galaxrotation



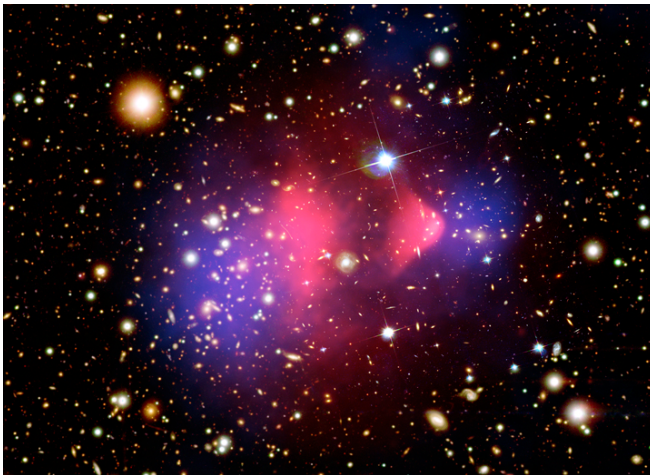
Det finns mer materia i galaxer än vad vi kan se,
och den sträcker sig längre ut än vad stjärnor och gasmoln gör

Knut Lundmark, "dunkle Materie", 1930



- 1) Galaxers relativa rörelse \implies mer materia (Zwicky, 1933)
- 2) Gravitationella linser \implies mer materia

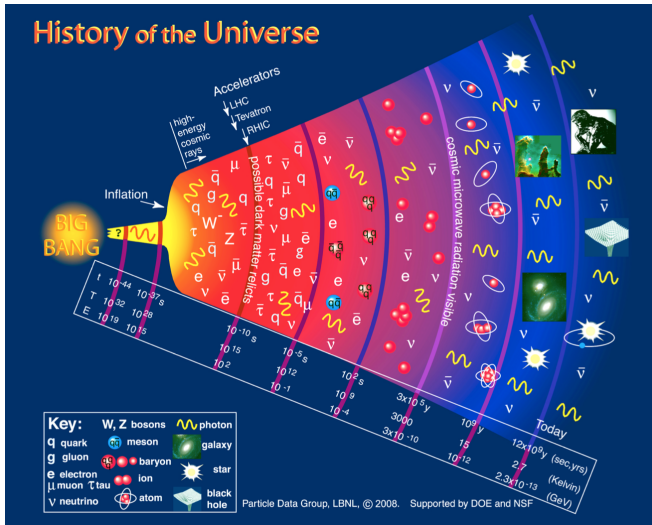
Galaxhopskollisioner



rödfärgat =
synligt
het gas →
röntgenstrålning
(Chandra-
satellit)

blåfärgat =
gravitationell
linsning
(teleskop)

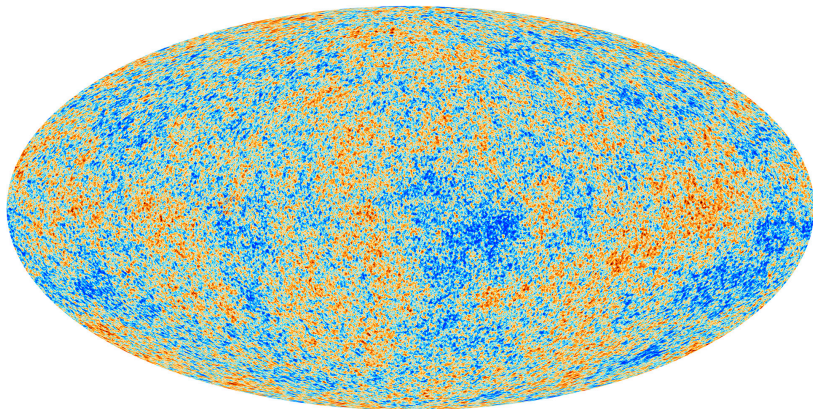
mörk materia
bromsas ej in!



Universum expanderar
 \Rightarrow (ljus)vågor sträcks ut (rödförskjutning)
 \Rightarrow temperatur sjunker

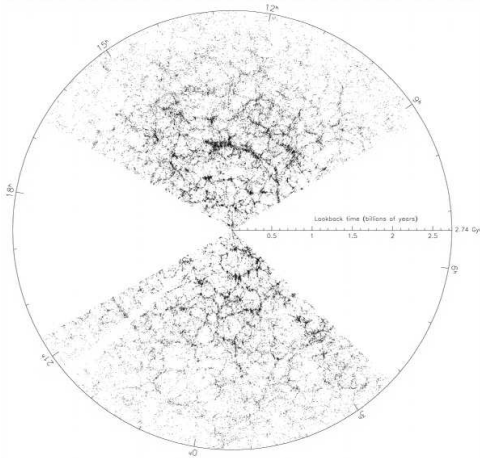
300 000 år:
 $T = 3000$ K
 $p + e^- \rightarrow H$
 "yta för sista spridning"

Den kosmiska bakgrundsstrålningen

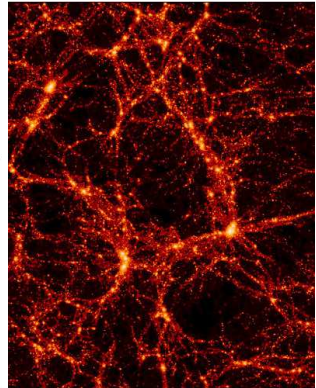


Nästan perfekt svartkroppsspektrum med $T = 2.725$ K.
Akustiska vågor \implies temperaturfluktuationer $\sim \pm 0.3$ mK.
Storlek \approx regioner i kontakt vid ålder 300 000 år.

Tidiga fluktuationer växer till sig,
och ger frön till galaxhopar och galaxer.

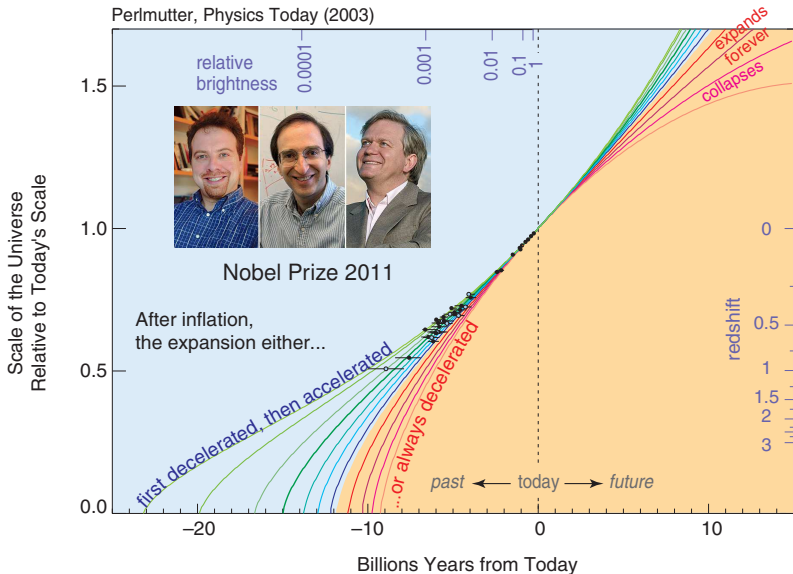


verklighet

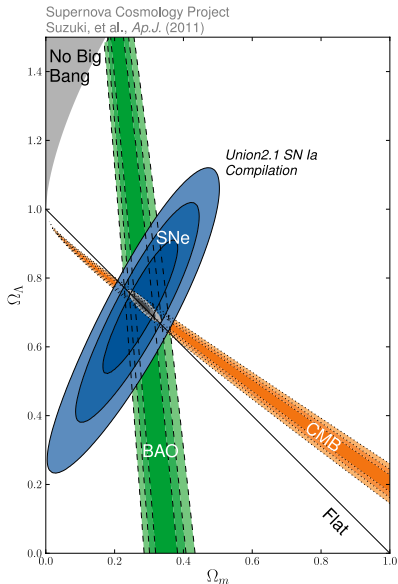


simulering

Universums expansionshistoria



Kombinerad bild



SNe = supernovor

CMB = kosmisk bakgrundsstrålning

BAO = galaxfördelning

Ω_m = mängd vanlig + mörk materia
materia: gravitation bromsar expansion

Ω_Λ = mängd mörk energi
mörk energi = konstant energy/volym
så mer volym \Rightarrow mer energi
 \Rightarrow ökar i betydelse med tiden

Nuvarade sammansättning i universum:

5% vanlig materia

26% mörk materia

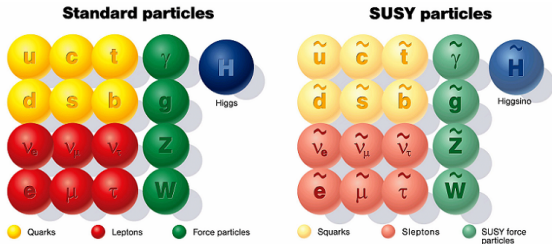
69% mörk energi

Supersymmetri och mörk materia

Higgspartikeln var sista byggstenen i standardmodellen.

Men motsägelser som skulle kunna lösas med **supersymmetri**:
relation mellan rum-tid och partiklars spinn.

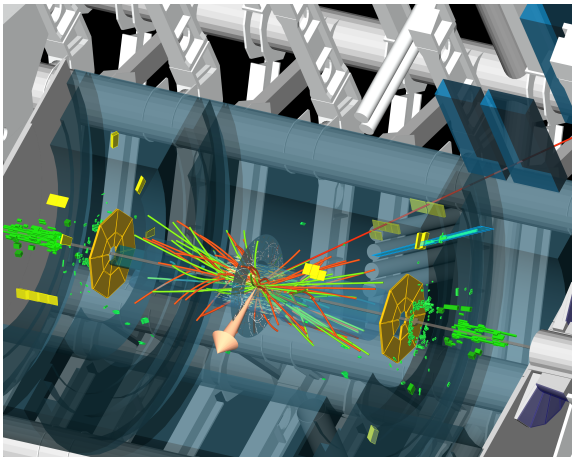
Till varje fundamental partikel finns en supersymmetrisk partner:



Dessa är tyngre än de vanliga partiklarna \Rightarrow svåra att producera.
Supersymmetriska partiklar har ett bevarat kvanttal (jfr. laddning):
måste parproduceras, och sönderfaller till lättare sådana.

LSP = Lättaste Supersymmetriska Partikeln.

LSP kan ej sönderfalla \Rightarrow kandidat för mörk materia!



CERN: Europeisk
utanför Genève
(bl.a. Sverige)

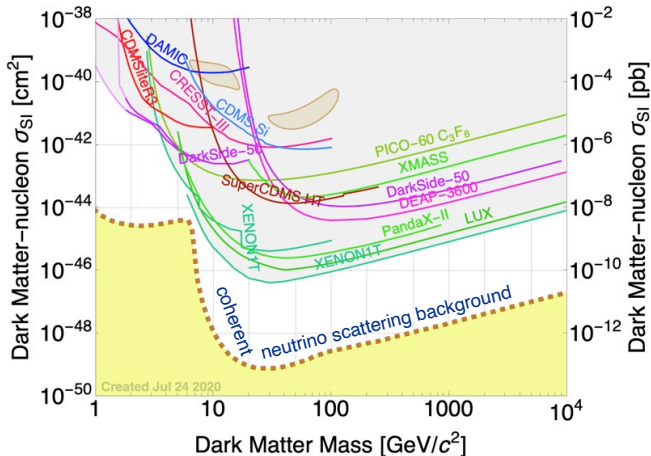
LHC: Large Hadron
Collider, 27 km ring,
13 TeV energi,
 $\sim 10^9$ kollisioner/s

ATLAS: detektor
25 m hög, 45 m lång,
7 000 ton
(bl.a. Lund)

Måste leta efter "nålen i höstacken".
Impuls-imbalans tecken på osynlig partikel,
men finns också kända sådana, främst neutriner.

Spridning av mörk materia

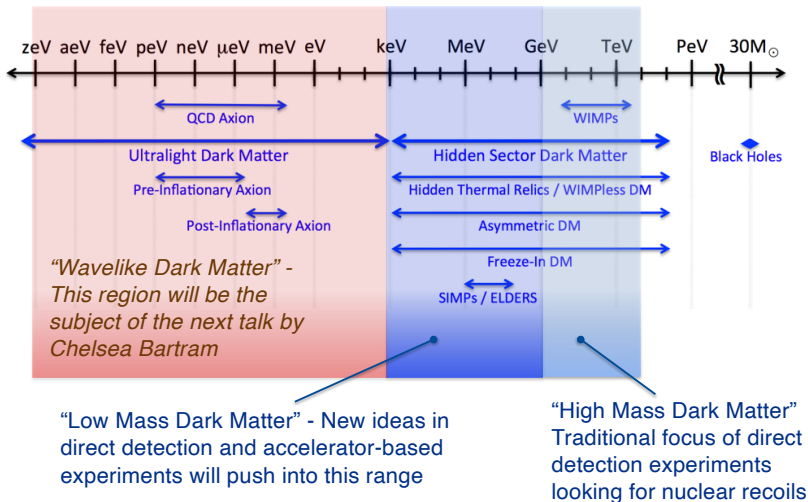
Passerande mörk materia kan kollidera med kärnor, t.ex. i kristall, och rekylen kan registreras (med stor ansträngning).



Inga bekräftade signaler än, vilket också motsäger SUSY.

Modellöversikt

Flera olika modeller föreslagna, på olika massskalor:



Mest intressanta f.n.: axioner och dolda dalar.

Föreslagna av Roberto Peccei och Helen Quinn, för problem i stark växelverkan (varför bevaras paritet och laddningssymmetri?)
Påminner något om Higgsmekanismen för att ge partiklar massa.

Senare utvidgade till (skalär)fält av **mycket** lätta partiklar, som skulle bildas **mycket** tidigt i big bang.
Rör sig långsamt p.g.a. universums expansion, och kan då klumpas.

Kopplar till elektromagnetism via **$\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$** -term
⇒ axion kan omvandlas från eller till foton i starkt magnetfält.
Skulle ge "ljussken genom väggar".

Magnetfältets styrka måste finjusteras för att se effekt;
jfr. frekvensval i radioapparat.

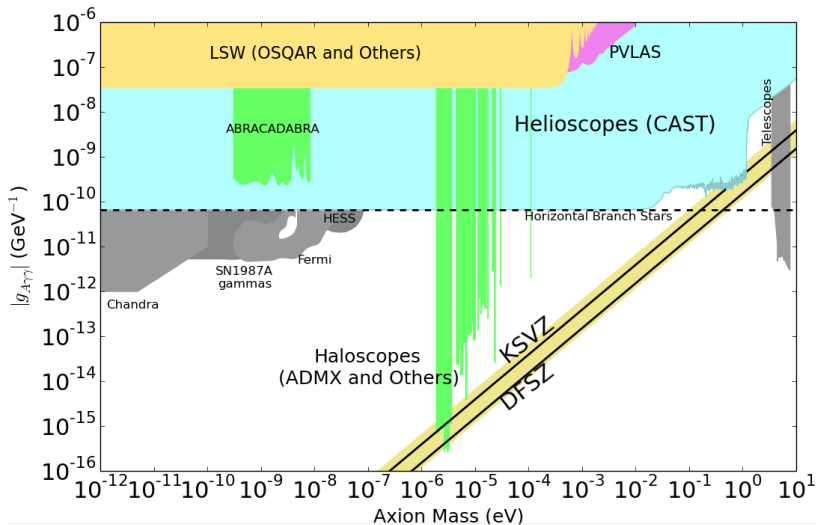
Produceras i stjärnor, och kan påverka supernovors kärnkollaps.

Detektorer för axioner

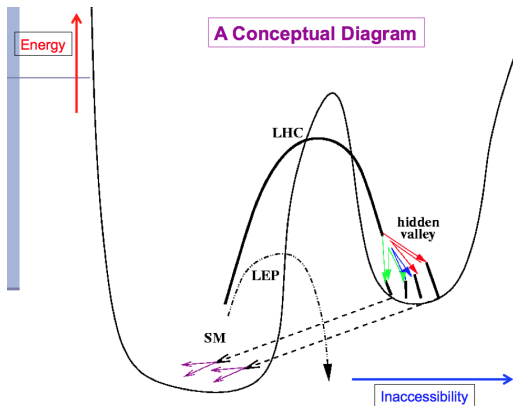
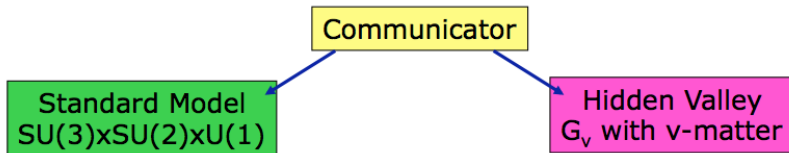
CAST = CERN Axion Solar Telescope



Gränser för axioner



Dolda dalar grundidé



Dold dal innehåller:

- nya partiklar
- nya växelverkningar

Kan koppla svagt
till vår värld,
eller inte alls.

Dolda dalen kan inte innehålla vilka spelregler som helst!
Vi antar den består av gaugegrupper.

Matematisk grupp:

innehåller element a, b, c, \dots och en operator $*$ med

- associativitet $(a * b) * c = a * (b * c)$
- identitetslement I med $I * a = a * I = a$
- invers $a * a^{-1} = a^{-1} * a = I$

Gaugegrupp i partikelfysik (mycket förenklat):

- gruppelementen består av kraftförmedlare;
- de verkar på tillstånd: kvarkar, leptoner, neutrinos;
- möjliga växelverknings bestäms av gruppen.
 - **U(1)** elektromagnetism (fotonen)
 - **SU(2)** svag växelverkan (W^\pm, Z^0)
 - **SU(3)** stark växelverkan (8 gluoner)

(egentligen blandas **U(1)** och **SU(2)**, men glöm det här)

T.ex. svag växelverkan **SU(2)**

$$\text{med dublett } \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \text{ svarar } \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ mot } W^- u = d .$$

Större grupper kan innehålla mindre, t.ex.

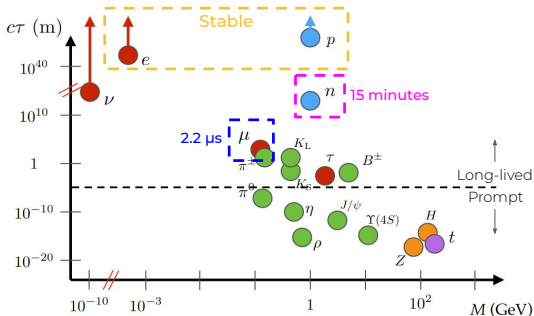
$$\mathbf{SU(5)} \supset \mathbf{SU(3)} \times \mathbf{SU(2)} \times \mathbf{U(1)}$$

så hela standardmodellen skulle kunna rymmas i en enda grupp (med flera om och men).

Enligt **supersträngteori** (om man nu tror på den) måste den kompletta gruppen vara antingen **SO(32)** eller **E₈ × E₈**.

Varje **E₈ ⊃ SU(8) ⊃ SU(5)**, så enkelt klämma in standardmodellen plus mer grupper. T.ex. skulle “den andra” **E₈** kunna vara en alternativ värld med lika rik struktur som vår.

Dolda dalar måste innehålla vissa helt stabila partiklar, för att ge mörk materia, men alla behöver inte vara det.
Jfr. standardmodellen:



Långlivade partiklar av olika skäl:

- bevarade kvanttal;
- begränsat utrymme;
- tunga mellantillstånd;
- små kopplingar.

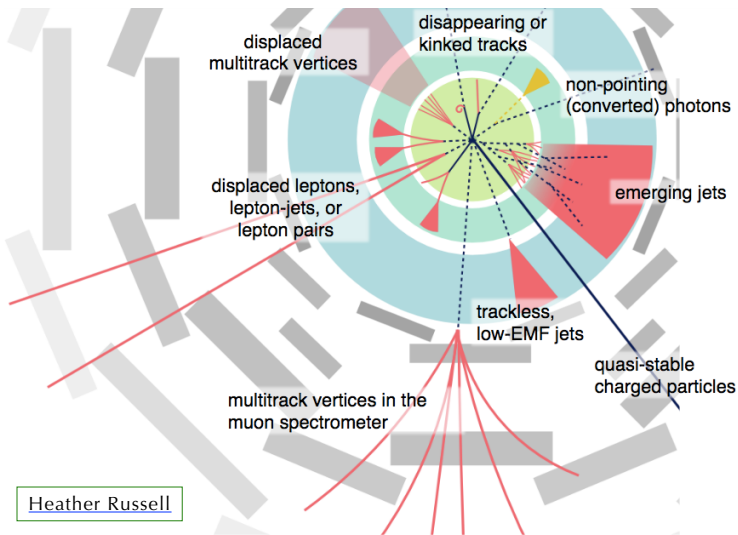
Möjliga kommunikationsvägar till/från dolda dalar:

- Ny tung Z'^0 som kopplas till bägge sektorer:
 $q\bar{q} \rightarrow Z'^0 \rightarrow q_v \bar{q}_v / e_v^+ e_v^- / \dots$
- Ditto H'^0 , som kopplar till massa.
- Nya fermioner med kopplingar i bägge sektorer, t.ex.
 $q\bar{q} \rightarrow Q_v \bar{Q}_v \rightarrow (qq_v)(\bar{q}\bar{q}_v)$ eller
 $q\bar{q} \rightarrow E_v \bar{E}_v \rightarrow (e^- e_v)(e^+ \bar{e}_v)$.
- Ytterst liten mixning mellan γ och (massiv) γ_v .

Enkelt exempel:

- $m(Z') \sim 1 \text{ TeV}$, $m(e_v) \sim m(\gamma_v) \sim 5 \text{ GeV}$
- $q\bar{q} \rightarrow Z'^0 \rightarrow e_v \bar{e}_v \rightarrow e_v \bar{e}_v \gamma_v$,
- och (mycket) senare $\gamma_v \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+ \mu^-$
eller $\gamma_v \rightarrow \gamma \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{hadroner (laddade och oladdade)}$.

Experimentella signaler

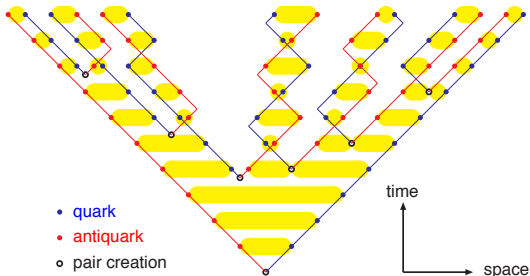


Många möjliga signaler från "lång" livade partiklar.
Ofta svåra att fånga; kräver nya analysstrategier.

Gömd hadronproduktion

Mer komplicerat exempel:

- **SU(N)** grupp för stark växelverkan, $N \geq 2$.
- Flera olika dolda kvarkar q_v , jfr. 6 stycken i standardmodellen.
- Bildar rikt spektrum av möjliga mesoner $q_v \bar{q}'_v$.
- Om $q_v \neq q'_v$ så "stabil" då bär specifika kvanttal, men kan eventuellt sönderfalla till lättare inom dalen.
- Om $q_v \equiv q'_v$ så kan dolda kvarkar annihilera $q_v \bar{q}_v \rightarrow q \bar{q}$.



Produktion t.ex.
 $q \bar{q} \rightarrow Z'^0 \rightarrow q_v \bar{q}_v$,
följes av fragmentering
till flera mesoner.
(Lundaspecialitet.)
Ger varierande antal
synliga sönderfall.

- Astronomiska bevis för mörk materia överväldigande; ca. 5 gånger mer mörk än vanlig materia.
- Mörk materias natur fortfarande ej förstådd.
- Fyra huvudmöjligheter:
 - mer komplicerat supersymmetriskt scenario;
 - axioner;
 - dolda dalar; eller
 - något än mer exotiskt.
- Omfattande experimentella studier pågår, vid CERN och på många andra ställen.

Tack för visat intresse



(Fer a Cheval, Frankrike)