

Il Bosone di Higgs e la cosmologia

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\ & + \bar{\chi}_i Y_{ij} \chi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

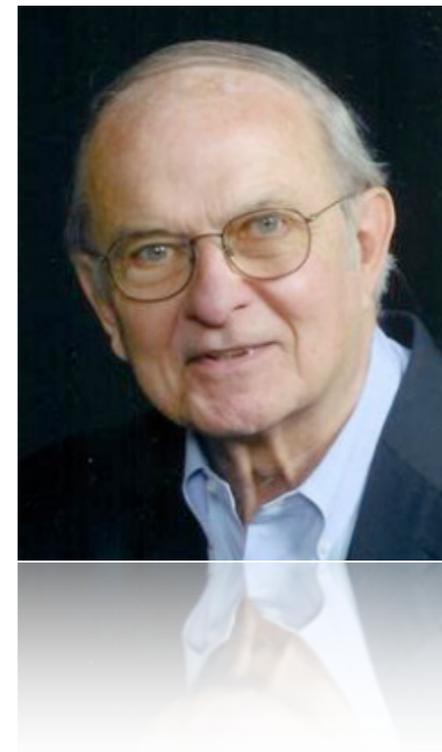
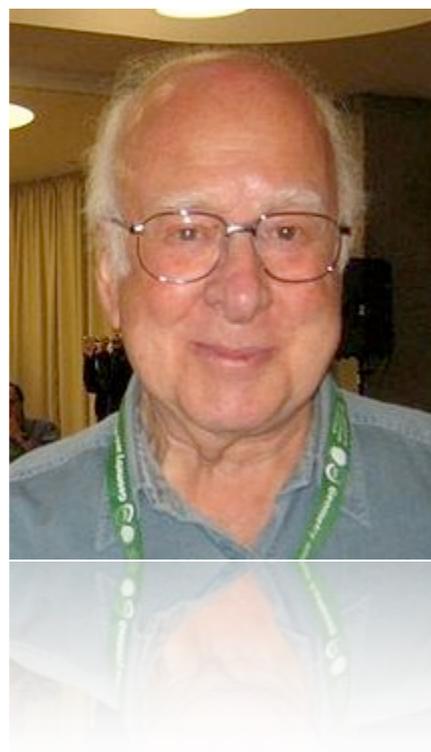
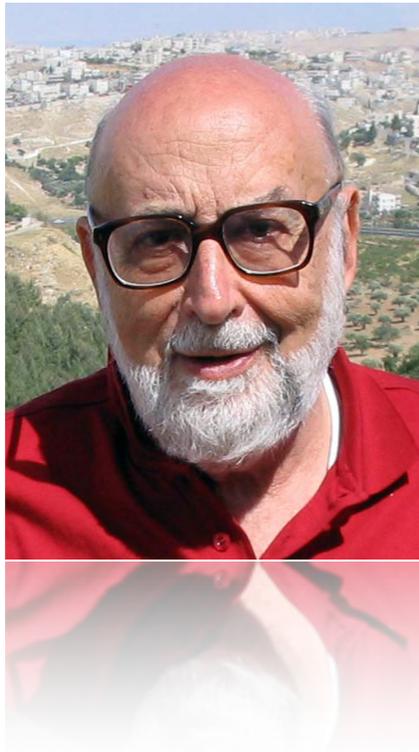


Alessandro Tronconi
4 luglio 2013



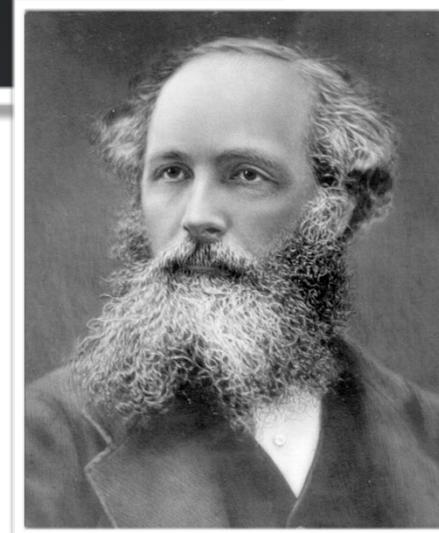
Outline

Una particella con tanti “padri” Brout-Englert-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble



- ☕ Introduzione al meccanismo di Higgs
- ☕ CMBR ed inflazione
- ☕ Particella di Higgs e le origini dell'Universo
- ☕ Conclusioni

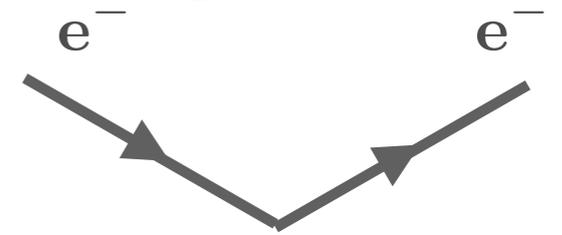
UN PO' di storia



La particella di Higgs è stata introdotta a livello teorico nel 1964 nel tentativo di costruire una teoria unificata delle interazioni elettrodeboli INVARIANTE PER RICALIBRATURA (GAUGE INVARIANT)

L'invarianza di gauge e l'invarianza di Lorentz (1904) sono simmetrie delle leggi dell'elettromagnetismo (equazioni di Maxwell, 1862) scoperte accidentalmente

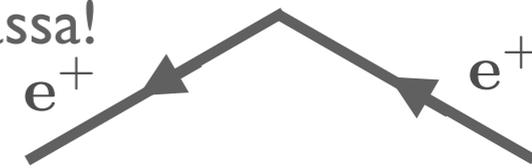
$$V' = V + \frac{\partial \chi}{\partial t}, \quad \vec{A}' = \vec{A} - \vec{\nabla} \chi \rightarrow \vec{E}' = \vec{E}, \quad \vec{B}' = \vec{B}$$



L'elettromagnetismo descrive l'interazione fra particelle con una carica elettrica. Questa interazione si realizza mediante lo scambio di fotoni

l'invarianza di gauge dell'elettromagnetismo mantiene il fotone senza massa!

Inoltre permette di ottenere risultati finiti e fisicamente accettabili

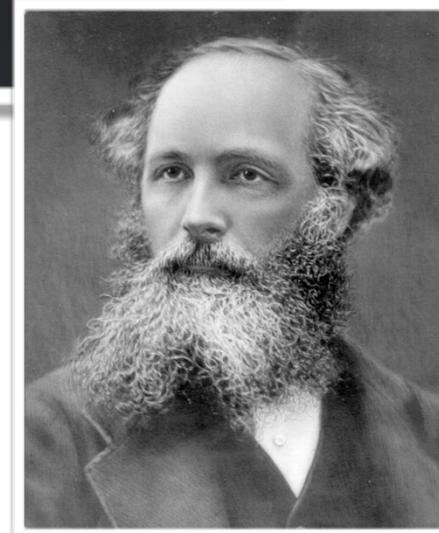


Nella fisica moderna sono diventate lo strumento principale per la formulazione delle leggi fondamentali che regolano la dinamica della fisica nucleare e subnucleare!

Il **MODELLO STANDARD** della fisica delle particelle è fondato sul paradigma della gauge/Lorentz invarianza che impone vincoli restrittivi al modo di costruire una teoria fondamentale determinandone la forma delle interazioni.



Un po' di storia



La particella di Higgs è stata introdotta a livello teorico nel 1964 nel tentativo di costruire una teoria unificata delle interazioni elettrodeboli INVARIANTE PER RICALIBRATURA (GAUGE INVARIANT)

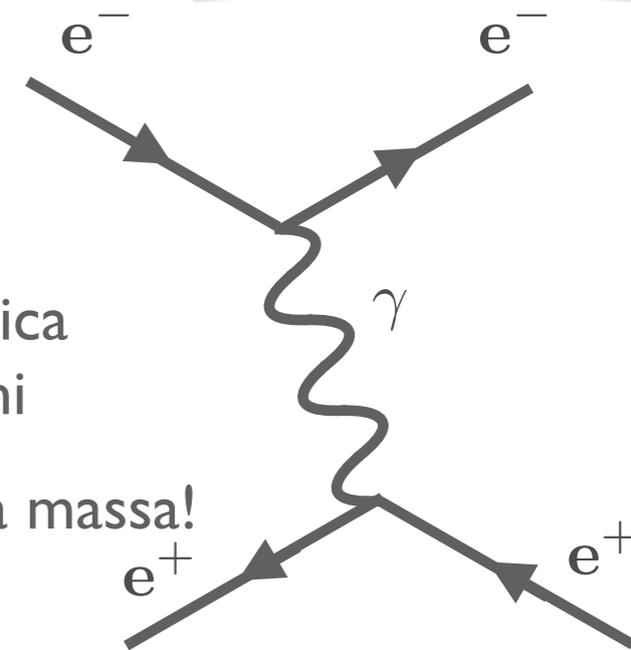
L'invarianza di gauge e l'invarianza di Lorentz (1904) sono simmetrie delle leggi dell'elettromagnetismo (equazioni di Maxwell, 1862) scoperte accidentalmente

$$V' = V + \frac{\partial \chi}{\partial t}, \quad \vec{A}' = \vec{A} - \vec{\nabla} \chi \rightarrow \vec{E}' = \vec{E}, \quad \vec{B}' = \vec{B}$$

L'elettromagnetismo descrive l'interazione fra particelle con una carica elettrica. Questa interazione si realizza mediante lo scambio di fotoni

l'invarianza di gauge dell'elettromagnetismo mantiene il fotone senza massa!

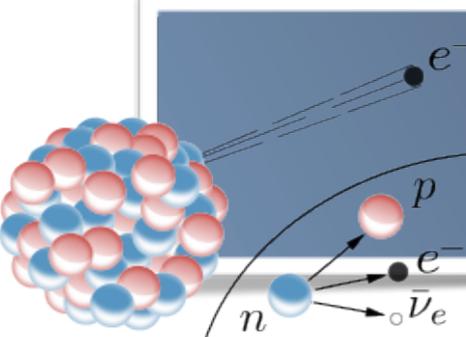
Inoltre permette di ottenere risultati finiti e fisicamente accettabili



Nella fisica moderna sono diventate lo strumento principale per la formulazione delle leggi fondamentali che regolano la dinamica della fisica nucleare e subnucleare!

Il **MODELLO STANDARD** della fisica delle particelle è fondato sul paradigma della gauge/Lorentz invarianza che impone vincoli restrittivi al modo di costruire una teoria fondamentale determinandone la forma delle interazioni.





L'interazione debole

☕ La descrizione dell'interazione debole (radioattività) in modo gauge invariante creò il presupposto dell'invenzione del meccanismo di Higgs

☕ Decadimento beta originariamente descritto da Fermi mediante un'interazione a 4 fermioni

☕ Ma una descrizione gauge invariante portò a modificarla:

☕ L'interazione si realizza mediante lo scambio di una particella (\mathbf{W}^-)

☕ Diversamente dal fotone, \mathbf{W}^- :

☕ è instabile

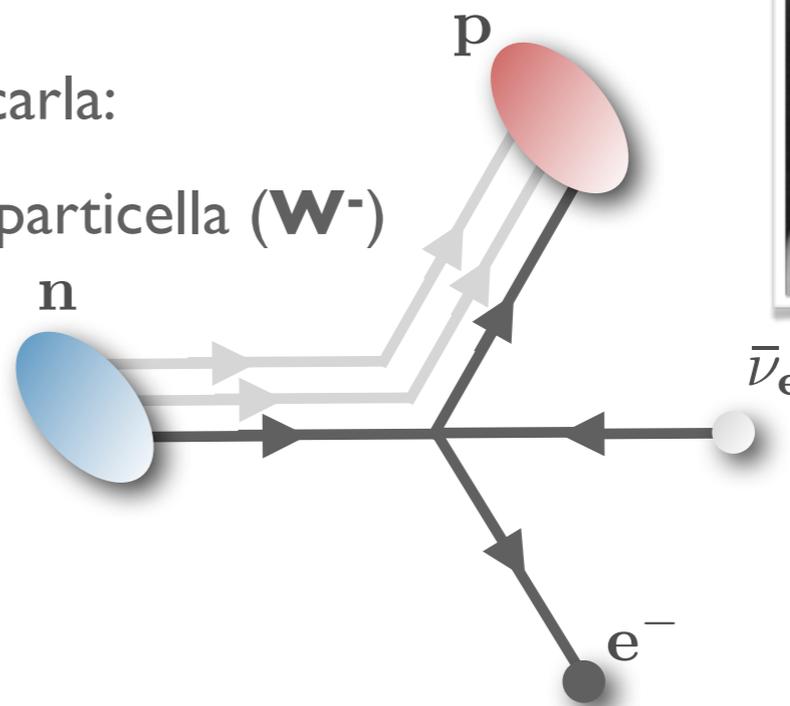
☕ è il mediatore di un'interazione a corto raggio

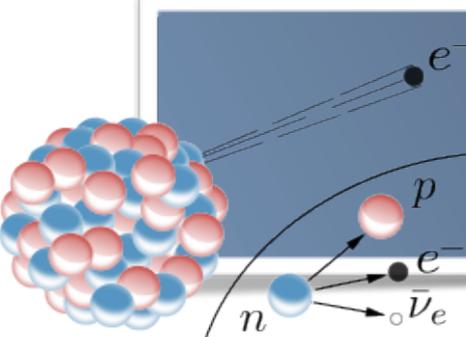
☕ La massa di \mathbf{W}^- è compatibile con la Lorentz invarianza ma non è compatibile con la richiesta di gauge invarianza

☕ **PROBLEMA:** la massa del "bosone intermedio" \mathbf{W}^- è osservata quindi

☕ Si rigetta il criterio dell'invarianza di gauge

☕ Si affianca al criterio un meccanismo per generare la massa di \mathbf{W}^-





L'interazione debole

☕ La descrizione dell'interazione debole (radioattività) in modo gauge invariante creò il presupposto dell'invenzione del meccanismo di Higgs

☕ Decadimento beta originariamente descritto da Fermi mediante un'interazione a 4 fermioni

☕ Ma una descrizione gauge invariante portò a modificarla:

☕ L'interazione si realizza mediante lo scambio di una particella (W^-)

☕ Diversamente dal fotone, W^- :

☕ è instabile

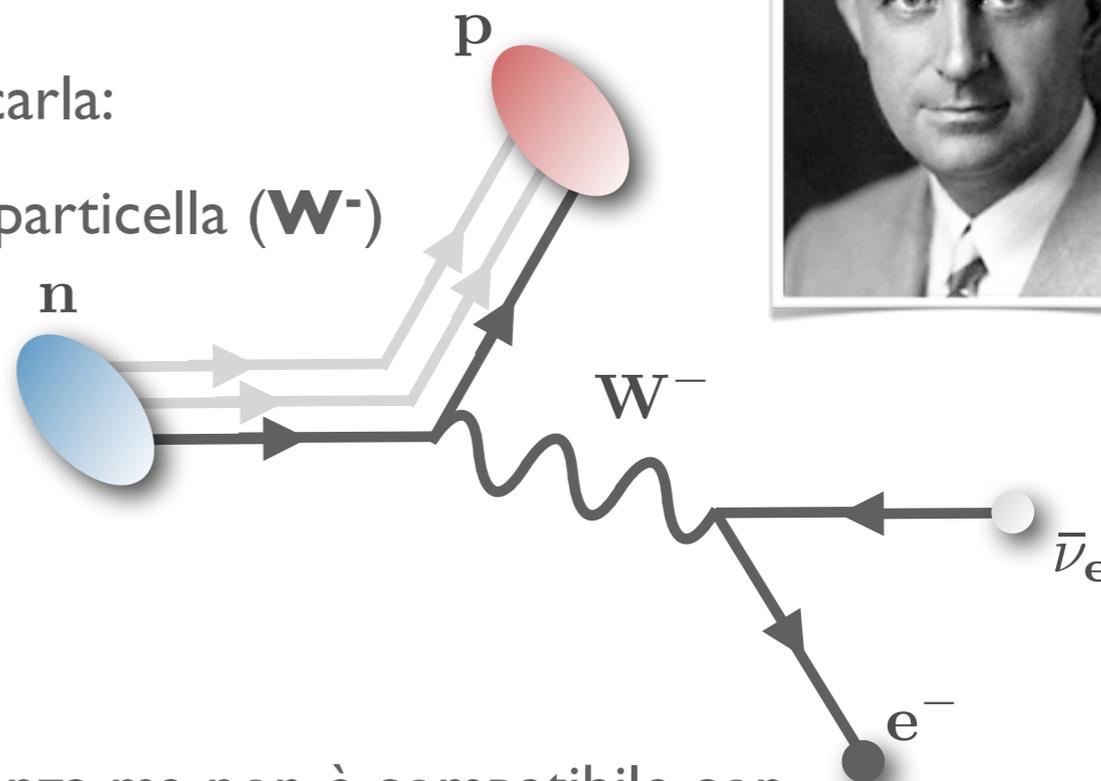
☕ è il mediatore di un'interazione a corto raggio

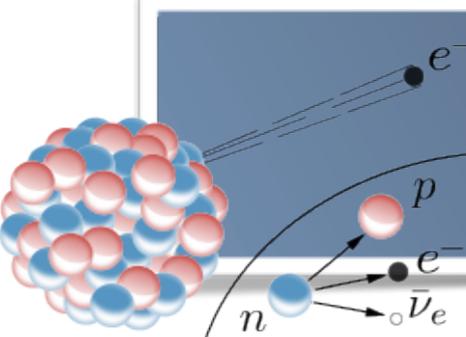
☕ La massa di W^- è compatibile con la Lorentz invarianza ma non è compatibile con la richiesta di gauge invarianza

☕ **PROBLEMA:** la massa del "bosone intermedio" W^- è osservata quindi

☕ Si rigetta il criterio dell'invarianza di gauge

☕ Si affianca al criterio un meccanismo per generare la massa di W^-





L'interazione debole

☕ La descrizione dell'interazione debole (radioattività) in modo gauge invariante creò il presupposto dell'invenzione del meccanismo di Higgs

☕ Decadimento beta originariamente descritto da Fermi mediante un'interazione a 4 fermioni

☕ Ma una descrizione gauge invariante portò a modificarla:

☕ L'interazione si realizza mediante lo scambio di una particella (W^-)

☕ Diversamente dal fotone, W^- :

HA MASSA!

☕ è instabile

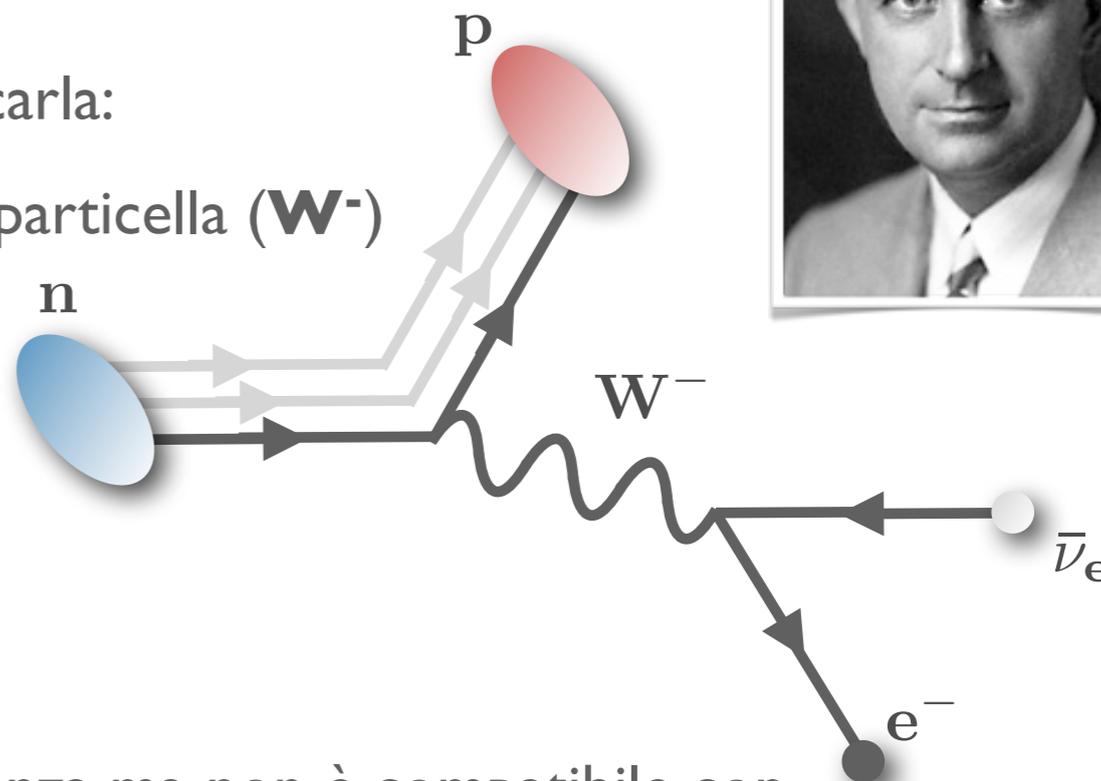
☕ è il mediatore di un'interazione a corto raggio

☕ La massa di W^- è compatibile con la Lorentz invarianza ma non è compatibile con la richiesta di gauge invarianza

☕ **PROBLEMA:** la massa del "bosone intermedio" W^- è osservata quindi

☕ Si rigetta il criterio dell'invarianza di gauge

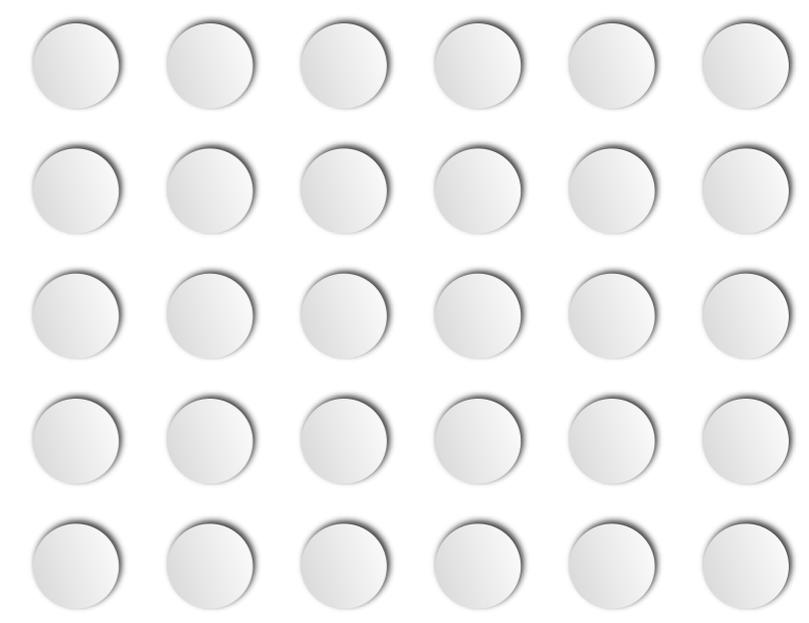
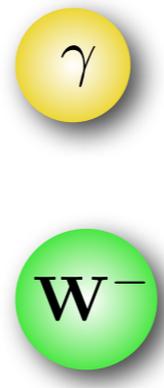
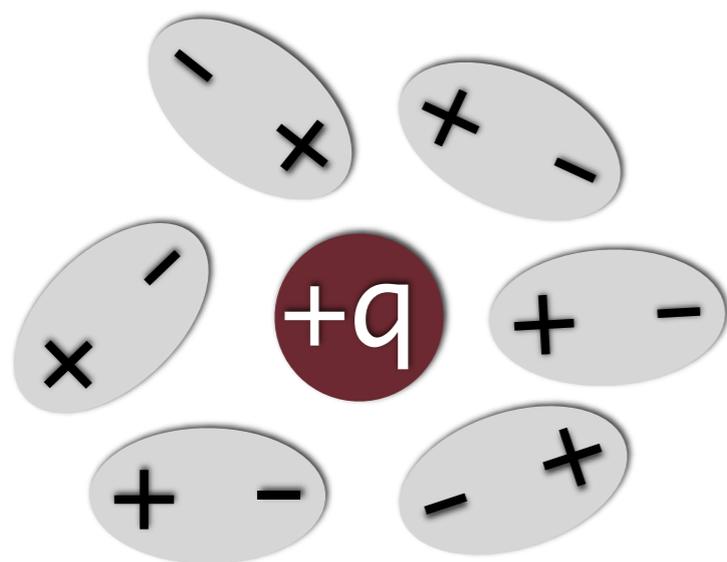
☕ Si affianca al criterio un meccanismo per generare la massa di W^-



la massa...



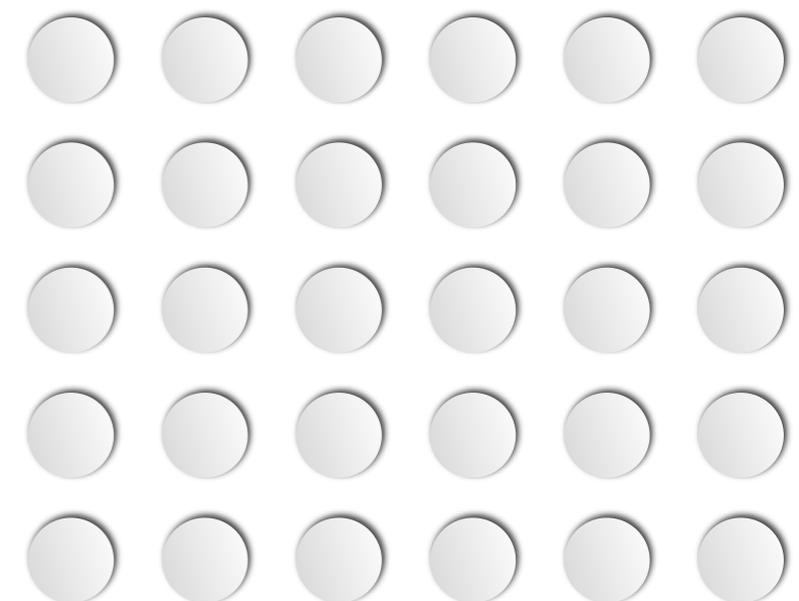
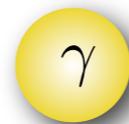
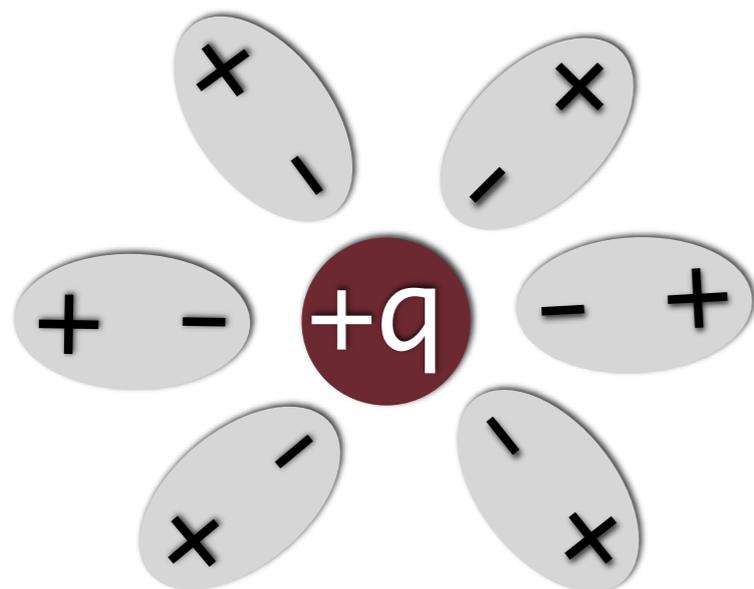
- ☛ La massa è una delle proprietà di una particella elementare (insieme alla carica elettrica, lo spin, etc.)
- ☛ Una particella senza massa e senza “ostacoli” si muove alla velocità della luce mentre una particella con una massa ed un’energia finita si muove ad una velocità minore anche in assenza di “ostacoli”...
- ☛ **una particella senza massa si può comportare come una particella con massa se è “ostacolata” nel suo moto!**
- ☛ Affinchè ciò accada è necessaria **un’interazione**
- ☛ La presenza dell’interazione può modificare la massa e le altre proprietà delle particelle



la massa...



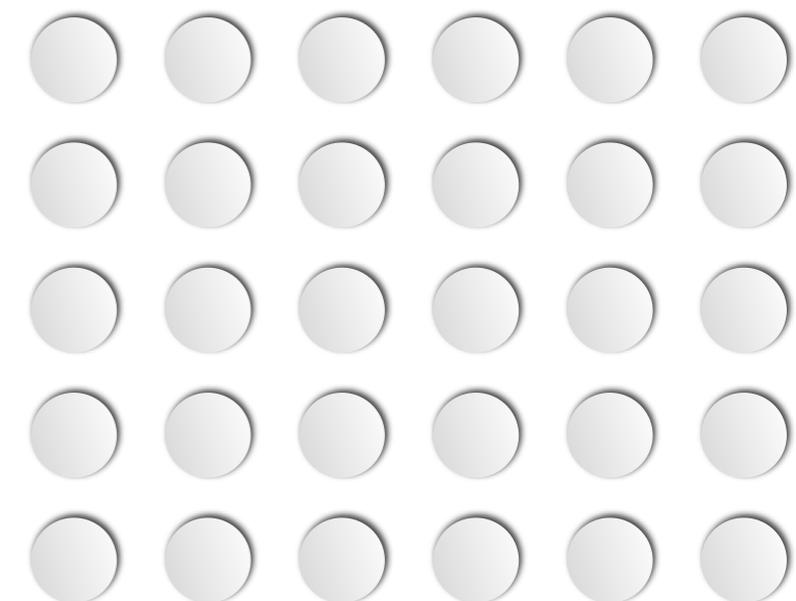
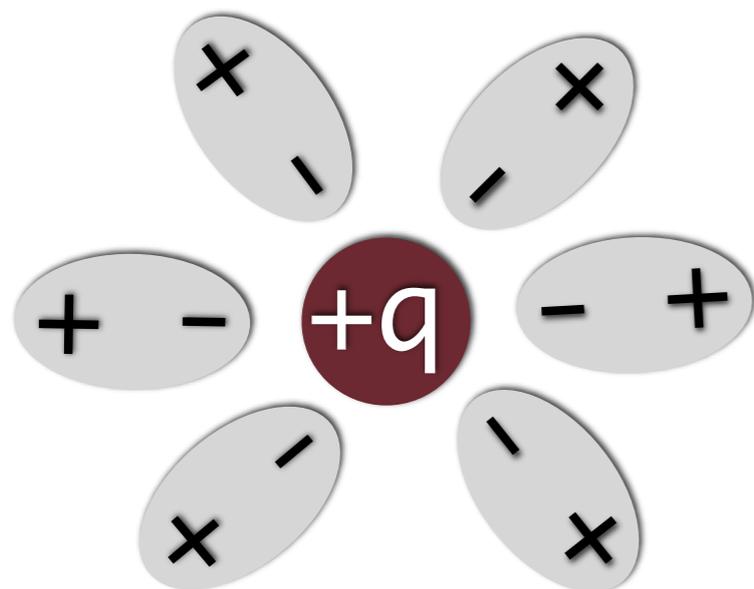
- ☕ La massa è una delle proprietà di una particella elementare (insieme alla carica elettrica, lo spin, etc.)
- ☕ Una particella senza massa e senza “ostacoli” si muove alla velocità della luce mentre una particella con una massa ed un’energia finita si muove ad una velocità minore anche in assenza di “ostacoli”...
- ☕ **una particella senza massa si può comportare come una particella con massa se è “ostacolata” nel suo moto!**
- ☕ Affinchè ciò accada è necessaria **un’interazione**
- ☕ La presenza dell’interazione può modificare la massa e le altre proprietà delle particelle



la massa...

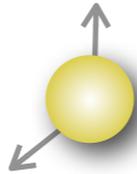


- ☕ La massa è una delle proprietà di una particella elementare (insieme alla carica elettrica, lo spin, etc.)
- ☕ Una particella senza massa e senza “ostacoli” si muove alla velocità della luce mentre una particella con una massa ed un’energia finita si muove ad una velocità minore anche in assenza di “ostacoli”...
- ☕ **una particella senza massa si può comportare come una particella con massa se è “ostacolata” nel suo moto!**
- ☕ Affinchè ciò accada è necessaria **un’interazione**
- ☕ La presenza dell’interazione può modificare la massa e le altre proprietà delle particelle



Meccanismo di Stueckelberg (1938)

$$\mathcal{L}_{EM} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$



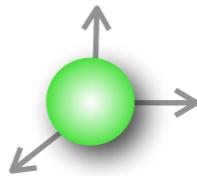
$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

$$\partial_\mu \partial_\nu \chi - \partial_\nu \partial_\mu \chi = 0$$

☕ Elettromagnetismo

- ☕ fotone senza massa e con due stati di polarizzazione
- ☕ la teoria è invariante per trasformazioni di gauge $A^\mu \rightarrow A^\mu + \partial^\mu \chi$
- ☕ Ci sono solo fotoni che si muovono liberamente alla velocità della luce...

$$\mathcal{L}_{EM}^m = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \frac{m^2}{2} A^\mu A_\mu$$



$$(A^\mu + \partial^\mu \chi)(A_\mu + \partial_\mu \chi)$$

☕ Elettromagnetismo con massa

- ☕ fotone con massa e tre stati di polarizzazione
- ☕ la teoria NON È invariante per trasformazioni di gauge $A^\mu \rightarrow A^\mu + \partial^\mu \chi$
- ☕ Ci sono solo fotoni che si muovono liberamente alla velocità minore di quella della luce...

Meccanismo di Stueckelberg (1938)

$$\mathcal{L}_{EM} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$



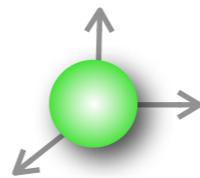
$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

$$\partial_\mu \partial_\nu \chi - \partial_\nu \partial_\mu \chi = 0$$

☕ Elettromagnetismo

- ☕ fotone senza massa e con due stati di polarizzazione
- ☕ la teoria è invariante per trasformazioni di gauge $A^\mu \rightarrow A^\mu + \partial^\mu \chi$
- ☕ Ci sono solo fotoni che si muovono liberamente alla velocità della luce...

$$\mathcal{L}_{EM}^m = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \frac{m^2}{2} A^\mu A_\mu$$



$$(A^\mu + \partial^\mu \chi)(A_\mu + \partial_\mu \chi)$$

☕ Elettromagnetismo con massa

- ☕ fotone con massa e tre stati di polarizzazione
- ☕ la teoria NON È invariante per trasformazioni di gauge $A^\mu \rightarrow A^\mu + \partial^\mu \chi$
- ☕ Ci sono solo fotoni che si muovono liberamente alla velocità minore di quella della luce...

Meccanismo di Stueckelberg (1938)

$$\mathcal{L}_{EM} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$



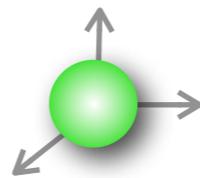
$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

$$\partial_\mu \partial_\nu \chi - \partial_\nu \partial_\mu \chi = 0$$

☕ Elettromagnetismo

- ☕ fotone senza massa e con due stati di polarizzazione
- ☕ la teoria è invariante per trasformazioni di gauge $A^\mu \rightarrow A^\mu + \partial^\mu \chi$ **OK**
- ☕ Ci sono solo fotoni che si muovono liberamente alla velocità della luce...

$$\mathcal{L}_{EM}^m = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \frac{m^2}{2} A^\mu A_\mu$$



$$(A^\mu + \partial^\mu \chi)(A_\mu + \partial_\mu \chi)$$

☕ Elettromagnetismo con massa

- ☕ fotone con massa e tre stati di polarizzazione
- ☕ la teoria **NON È** invariante per trasformazioni di gauge $A^\mu \rightarrow A^\mu + \partial^\mu \chi$
- ☕ Ci sono solo fotoni che si muovono liberamente alla velocità minore di quella della luce...

Meccanismo di Stueckelberg (1938)

$$\mathcal{L}_{EM} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$



$$\partial_\mu \partial_\nu \chi - \partial_\nu \partial_\mu \chi = 0$$

☕ Elettromagnetismo

- ☕ fotone senza massa e con due stati di polarizzazione
- ☕ la teoria è invariante per trasformazioni di gauge $A^\mu \rightarrow A^\mu + \partial^\mu \chi$ **OK**
- ☕ Ci sono solo fotoni che si muovono liberamente alla velocità della luce...

$$\mathcal{L}_{EM}^m = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \frac{m^2}{2} A^\mu A_\mu$$



$$(A^\mu + \partial^\mu \chi)(A_\mu + \partial_\mu \chi)$$

☕ Elettromagnetismo con massa

- ☕ fotone con massa e tre stati di polarizzazione
- ☕ la teoria **NON È** invariante per trasformazioni di gauge $A^\mu \rightarrow A^\mu + \partial^\mu \chi$
- ☕ Ci sono solo fotoni che si muovono liberamente alla velocità minore di quella della luce...

Meccanismo di Stueckelberg (1938)

$$\mathcal{L}_{EM} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$



$$\partial_\mu \partial_\nu \chi - \partial_\nu \partial_\mu \chi = 0$$

☕ Elettromagnetismo

- ☕ fotone senza massa e con due stati di polarizzazione
- ☕ la teoria è invariante per trasformazioni di gauge $A^\mu \rightarrow A^\mu + \partial^\mu \chi$ **OK**
- ☕ Ci sono solo fotoni che si muovono liberamente alla velocità della luce...

$$\mathcal{L}_{EM}^m = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \frac{m^2}{2} A^\mu A_\mu$$



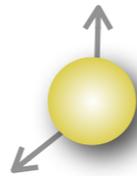
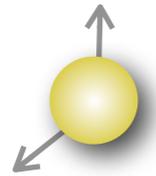
$$(A^\mu + \partial^\mu \chi)(A_\mu + \partial_\mu \chi)$$

☕ Elettromagnetismo con massa

- ☕ fotone con massa e tre stati di polarizzazione
- ☕ la teoria **NON È** invariante per trasformazioni di gauge ~~$A^\mu \rightarrow A^\mu + \partial^\mu \chi$~~
- ☕ Ci sono solo fotoni che si muovono liberamente alla velocità minore di quella della luce...

Meccanismo di Stueckelberg (1938)

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{m^2}{2}A^\mu A_\nu + \frac{1}{2}(\partial_\mu\phi)(\partial^\mu\phi) - mA_\mu\partial^\mu\phi$$



☕ Elettromagnetismo con massa ed un campo scalare senza massa

☕ la gauge invarianza è ristabilita $A^\mu \rightarrow A^\mu + \partial^\mu\chi$ $\phi \rightarrow \phi + m\chi$

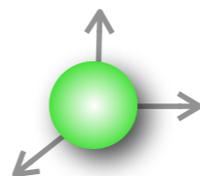
☕ Il fotone ha due stati di polarizzazione e la teoria è rinormalizzabile

☕ Il campo scalare può essere riassorbito nel fotone e dare luogo ad una teoria effettiva con un “nuovo fotone massivo” con tre stati di polarizzazione

$$A_\mu + \partial_\mu\phi \equiv B_\mu$$

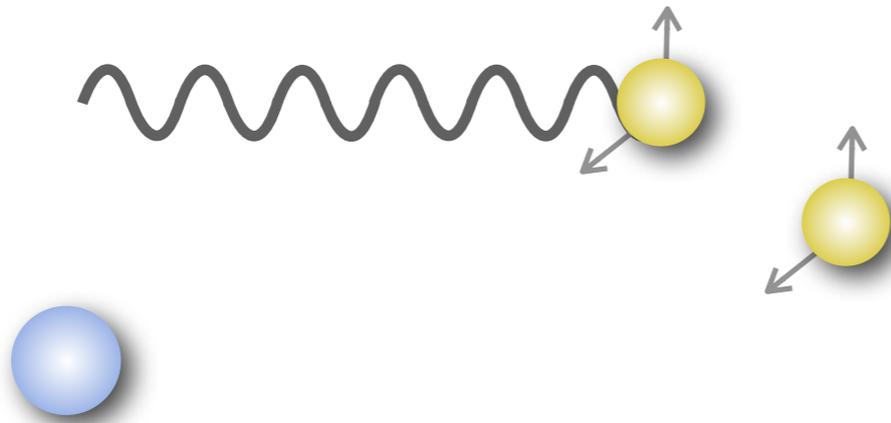
☕ Questo spiega perchè l'elettrodinamica massiva è rinormalizzabile!

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m^2(A_\mu - \partial_\mu\phi)(A^\mu - \partial^\mu\phi) = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} + \frac{m^2}{2}B_\mu B^\mu$$



Meccanismo di Stueckelberg (1938)

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{m^2}{2}A^\mu A_\nu + \frac{1}{2}(\partial_\mu\phi)(\partial^\mu\phi) - mA_\mu\partial^\mu\phi$$



☕ Elettromagnetismo con massa ed un campo scalare senza massa

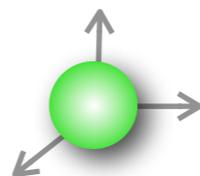
☕ la gauge invarianza è ristabilita $A^\mu \rightarrow A^\mu + \partial^\mu\chi$ $\phi \rightarrow \phi + m\chi$

☕ Il fotone ha due stati di polarizzazione e la teoria è rinormalizzabile

☕ Il campo scalare può essere riassorbito nel fotone e dare luogo ad una teoria effettiva con un “nuovo fotone massivo” con tre stati di polarizzazione $A_\mu + \partial_\mu\phi \equiv B_\mu$

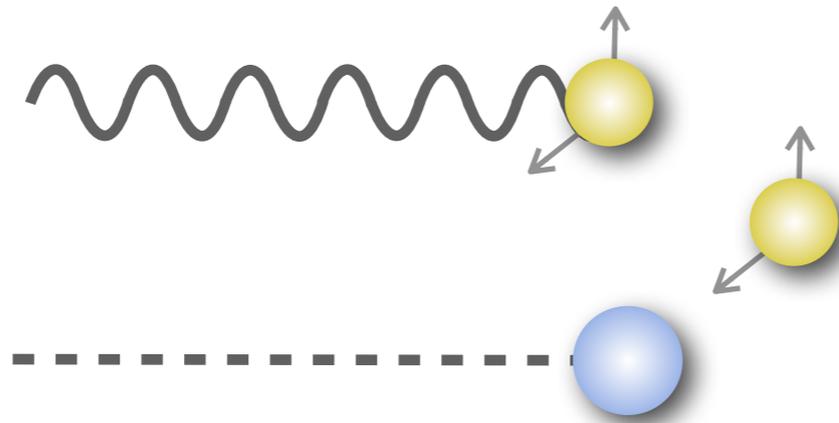
☕ Questo spiega perchè l'elettrodinamica massiva è rinormalizzabile!

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m^2(A_\mu - \partial_\mu\phi)(A^\mu - \partial^\mu\phi) = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} + \frac{m^2}{2}B_\mu B^\mu$$



Meccanismo di Stueckelberg (1938)

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{m^2}{2}A^\mu A_\nu + \frac{1}{2}(\partial_\mu\phi)(\partial^\mu\phi) - mA_\mu\partial^\mu\phi$$



☕ Elettromagnetismo con massa ed un campo scalare senza massa

☕ la gauge invarianza è ristabilita $A^\mu \rightarrow A^\mu + \partial^\mu\chi$ $\phi \rightarrow \phi + m\chi$

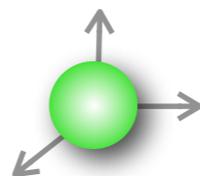
☕ Il fotone ha due stati di polarizzazione e la teoria è rinormalizzabile

☕ Il campo scalare può essere riassorbito nel fotone e dare luogo ad una teoria effettiva con un “nuovo fotone massivo” con tre stati di polarizzazione

$$A_\mu + \partial_\mu\phi \equiv B_\mu$$

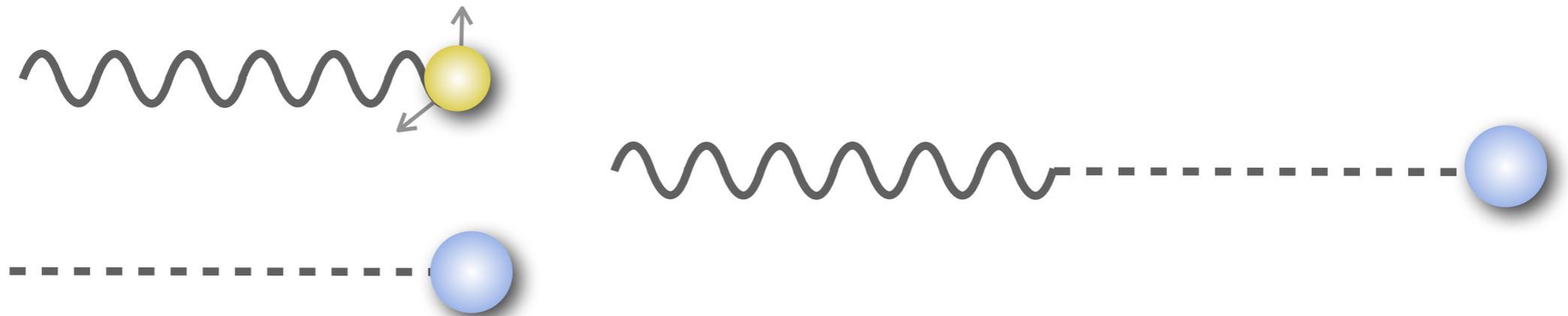
☕ Questo spiega perchè l'elettrodinamica massiva è rinormalizzabile!

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m^2(A_\mu - \partial_\mu\phi)(A^\mu - \partial^\mu\phi) = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} + \frac{m^2}{2}B_\mu B^\mu$$



Meccanismo di Stueckelberg (1938)

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{m^2}{2}A^\mu A_\mu + \frac{1}{2}(\partial_\mu\phi)(\partial^\mu\phi) - m A_\mu \partial^\mu\phi$$



☕ Elettromagnetismo con massa ed un campo scalare senza massa

☕ la gauge invarianza è ristabilita $A^\mu \rightarrow A^\mu + \partial^\mu\chi$ $\phi \rightarrow \phi + m\chi$

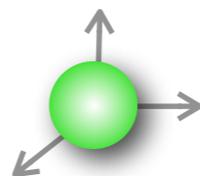
☕ Il fotone ha due stati di polarizzazione e la teoria è rinormalizzabile

☕ Il campo scalare può essere riassorbito nel fotone e dare luogo ad una teoria effettiva con un “nuovo fotone massivo” con tre stati di polarizzazione

$$A_\mu + \partial_\mu\phi \equiv B_\mu$$

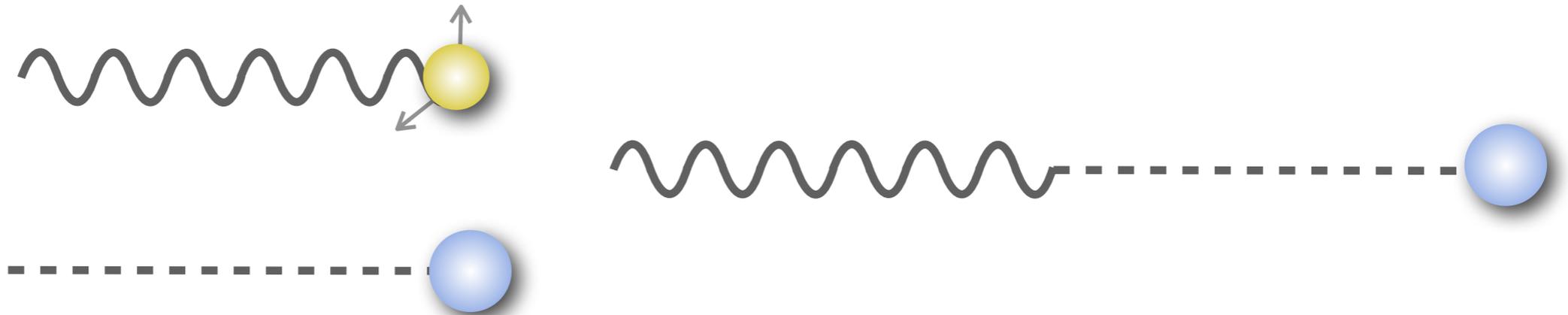
☕ Questo spiega perchè l'elettrodinamica massiva è rinormalizzabile!

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m^2(A_\mu - \partial_\mu\phi)(A^\mu - \partial^\mu\phi) = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} + \frac{m^2}{2}B_\mu B^\mu$$



Meccanismo di Stueckelberg (1938)

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{m^2}{2}A^\mu A_\nu + \frac{1}{2}(\partial_\mu\phi)(\partial^\mu\phi) - mA_\mu\partial^\mu\phi$$



☕ Elettromagnetismo con massa ed un campo scalare senza massa

☕ la gauge invarianza è ristabilita $A^\mu \rightarrow A^\mu + \partial^\mu\chi$ $\phi \rightarrow \phi + m\chi$

☕ Il fotone ha due stati di polarizzazione e la teoria è rinormalizzabile

☕ Il campo scalare può essere riassorbito nel fotone e dare luogo ad una teoria effettiva con un “nuovo fotone massivo” con tre stati di polarizzazione

$$A_\mu + \partial_\mu\phi \equiv B_\mu$$

☕ Questo spiega perchè l'elettrodinamica massiva è rinormalizzabile!

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m^2(A_\mu - \partial_\mu\phi)(A^\mu - \partial^\mu\phi) = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} + \frac{m^2}{2}B_\mu B^\mu$$



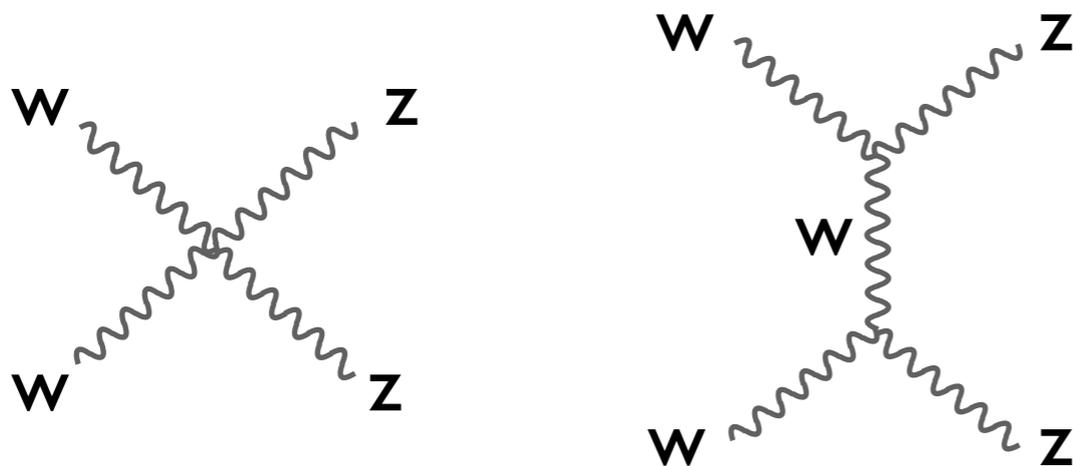
Meccanismo di Higgs



- ☕ La massa delle particelle elementari è dovuta alla presenza di un campo uniforme (che pervade tutto lo spazio) che interagisce con esse.
- ☕ Il fotone non sente l'influenza di questo campo, i bosoni mediatori dell'interazione debole e la materia ne risentono in modo diverso ed acquistano massa!
- ☕ I bosoni intermedi dell'interazione debole sono 3 (W^+ , W^- , Z_0): un meccanismo che dà loro massa deve prevedere l'aggiunta di 3 g.d.l. al modello e conservare tutte le simmetrie.



- ☕ I tre bosoni intermedi possono interagire fra di loro ma la loro sezione d'urto viola l'unitarietà. Il problema è legato al grado di libertà longitudinale dei bosoni massivi!



$$\sigma(WW \rightarrow ZZ) \propto E^2$$

La particella di Higgs



È necessaria una quarta particella descritta da un campo scalare “h”, il bosone di Higgs che si accoppi ai bosoni intermedi e ai fermioni in modo proporzionale alla loro massa affinché l’unitarietà non sia violata a livello perturbativo!

Questa particella emerge naturalmente nel contesto del meccanismo di Higgs: rottura spontanea delle simmetrie del modello standard. Il suo potenziale è tale da determinare la rottura spontanea!

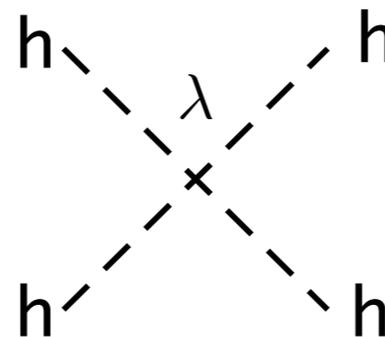
La sua massa dipende da due parametri ma solo uno è misurabile,

$$m_h = \sqrt{2\lambda v^2}$$

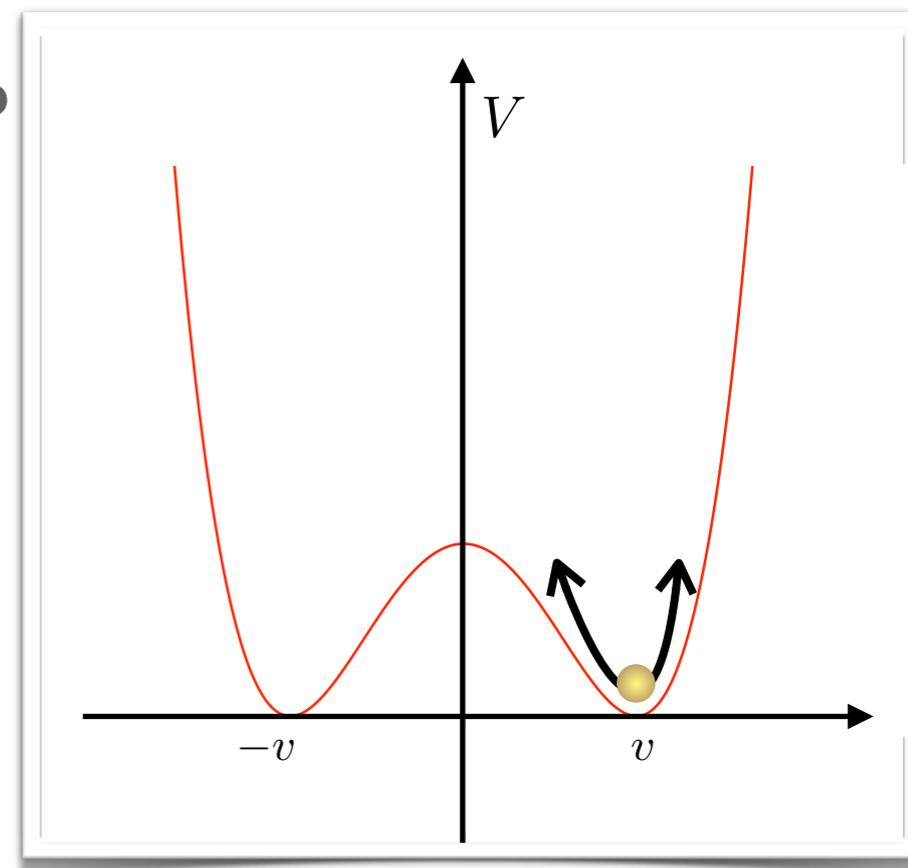
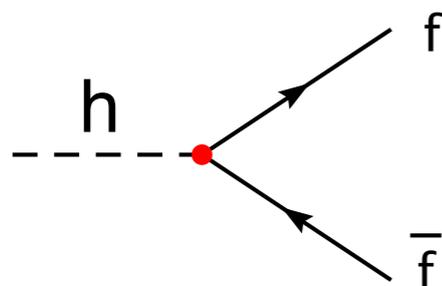
$$v = 246 \text{ GeV}$$

Storicamente v è misurato nel decadimento del muone

Il parametro λ determina l’accoppiamento dell’Higgs con sè stesso e la forma del suo potenziale



$$y_f h \bar{\psi}_f \psi_f$$



Il meccanismo di Higgs dà massa ai fermioni e il bosone di Higgs si accoppia alla materia proporzionalmente alla massa osservata degli stessi fermioni

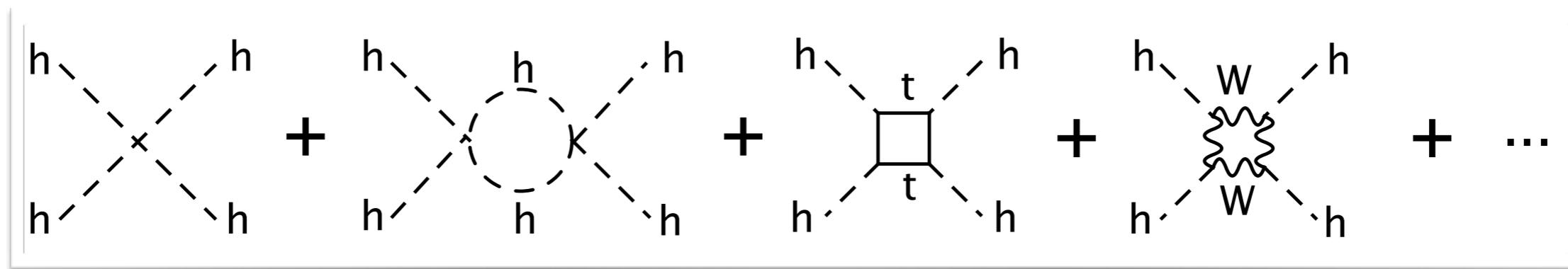
La massa dell'Higgs

Esistono vincoli e considerazioni teoriche che si possono fare in merito alla massa dell'Higgs!

La particella è necessaria per conservare l'unitarietà nell'urto fra bosoni intermedi

$$m_h \leq 850 \text{ GeV}$$

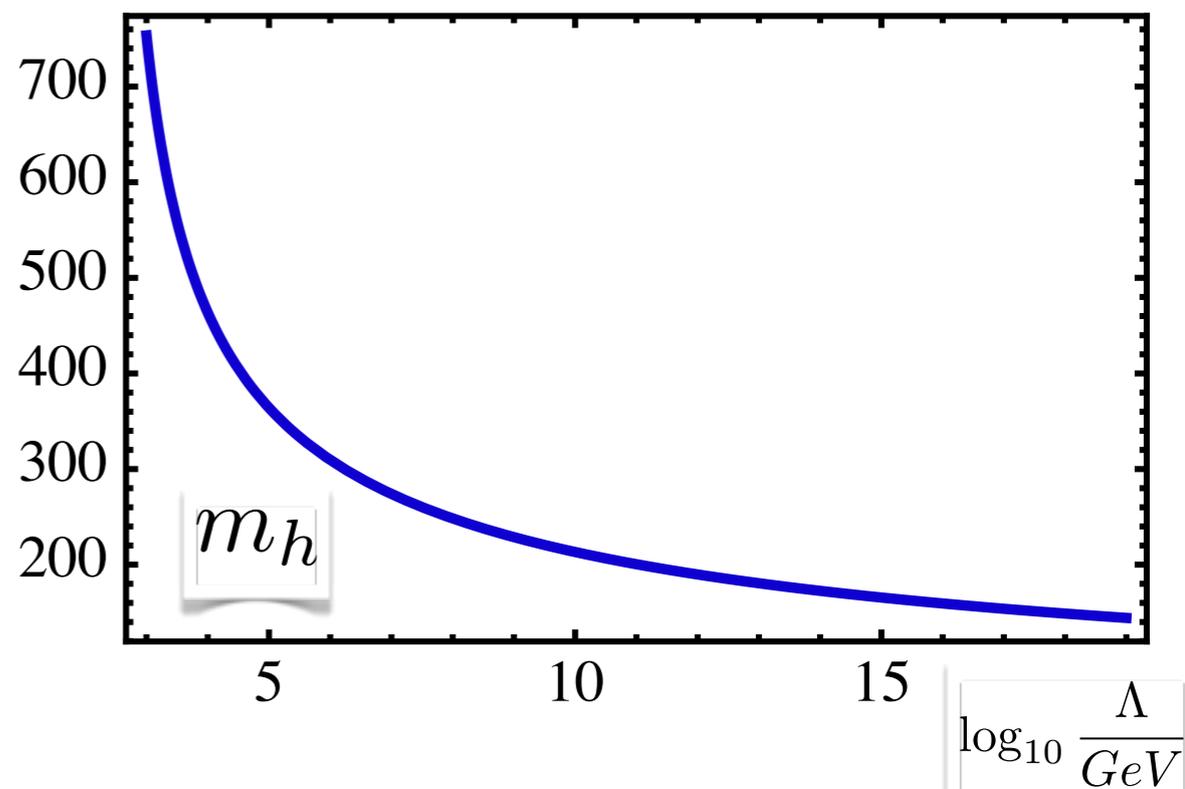
il self-coupling dell'Higgs (λ) varia al variare dell'energia



Per valori alti del self coupling (rispetto al coupling con il top ed i bosoni intermedi) esiste una scala di energia a cui esso diverge.

Questa scala fissa il limite di validità della teoria e permette di ottenere un limite superiore al valore della massa dell'Higgs:

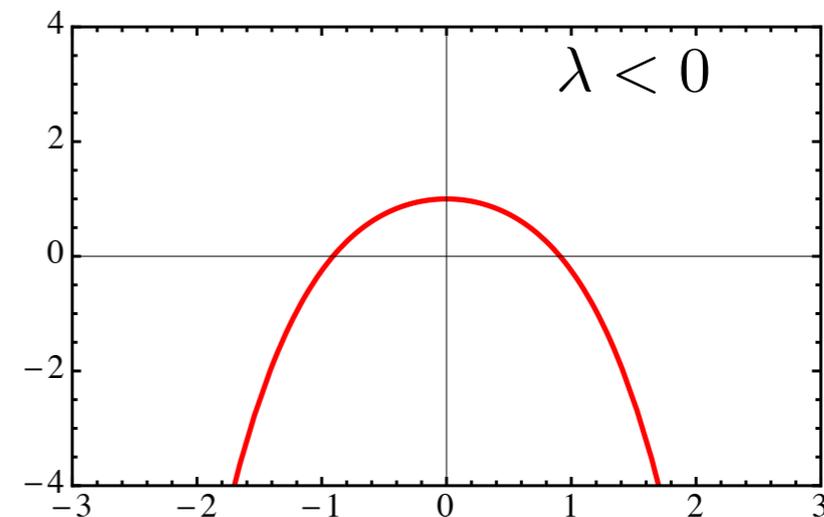
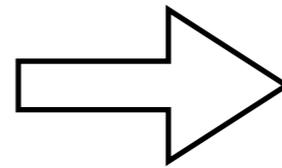
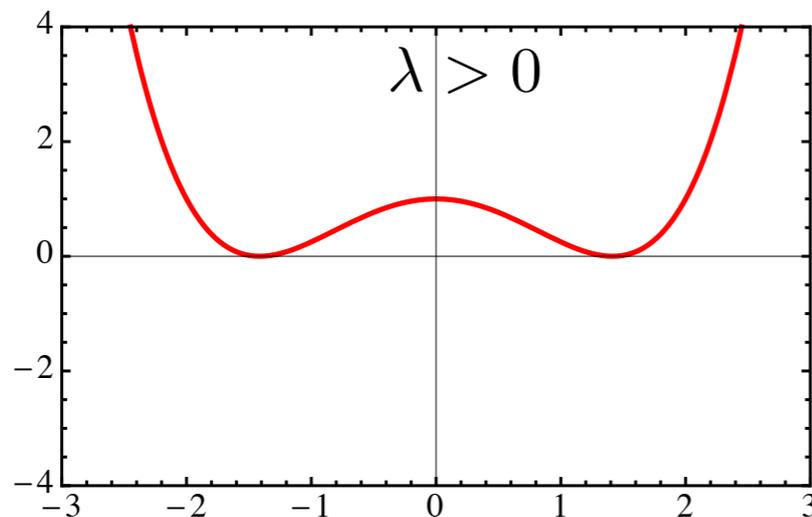
$$\lambda(\mu^2) = \frac{\lambda(v^2)}{1 - \frac{3\lambda(v^2)}{8\pi^2} \ln \frac{\mu^2}{v^2}} \rightarrow m_h^2 \leq \frac{8\pi^2 v^2}{3 \ln \frac{\Lambda^2}{v^2}}$$



La massa dell'Higgs

☕ Per valori bassi del self-coupling il contributo della massa del top al running lo fa diminuire all'aumentare dell'energia. Vi è quindi la possibilità che diventi negativo!

☕ Il potenziale dell'Higgs diventa instabile

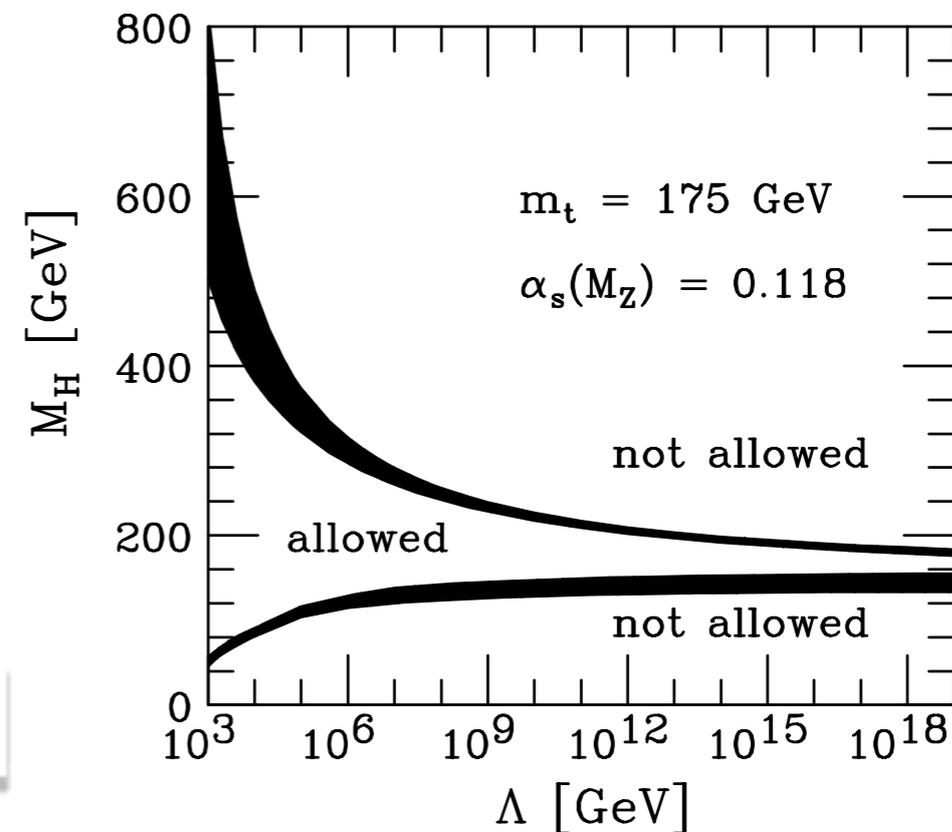


☕ L'instabilità si osserva ad una certa scala e si traduce in un vincolo sulla massa dell'Higgs:

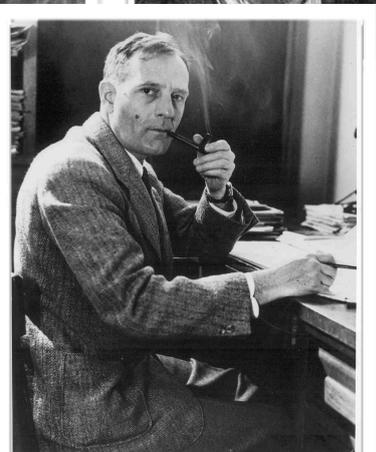
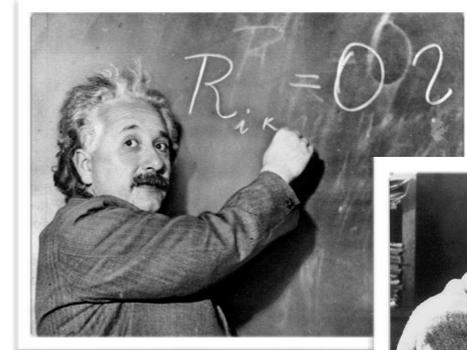
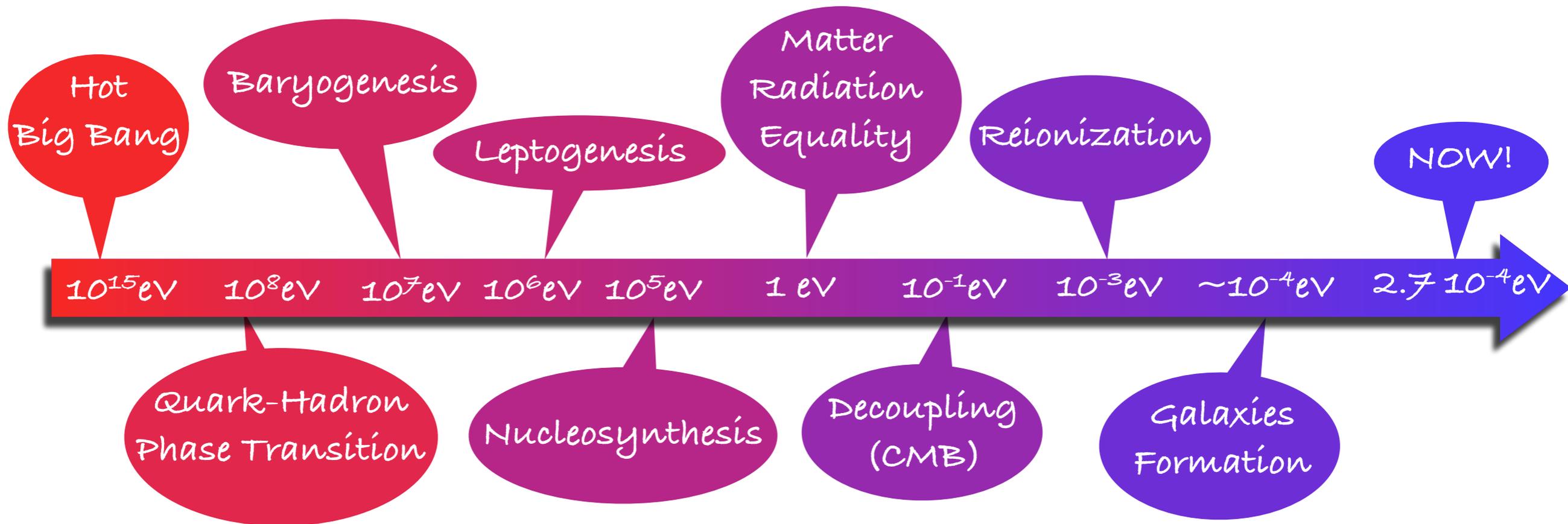
$$m_h > f\left(\frac{\Lambda}{v}\right)$$

☕ In particolare a due loop

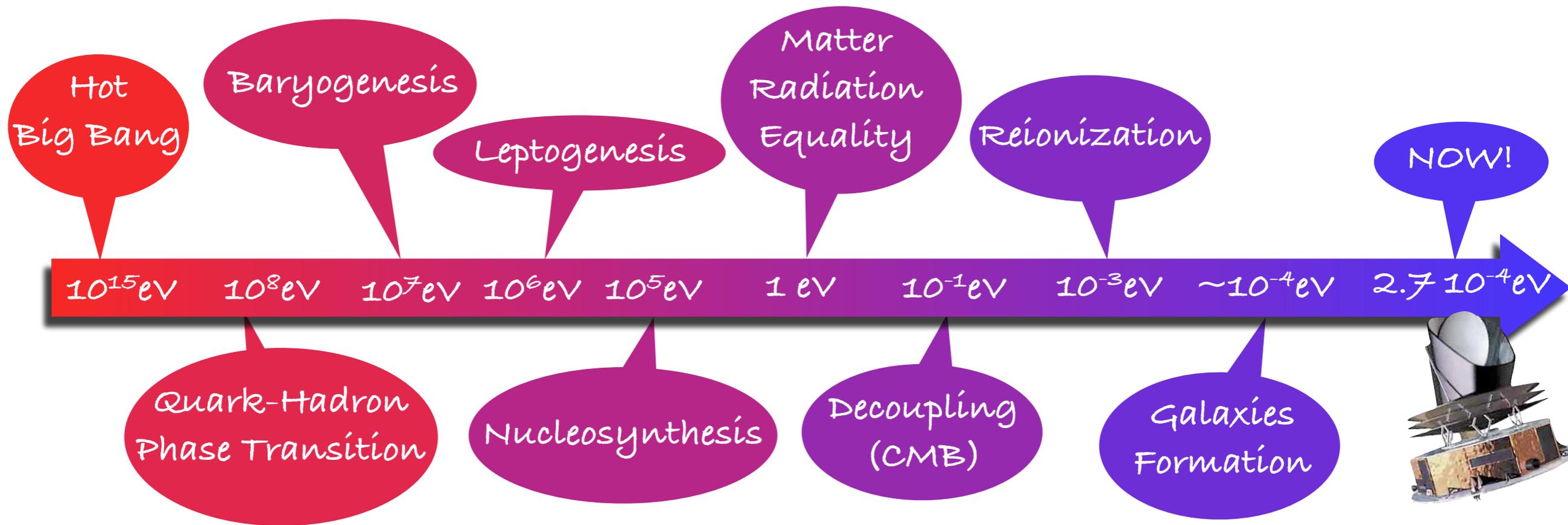
$$\Lambda \simeq M_{Pl} \simeq 10^{19} GeV \Rightarrow m_h > 130 - 140 GeV$$



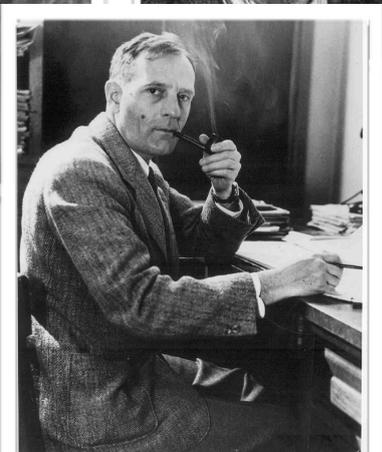
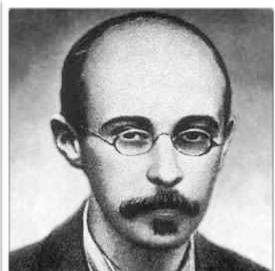
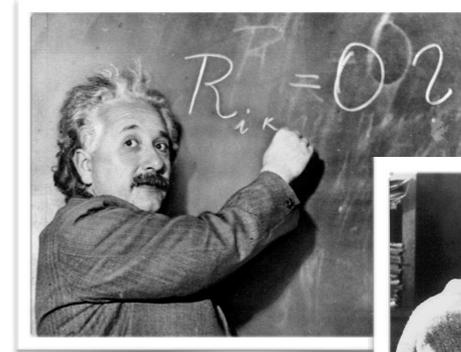
Breve Storia dell'universo



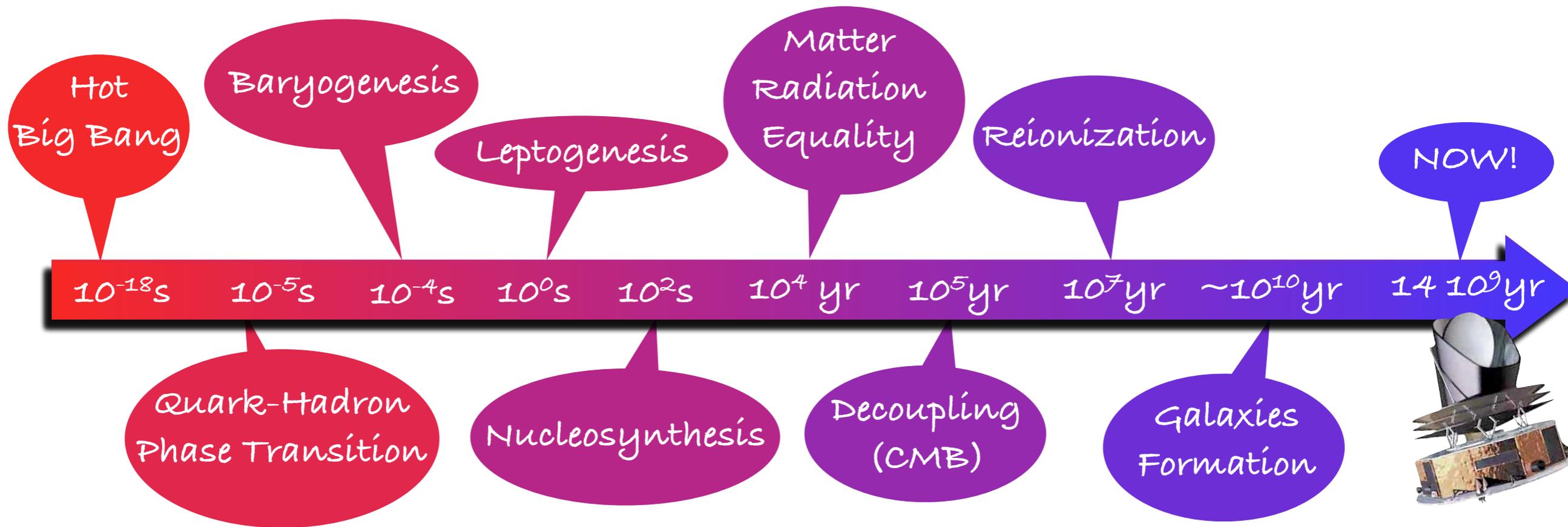
Breve Storia dell'universo



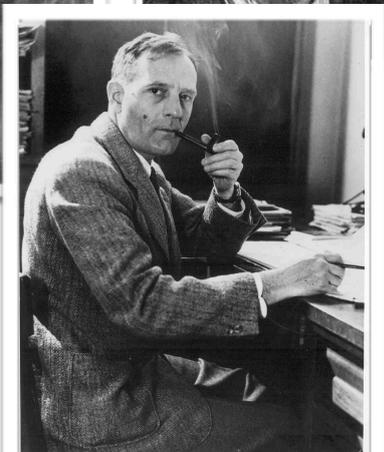
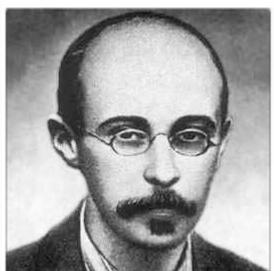
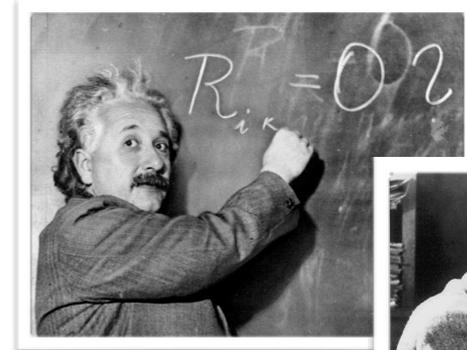
$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G_N}{3} (\rho_r + \rho_m) - \frac{K}{a^2}$$



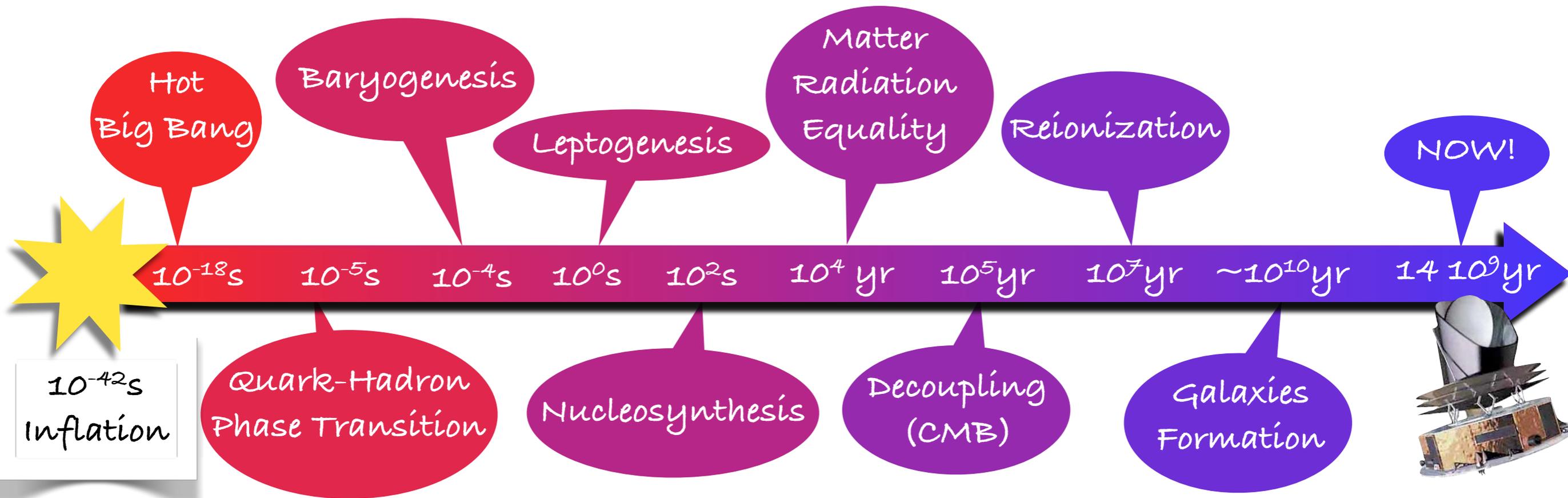
Breve Storia dell'universo



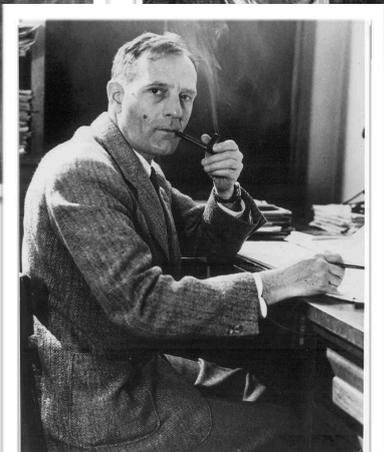
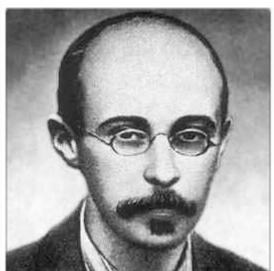
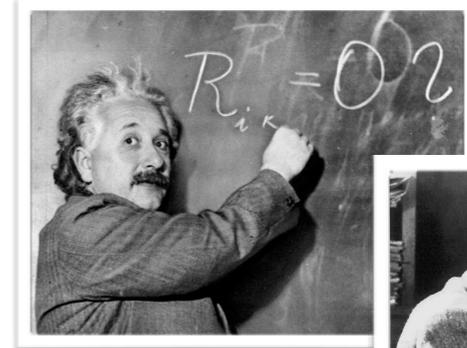
$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G_N}{3} (\rho_r + \rho_m) - \frac{K}{a^2}$$



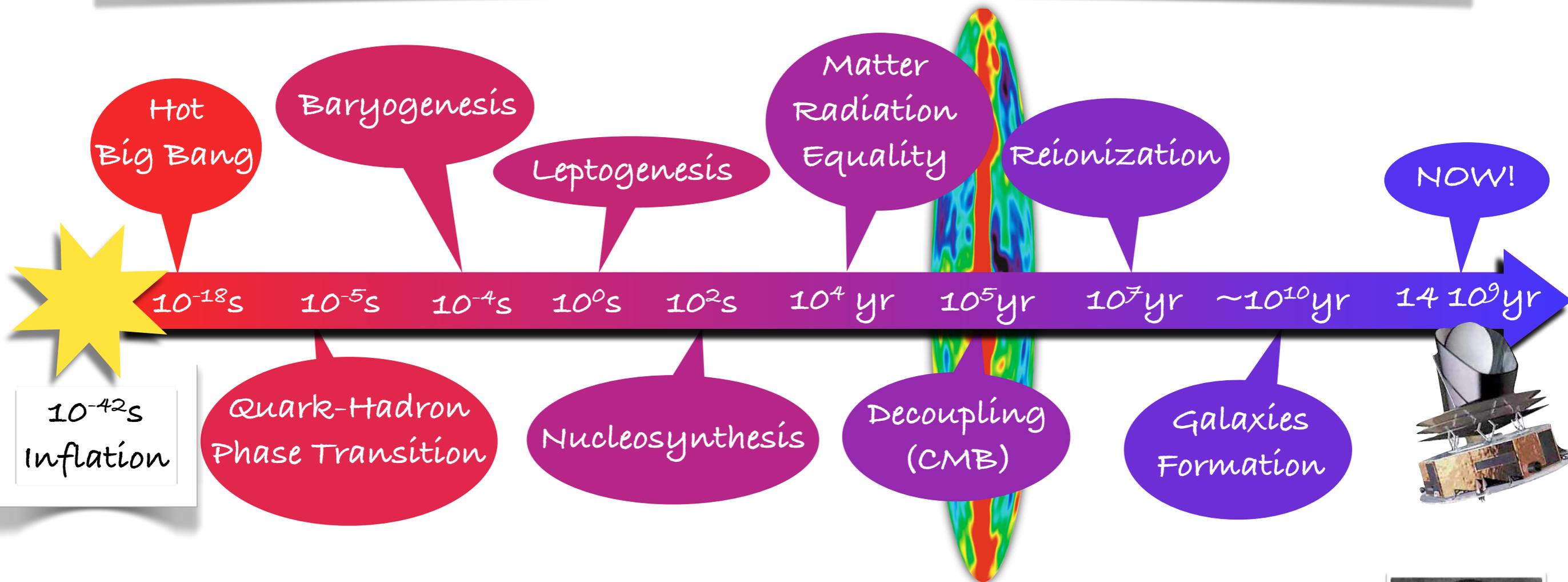
Breve Storia dell'universo



$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G_N}{3} (\rho_i + \rho_r + \rho_m) - \frac{K}{a^2}$$



Breve Storia dell'universo



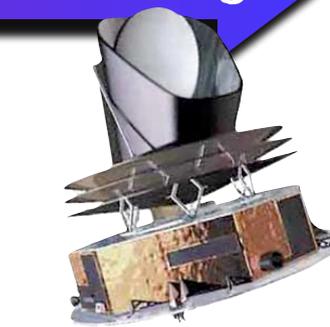
10⁻⁴²s
Inflation

Quark-Hadron
Phase Transition

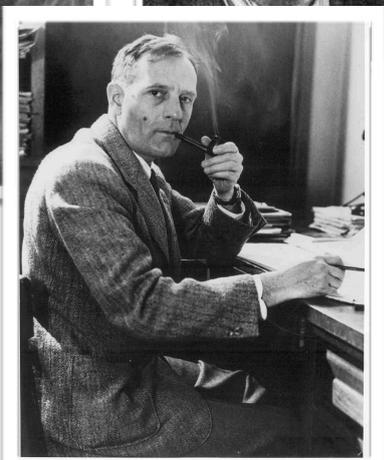
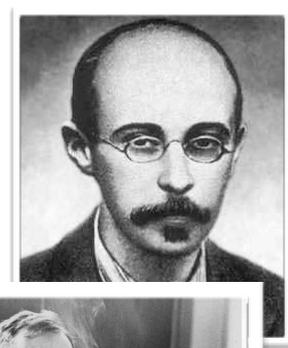
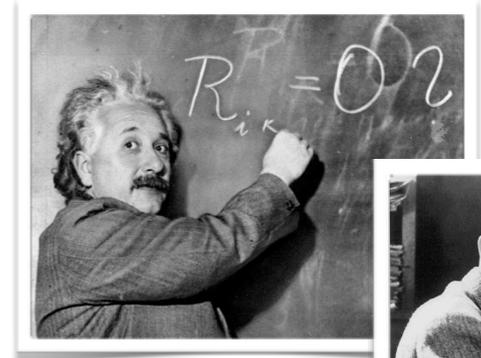
Nucleosynthesis

Decoupling
(CMB)

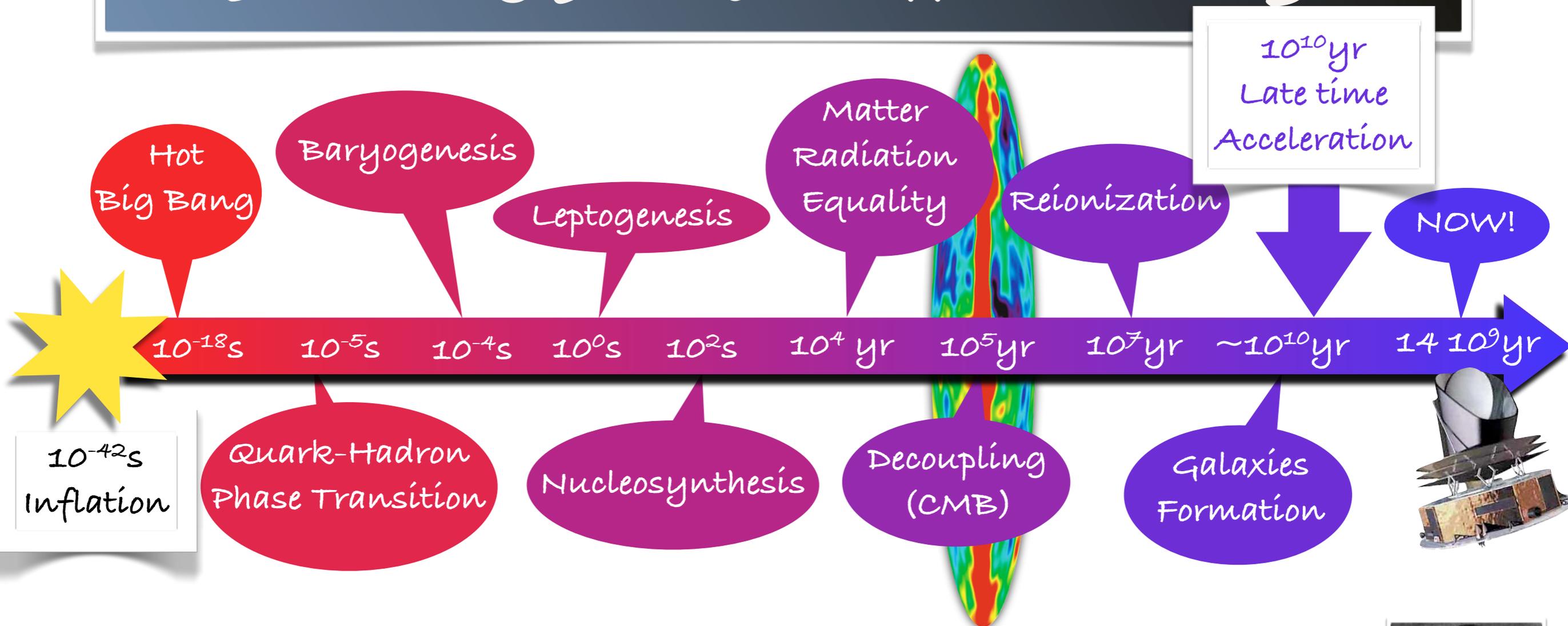
Galaxies
Formation



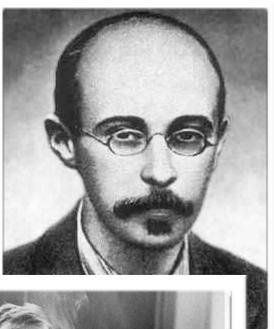
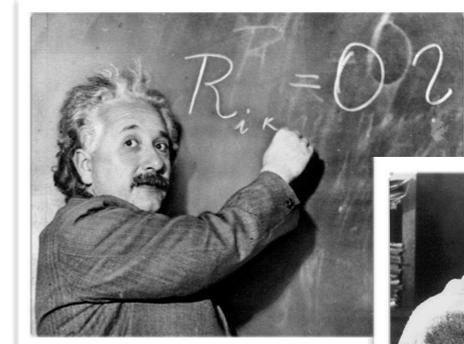
$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G_N}{3} (\rho_i + \rho_r + \rho_m) - \frac{K}{a^2}$$



Breve Storia dell'universo

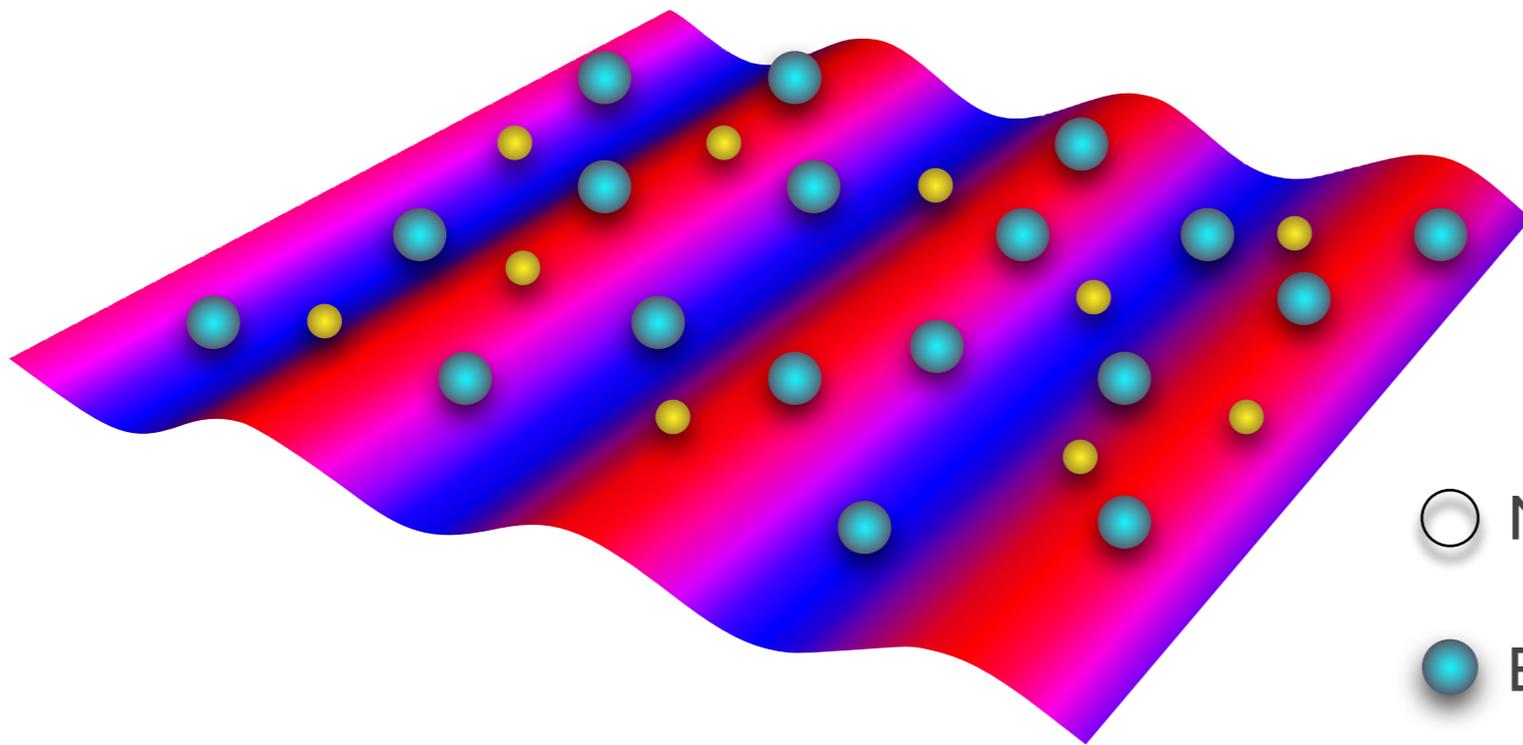


$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G_N}{3} (\rho_i + \rho_r + \rho_m + \rho_\Lambda) - \frac{K}{a^2}$$



Lo spettro del CMB

- ☛ La radiazione cosmica di fondo osservata da Planck è una fotografia dell'Universo quando era 1100 volte più piccolo
- ☛ Fondo microonde non è osservabile ad occhio nudo
- ☛ Disomogeneità amplificate di 10^5 volte
- ☛ I picchi rappresentano i nodi/antinodi delle onde acustiche stazionarie che si formano dopo il Big Bang



Onde Acustiche Barioniche

Pressione
Fotoni
Repulsiva



Gravità
Attrattiva

- Materia Oscura
- Elettroni e Barioni
- Fotoni

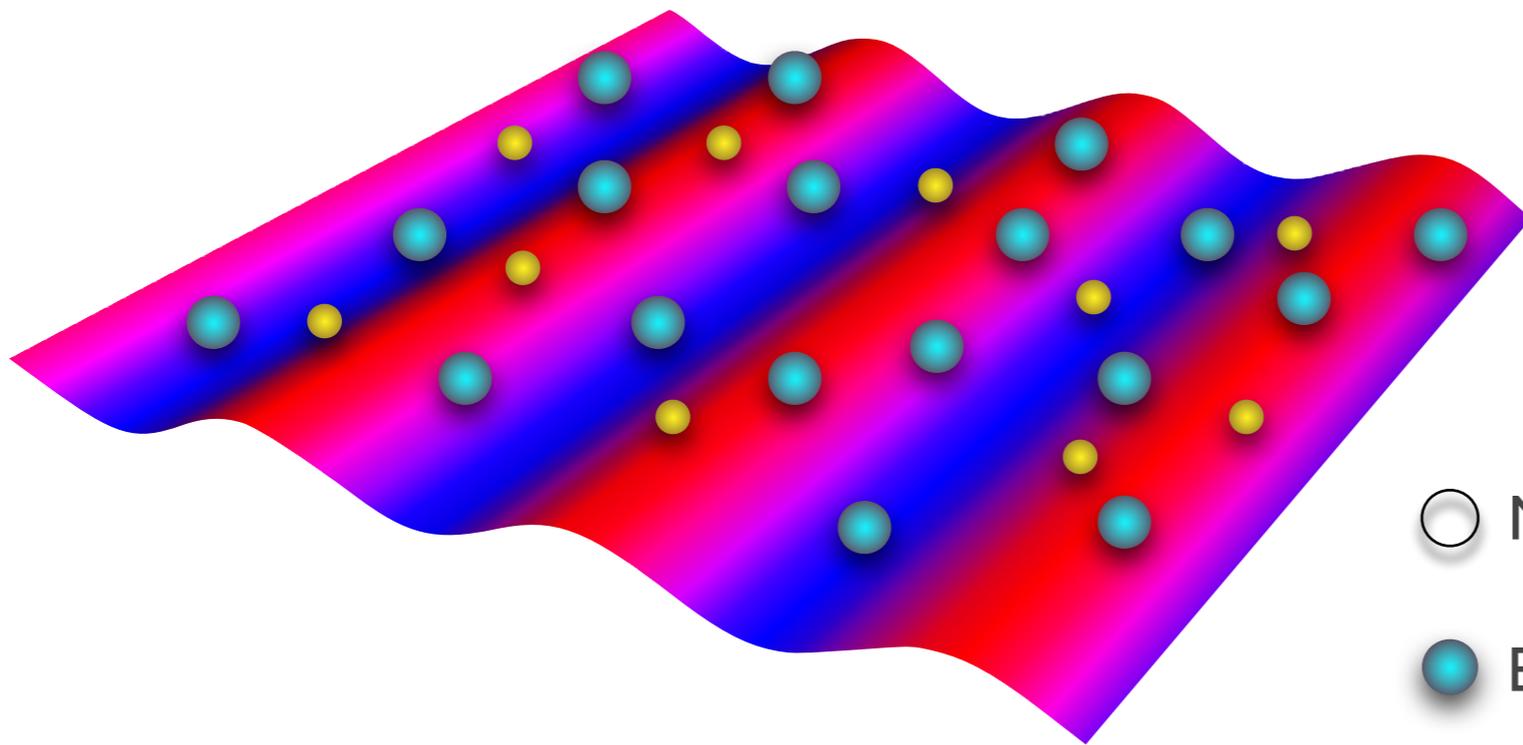
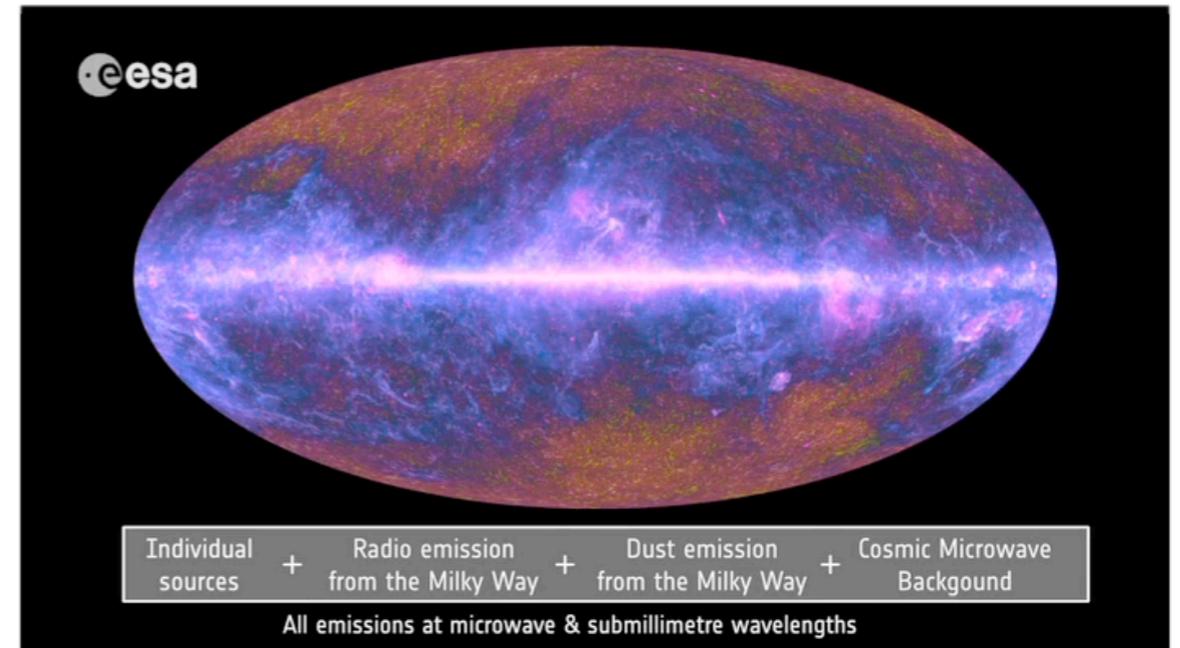
Lo spettro del CMB

La radiazione cosmica di fondo osservata da Planck è una fotografia dell'Universo quando era 1100 volte più piccolo

Fondo microonde non è osservabile ad occhio nudo

Disomogeneità amplificate di 10^5 volte

I picchi rappresentano i nodi/antinodi delle onde acustiche stazionarie che si formano dopo il Big Bang



Onde Acustiche Barioniche

Pressione
Fotoni
Repulsiva



Gravità
Attrattiva

○ Materia Oscura

● Elettroni e Barioni

● Fotoni

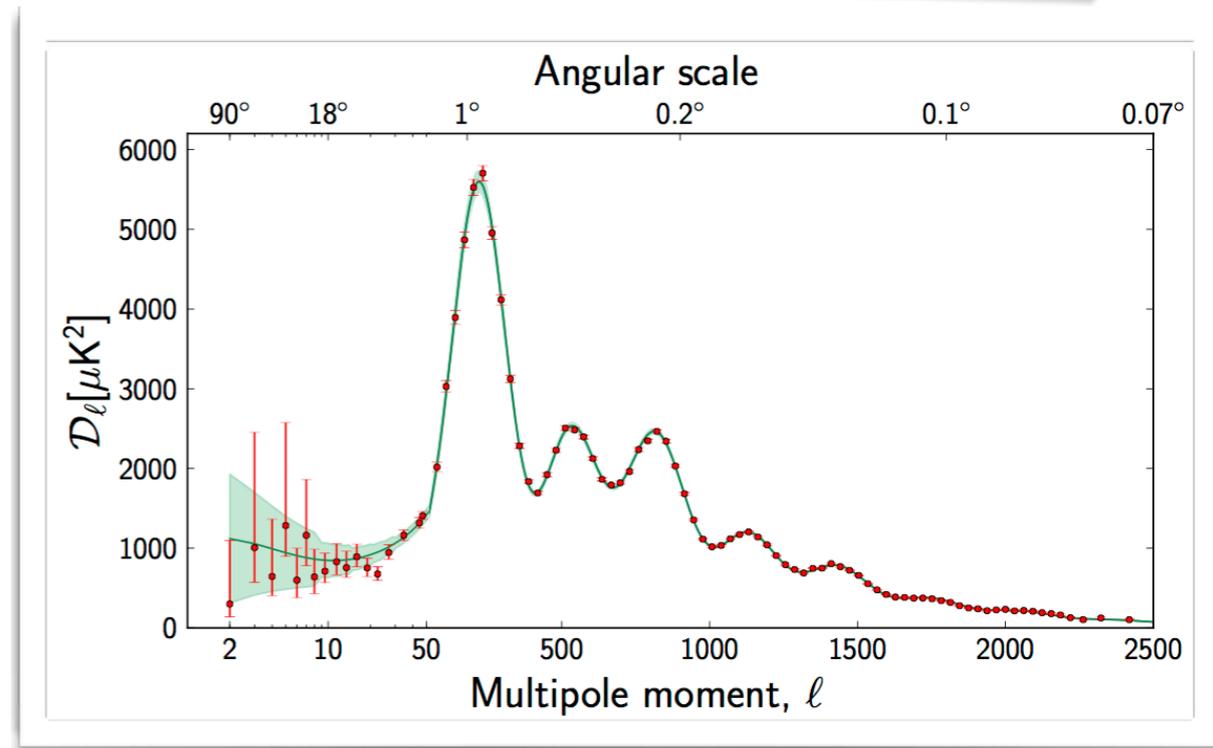
Lo spettro del CMB

La radiazione cosmica di fondo osservata da Planck è una fotografia dell'Universo quando era 1100 volte più piccolo

Fondo microonde non è osservabile ad occhio nudo

Disomogeneità amplificate di 10^5 volte

I picchi rappresentano i nodi/antinodi delle onde acustiche stazionarie che si formano dopo il Big Bang

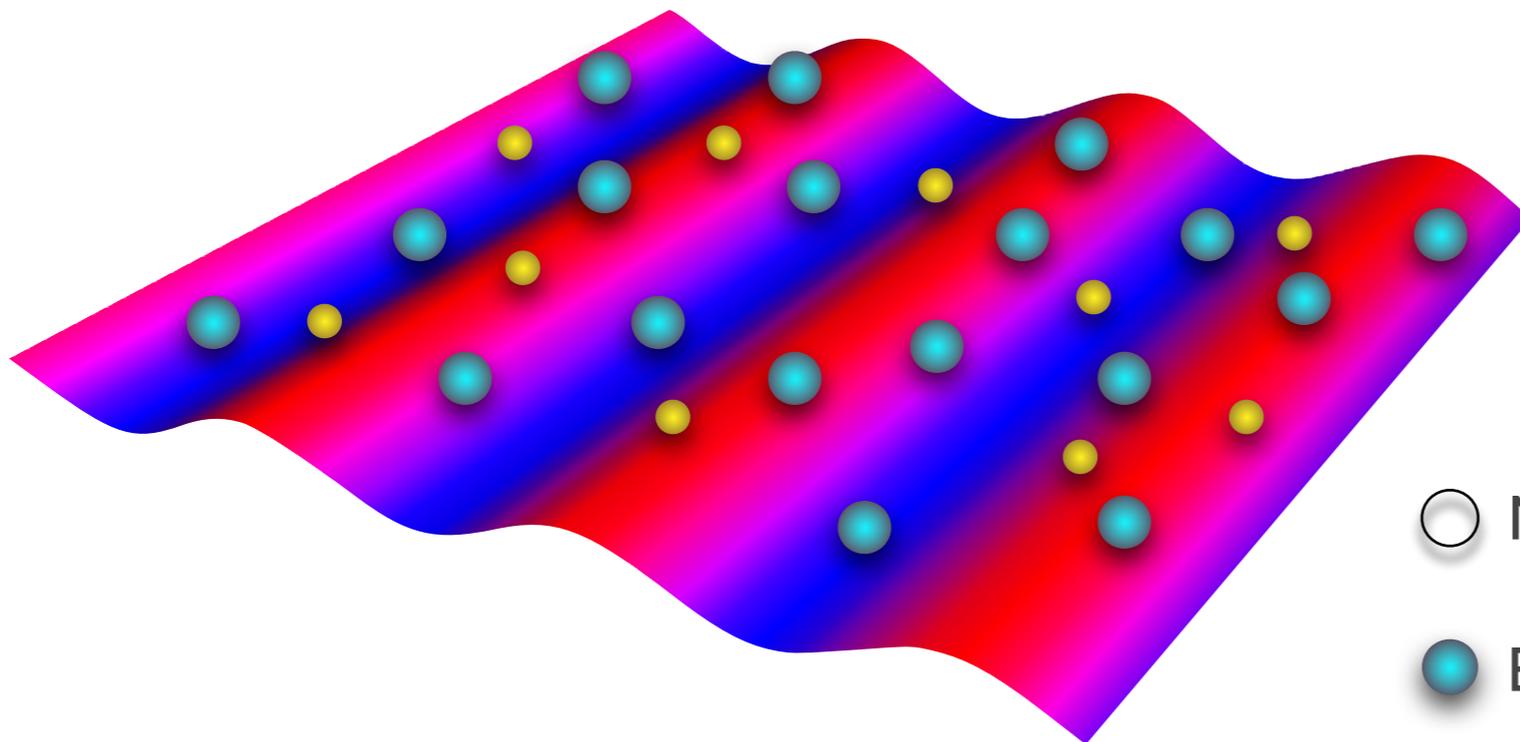


Onde Acustiche Barioniche

Pressione
Fotoni
Repulsiva



Gravità
Attrattiva



○ Materia Oscura

● Elettroni e Barioni

● Fotoni

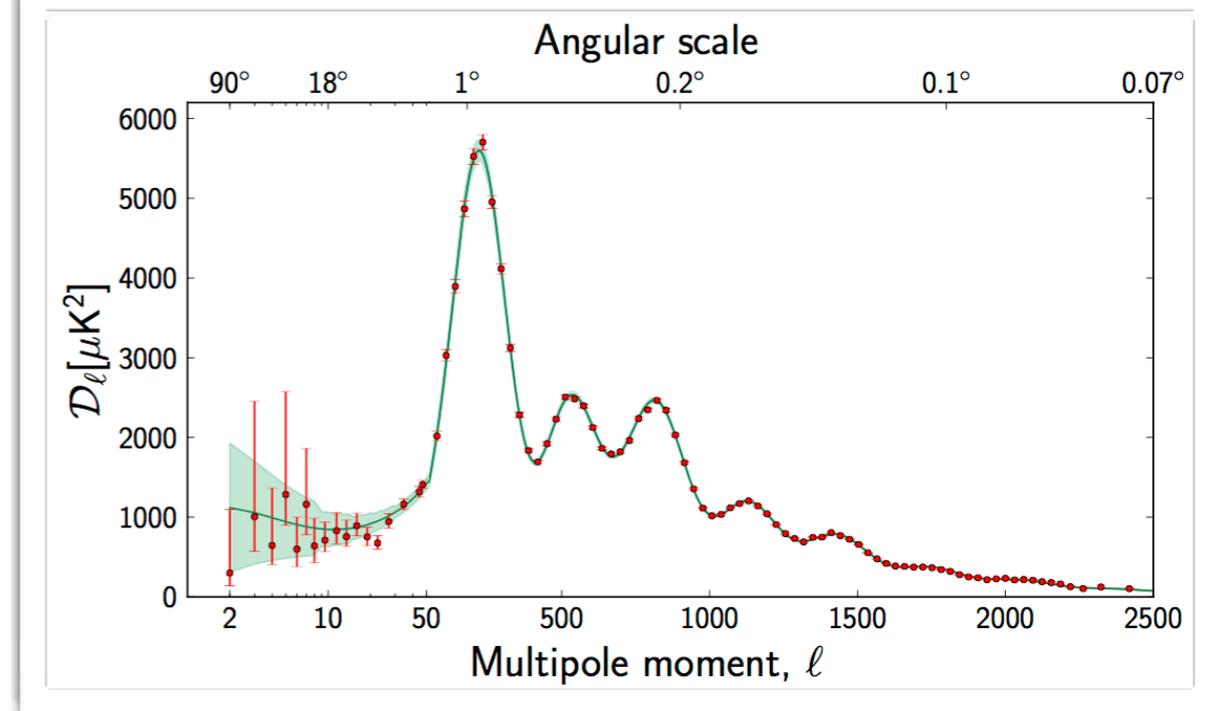
Lo spettro del CMB

La radiazione cosmica di fondo osservata da Planck è una fotografia dell'Universo quando era 1100 volte più piccolo

Fondo microonde non è osservabile ad occhio nudo

Disomogeneità amplificate di 10^5 volte

I picchi rappresentano i nodi/antinodi delle onde acustiche stazionarie che si formano dopo il Big Bang

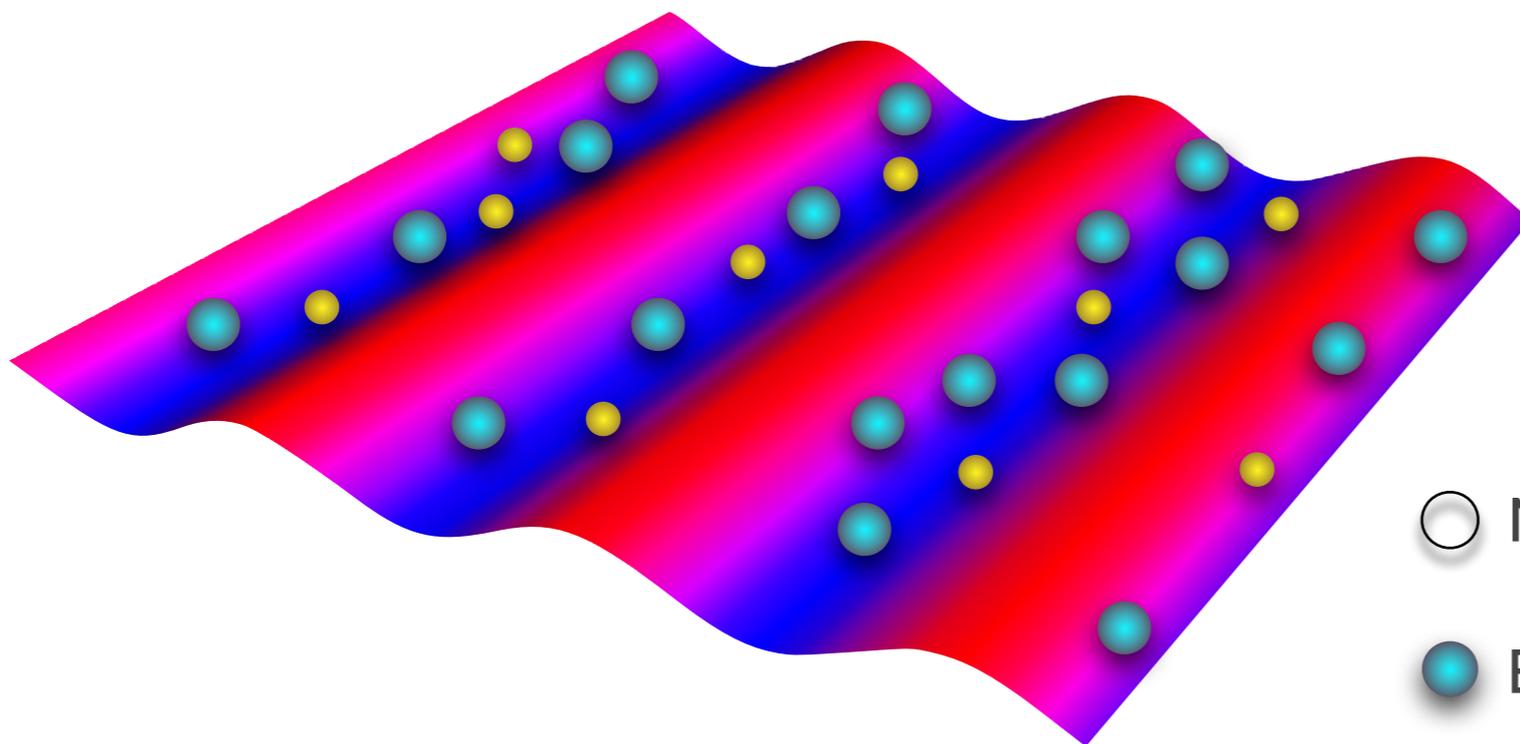


Onde Acustiche Barioniche

Pressione
Fotoni
Repulsiva



Gravità
Attrattiva



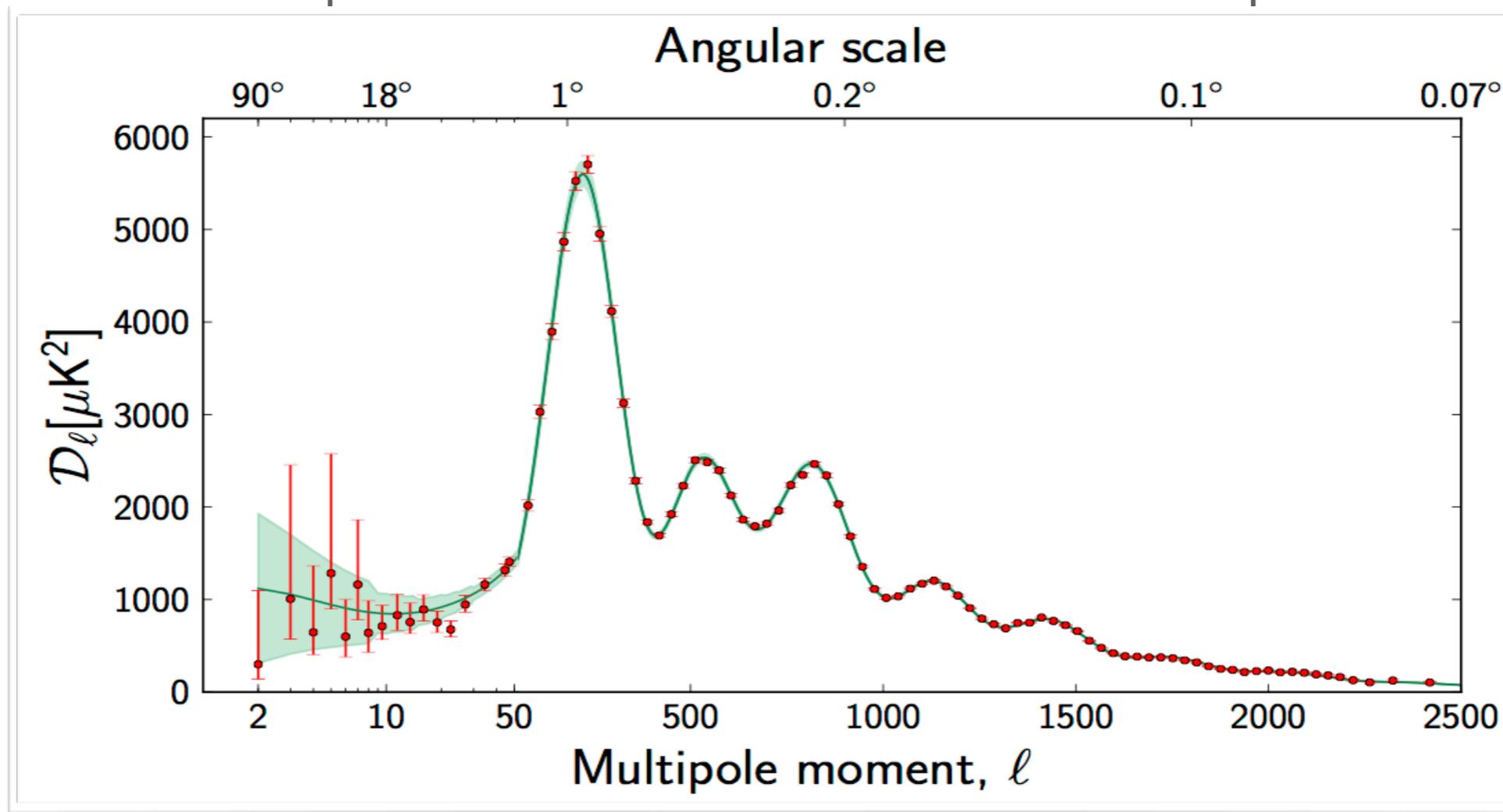
○ Materia Oscura

● Elettroni e Barioni

● Fotoni

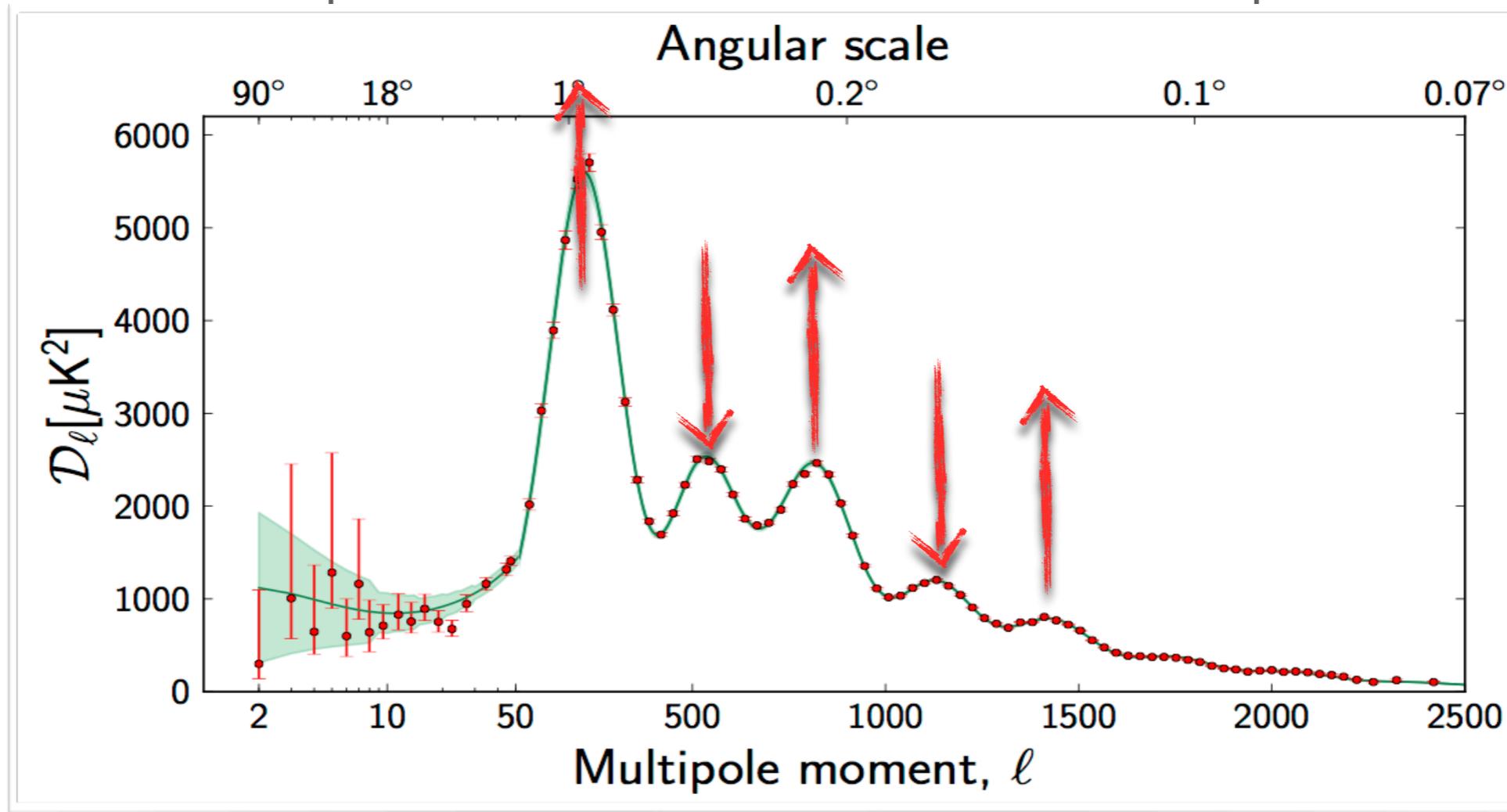
Picchi Acustici

- Le oscillazioni acustiche sono sostenute dalla pressione dei fotoni fino al decoupling ($T=3000$ K)
- La posizione e la forma dei picchi dipende sensibilmente:
 - dalla distribuzione iniziale delle disomogeneità (inflazione)
 - dalla velocità di propagazione delle onde acustiche $c_s \simeq c/\sqrt{3}$
 - dalla densità di barioni e di materia oscura
 - dalla velocità di espansione dell'Universo e dalla sua curvatura spaziale



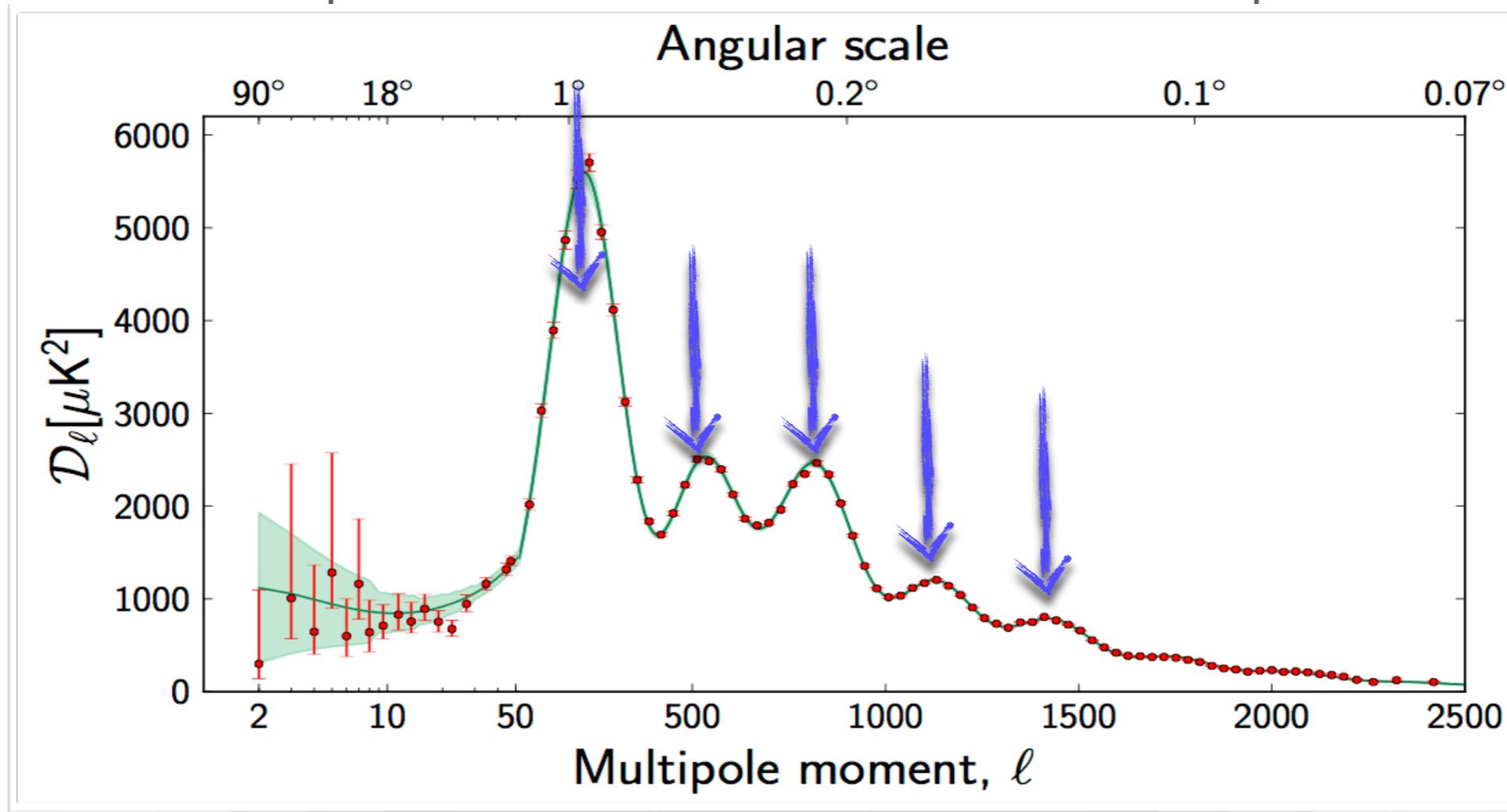
Picchi Acustici

- Le oscillazioni acustiche sono sostenute dalla pressione dei fotoni fino al decoupling ($T=3000$ K)
- La posizione e la forma dei picchi dipende sensibilmente:
 - dalla distribuzione iniziale delle disomogeneità (inflazione)
 - dalla velocità di propagazione delle onde acustiche $c_s \simeq c/\sqrt{3}$
 - dalla densità di barioni e di materia oscura
 - dalla velocità di espansione dell'Universo e dalla sua curvatura spaziale



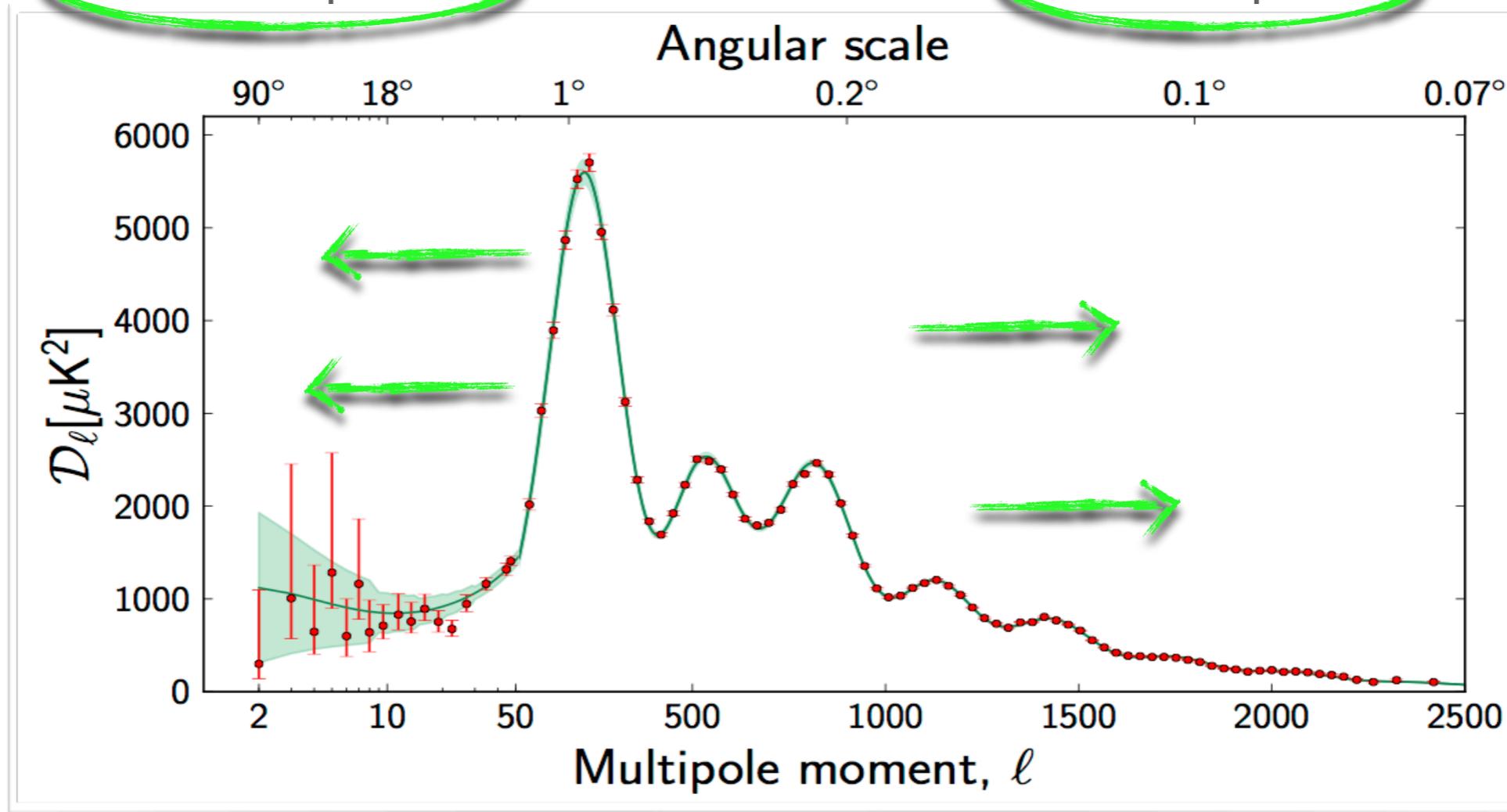
Picchi Acustici

- Le oscillazioni acustiche sono sostenute dalla pressione dei fotoni fino al decoupling ($T=3000$ K)
- La posizione e la forma dei picchi dipende sensibilmente:
 - dalla distribuzione iniziale delle disomogeneità (inflazione)
 - dalla velocità di propagazione delle onde acustiche $c_s \simeq c/\sqrt{3}$
 - dalla densità di barioni e di materia oscura
 - dalla velocità di espansione dell'Universo e dalla sua curvatura spaziale

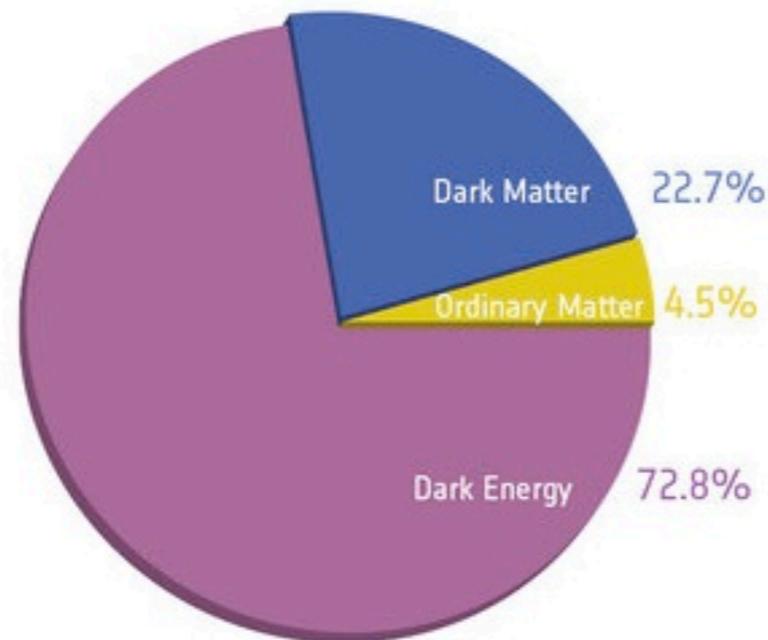


Picchi Acustici

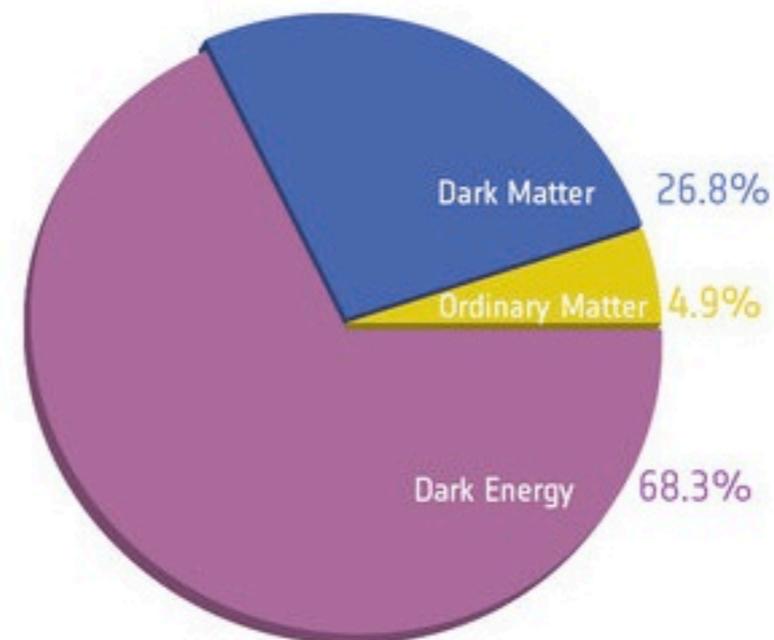
- Le oscillazioni acustiche sono sostenute dalla pressione dei fotoni fino al decoupling ($T=3000$ K)
- La posizione e la forma dei picchi dipende sensibilmente:
 - dalla distribuzione iniziale delle disomogeneità (inflazione)
 - dalla velocità di propagazione delle onde acustiche $c_s \simeq c/\sqrt{3}$
 - dalla densità di barioni e di materia oscura
 - dalla velocità di espansione dell'Universo e dalla sua curvatura spaziale



Modello Lambda CDM



Before Planck



After Planck

☛ Alcuni problemi aperti:

- ☛ perdita di potenza a grandi scale,
- ☛ valore misurato di H_0 non compatibile con i risultati di Hubble,
- ☛ apparenti anisotropie a grandi scale,
- ☛ discrepanza del 2% rispetto all'altezza del primo picco del CMB misurato da WMAP,
- ☛ anomalie ad $l \sim 1800$.

Inflazione



- ☛ Periodo di espansione accelerata prima del Big Bang Caldo
- ☛ La gravità è comunemente associata ad una forza di tipo attrattivo, come è possibile che si realizzi un'espansione accelerata nell'Universo primordiale?
- ☛ Perché è necessaria?
- ☛ L'inflazione cosmica è stata ipotizzata nel 1980 da Alan Guth nel tentativo (riuscito!) di risolvere i problemi noti come il **problema dell'orizzonte** (o dell'omogeneità) e **della piattezza**
- ☛ Guth propose un meccanismo in grado di produrre un'accelerazione cosmica mediante un fluido esotico con pressione negativa. (!)
- ☛ L'accelerazione necessaria per risolvere i problemi dell'orizzonte e della piattezza determina un'espansione in grado di moltiplicare le dimensioni dell'Universo di $\sim 10^{26}$ volte!
- ☛ La dinamica dell'Inflazione oltre determinare una fase di espansione cosmica accelerata deve essere in grado di arrestarsi e generare le giuste condizioni iniziali per la successiva evoluzione dell'Universo...

Fluido a pressione negativa

☕ L'Universo evolve per l'effetto di un fluido.

$$dU = \delta Q - pdV$$

☕ Un fluido a pressione negativa ha un'energia che aumenta quando l'universo espande

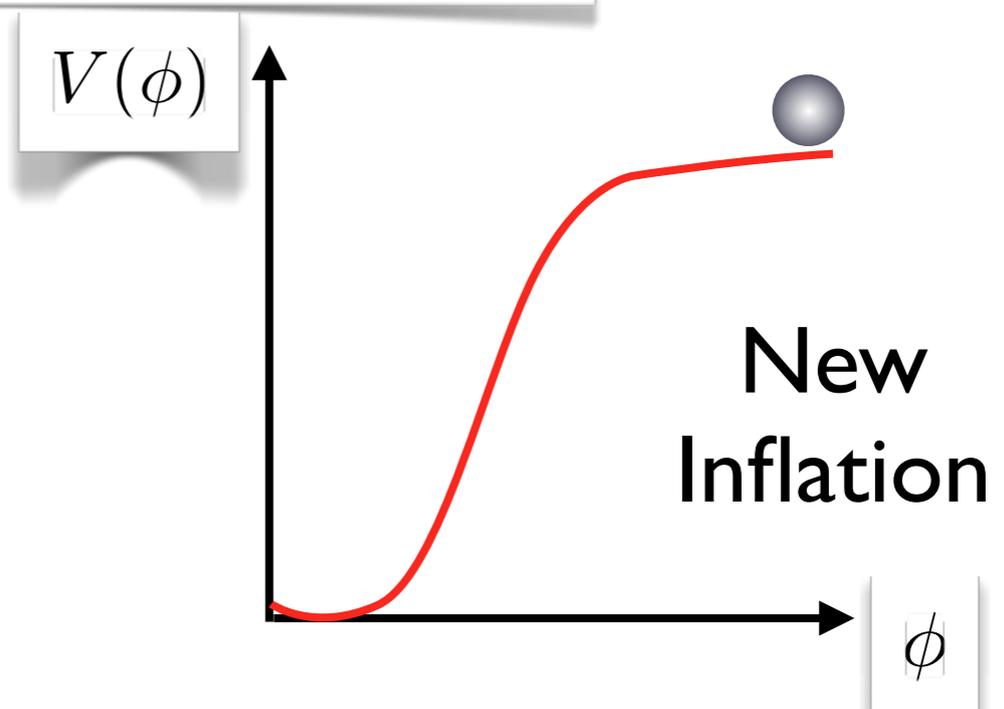
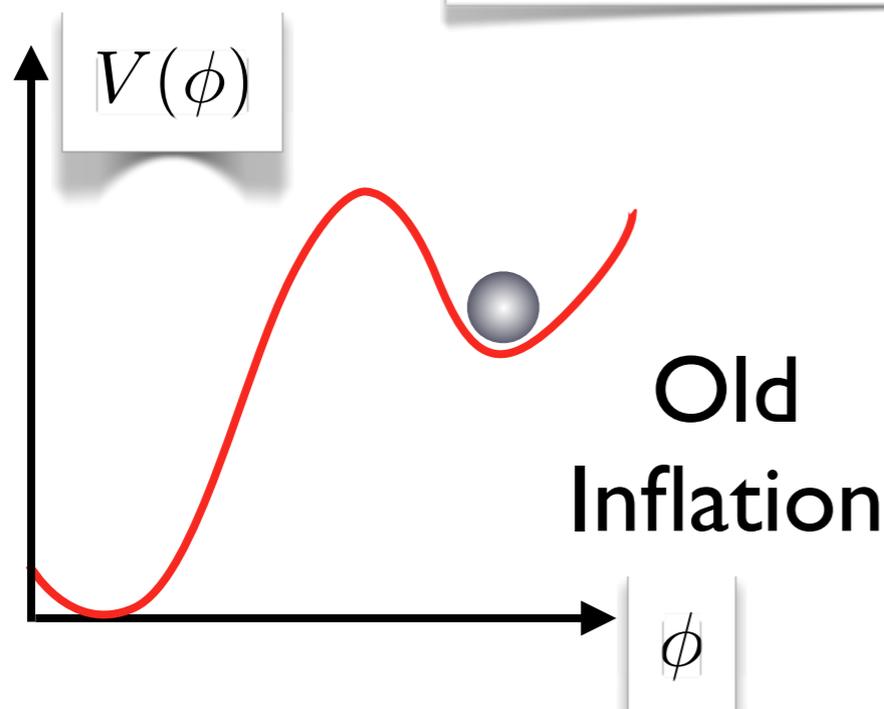
$$d(\rho a^3) = -pd(a^3)$$

☕ Un fluido di questo tipo ha una densità di energia che evolve abbastanza lentamente all'aumentare delle dimensioni dell'Universo

☕ Esempio: Costante Cosmologica $\rho = \Lambda = \text{const} \Rightarrow \rho_\Lambda = -p_\Lambda$

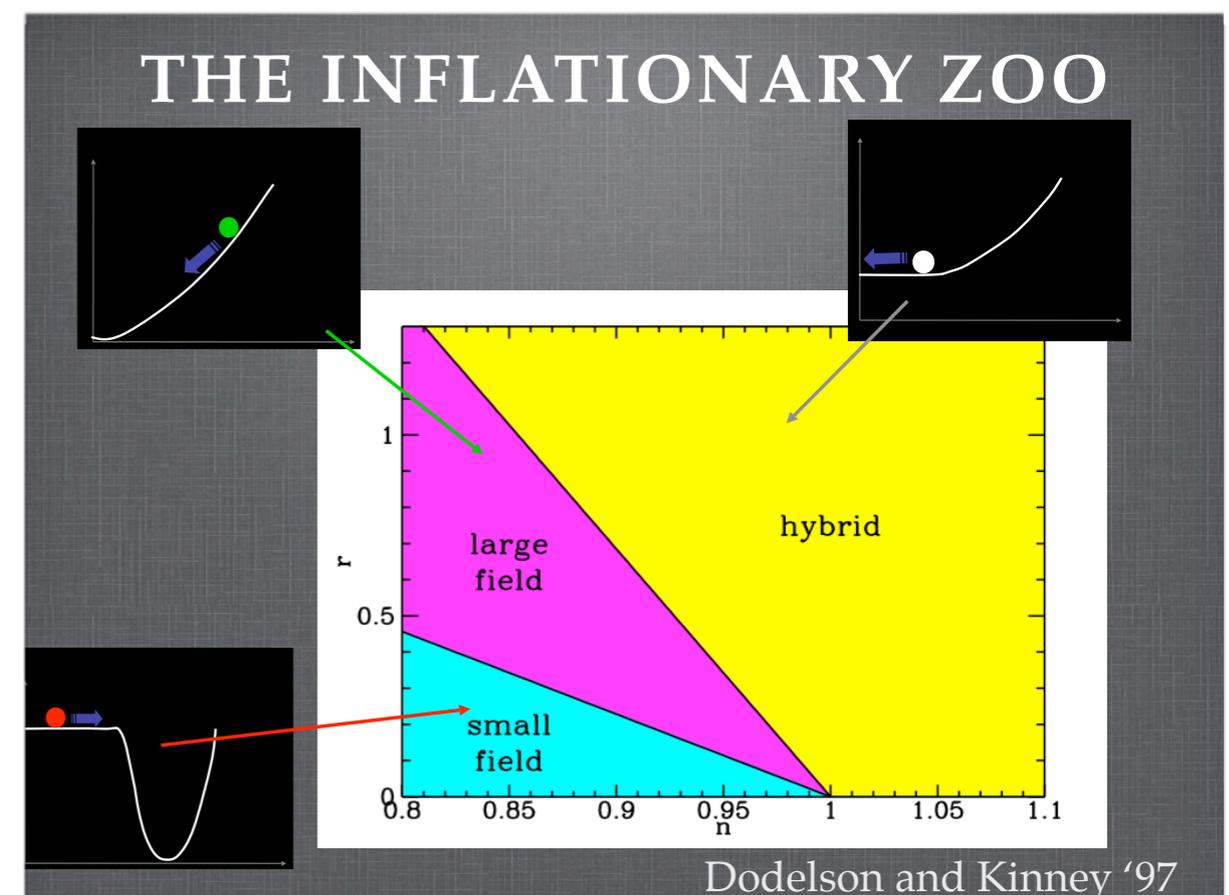
☕ Campo scalare omogeneo con energia cinetica trascurabile rispetto all'energia potenziale

$$\rho_i = T + V, \quad p_i = T - V \Rightarrow \rho_i \simeq -p_i$$



ZOO inflazionario

- ☕ Modellare un fluido che produca inflazione è piuttosto semplice. Lo smorzamento dinamico dovuto all'espansione dell'Universo è un tipico effetto della teoria di campo su spazi curvi. Potenziali con una "piattezza" opportuna fanno il resto..
- ☕ Ma il vero successo dell'inflazione è la sua capacità di spiegare con precisione l'origine dello spettro del CMB.
- ☕ Le fluttuazioni quantistiche dei campi esistenti durante il periodo inflazionario producono lo spettro delle disomogeneità del campo gravitazionale che si sono sviluppate dopo l'HBB per produrre la radiazione cosmica di fondo e le strutture su larga scala!
- ☕ Lo spettro del CMB rappresenta il vincolo, ad oggi, più stringente sui modelli di inflazione...
- ☕ Lo spettro quasi piatto delle perturbazioni cosmologiche primordiali si ottiene naturalmente mediante un meccanismo di **slow-roll**. Questo meccanismo è associato alla dinamica dell'inflatone con potenziali sufficientemente piatti.
- ☕ L'inflazione può anche produrre **onde gravitazionali...**



cosa e' un modello d'inflazione?

- Un modello d'inflazione è determinato da un'insieme di particelle (campi) con una dinamica ben definita (in genere fissata da un'azione)
- Un modello d'inflazione deve produrre un'espansione accelerata che duri almeno 60 e-folds (l'universo deve espandere di almeno 26 ordini di grandezza), produrre una spettro di perturbazioni scalari del campo gravitazionale ed onde gravitazionali primordiali compatibili con le osservazioni

4 parametri sono i
parametri da fittare

$P_{\mathcal{R}}$

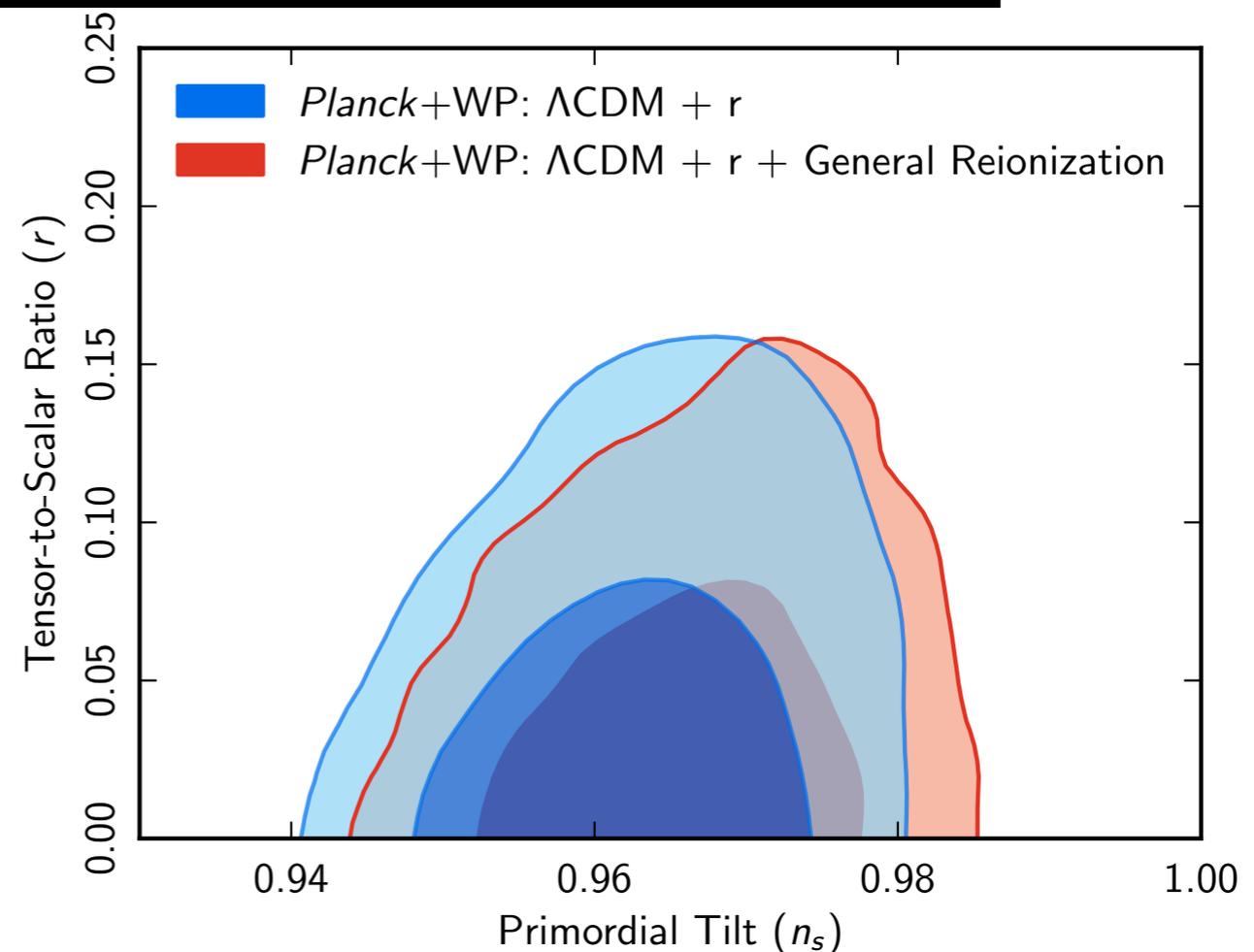
n_s

dn_s/dk

r

$$P_{\mathcal{R}}(k^*) = (2.445 \pm 0.096) \times 10^{-9}$$

- infine un modello d'inflazione deve contenere un meccanismo per il riscaldamento dell'Universo (**reheating**) al termine dell'espansione accelerata che produca le condizioni iniziali compatibili con i modelli consolidati di evoluzione basati sulla teoria del Big Bang Caldo!

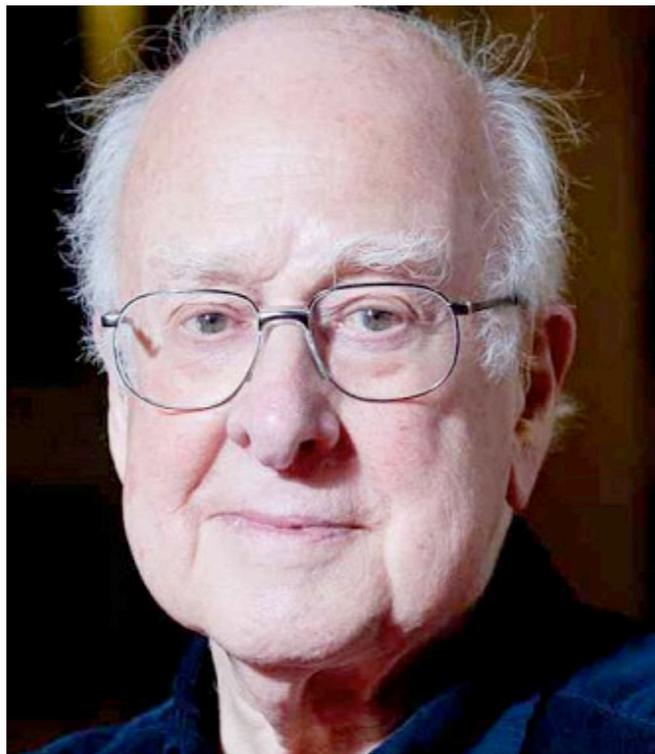


Higgs Inflation?

- ☛ Per ottenere inflazione si adotta un **campo scalare** detto **inflatone**.
- ☛ Questo campo può essere associato da altri campi scalari che permettano di produrre il corretto spettro delle perturbazioni e determinino la fine dell'inflazione.
- ☛ **Non è mai stata osservata alcuna particella scalare...fino ad un anno fa!**

Higgs Inflation?

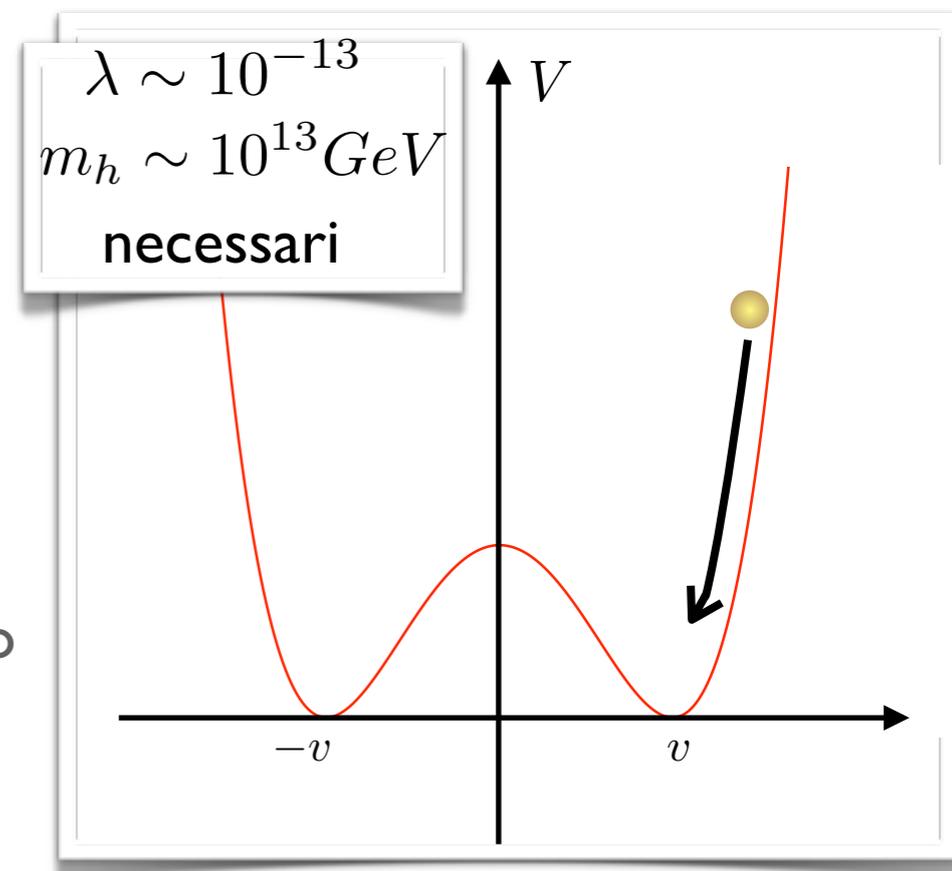
- ☛ Per ottenere inflazione si adotta un **campo scalare** detto **inflatone**.
- ☛ Questo campo può essere associato da altri campi scalari che permettano di produrre il corretto spettro delle perturbazioni e determinino la fine dell'inflazione.
- ☛ **Non è mai stata osservata alcuna particella scalare...fino ad un anno fa!**



Esiste una relazione fra la particella di Higgs e l'Inflatone?

1 TeV vs 10^{19} GeV

- ☕ Non è facile conciliare due modelli inventati per spiegare fenomeni a scale di energie così differenti! (16 ordini di grandezza!)
- ☕ Ora i dati di Planck forniscono vincoli ancora più stretti sui modelli di inflazione compatibili con le osservazioni!
- ☕ I vincoli sulla massa dell'Higgs derivanti dal polo di Landau e dalla stabilità sono stati estrapolati fino alla scala di Planck
- ☕ La massa osservata dell'Higgs ~ 125 GeV è compatibile con queste estrapolazioni
- ☕ Mediante alcune stime "rozze" è possibile concludere che l'Higgs del modello standard senza l'aggiunta di altri "ingredienti" non è in grado di produrre un'inflazione compatibile con le osservazioni
- ☕ Il potenziale dell'Higgs non è sufficientemente piatto!
- ☕ Questo fatto era già noto da diverso tempo ed è legato alla accoppiamento quartico dell'Higgs!



Gravità modificata

- ☛ L'accoppiamento quartico dell'inflatone non è un problema generale per i modelli inflazionari ma solo per quelli "minimali" in cui la gravità è descritta in modo convenzionale (Einstein)
- ☛ Nei modelli di gravità indotta in cui l'inflatone genera dinamicamente la costante di Newton (con un meccanismo analogo a quello di rottura spontanea della simmetria) i potenziali quartici non hanno problemi a fittare i dati del CMB!
 - ☛ **Phys.Lett.B681:383-386,2009, Phys.Rev.D81:123505,2010 di A.Cerioni, F. Finelli, A. Tronconi, G. Venturi**
- ☛ I primi modelli "viabili" di Inflazione con l'Higgs sfruttano questa caratteristica.
 - ☛ **F.L. Bezrukov and M. Shaposhnikov, Phys. Lett. B659 (2008)**
- ☛ Sono modelli non minimali in cui l'Higgs si accoppia in modo non minimale con la gravità (con lo scalare di curvatura) che ne determina una massa effettiva
- ☛ In questo modo alle energie dell'inflazione (grande curvatura) la sua dinamica è analoga a quella dei modelli di gravità indotta e la sua massa effettiva può essere abbastanza grande da generare lo spettro corretto delle perturbazioni cosmologiche
- ☛ Alle energie attuali la curvatura dell'Universo è trascurabile e la sua massa dell'ordine di 100 GeV!

Effetti Quantistici

Abbiamo già osservato come si possibile cambiare drammaticamente la forma del potenziale dell'Higgs tenendo conto degli effetti del gruppo di rinormalizzazione (stabilità)

Le correzioni quantistiche al valore della costante di auto-interazione (λ) sono molto importanti ma anche molto difficili da calcolare.

La forma del potenziale è molto sensibile a queste correzioni!

Diversi gruppi (tra cui A. Kamenshchik) hanno studiato il modello di B&S tenendo conto delle correzioni quantistiche al potenziale riuscendo ad ottenere, mediante diverse tecniche di rinormalizzazione, delle stime per la massa dell'Higgs molto vicine a 125 GeV.

In questi modelli esiste inoltre un problema legato alla necessità di un valore alto dell'accoppiamento non minimale $\xi \sim 10^4$

I vincoli per l'unitarietà determinano il cutoff della teoria:

$$\Lambda \lesssim \frac{M_P}{\xi}$$

Questo limite contraddice i vincoli trovati per ottenere l'inflazione:

$$h \gg M_P / \sqrt{\xi}$$

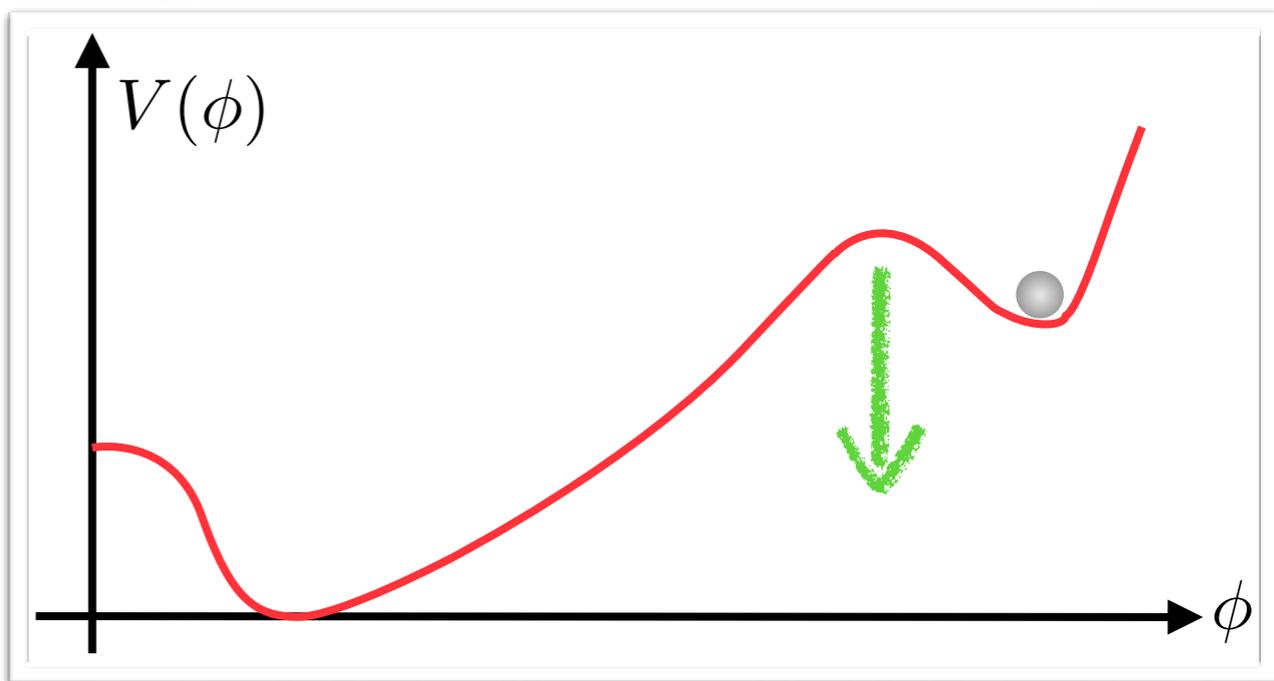


Effetti Quantistici

- Altri approcci (I. Masina, A. Notari) alla Higgs inflation evidenziano come un meccanismo tipo “Old Inflation” sia possibile a causa della presenza di un falso vuoto nel potenziale dell’Higgs alle scale dell’inflazione.
- Questo vuoto metastabile si ottiene solo in piccole regioni dello spazio dei parametri compatibili con gli attuali vincoli sulla massa del top e dell’Higgs.
- Il modelli di old inflation però devono contenere ulteriore fisica per poter realizzare l’inflazione (problema della “**graceful exit**”).
- La costante di Newton e quindi H dipendono dalla dinamica di un altro campo. Questo campo fa decrescere H . Inoltre esso genera lo spettro delle perturbazioni cosmologiche.
- Relatività generale ed Higgs accoppiato ad un altro campo che determina, dinamicamente, l’abbassamento della barriera di potenziale in cui è “intrappolato” l’Higgs.

$$\Gamma \ll H^4 \quad \text{durante l'inflazione}$$

$$\Gamma \simeq H^4 \quad \text{fine dell'inflazione}$$



conclusioni e prospettive

- ☛ Il Modello Standard è confermato con incredibile precisione alle scale fino ad ora testate negli acceleratori!
- ☛ Anche i risultati di Planck sono molto conservativi, al momento: inflazione ed il modello LambdaCDM sono confermati.
- ☛ Non mancano tuttavia i segnali di nuova fisica o comunque problemi, al momento, senza una soluzione soddisfacente (massa neutrini, materia oscura, energia oscura, violazione di CP nell'Universo primordiale)
- ☛ L'esistenza dell'higgs, la massa top, il meccanismo dell'inflazione (Higgs inflation?) sono "realtà" accettate ma in attesa di ulteriori puntualizzazioni....

Tante domande ma ancora poche risposte...



$E < 10^4 \text{ GeV}$



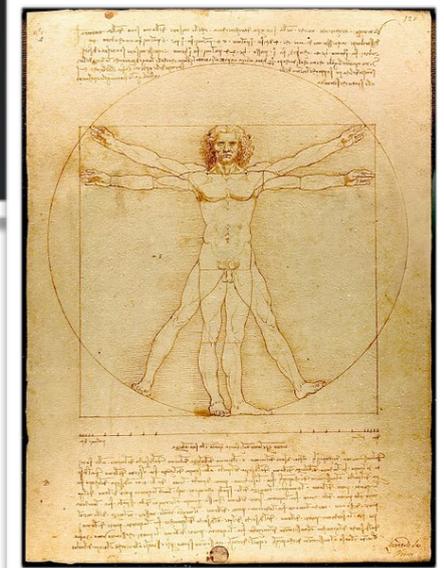
?

$E > 10^{16} \text{ GeV}$



Da dove arriveranno tutte queste risposte?

Simmetrie



- Il concetto di simmetria è comunemente utilizzato in matematica/geometria
- Simmetria=Invarianza rispetto ad una trasformazione:** la sfera è invariante rispetto alle rotazioni, lo spazio è invariante rispetto alle rotazioni e alle traslazioni, etc.
- In fisica le simmetrie sono legate all'invarianza delle leggi della dinamica rispetto ad una trasformazione.
- Le simmetrie sono associate a leggi di conservazione (Teorema di Noether):**
 - invarianza per traslazioni spazio-tempo=conservazione momento ed energia

$$U(x, y, z, t) = \text{cost} \Rightarrow \vec{p} = \vec{p}_0, E = \text{cost}$$

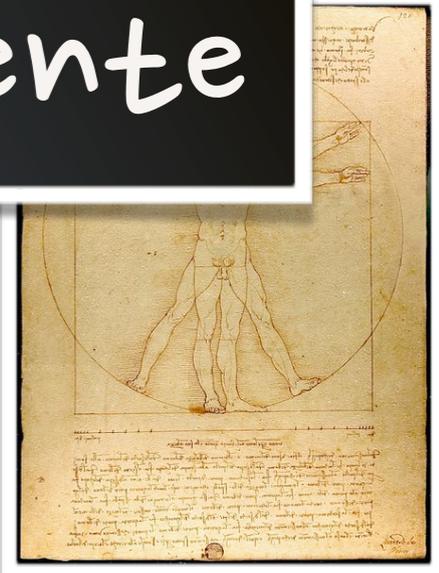
- invarianza per rotazioni= conservazione del momento angolare

$$U(x, y, z, t) = \frac{k}{r} \Rightarrow I\omega = \text{cost}$$

- La carica elettrica è conservata e tale conservazione è legata ad un'invarianza delle leggi dell'elettromagnetismo rispetto ad una ridefinizione della fase globale dei campi carichi (Simmetria tipo U(1)).

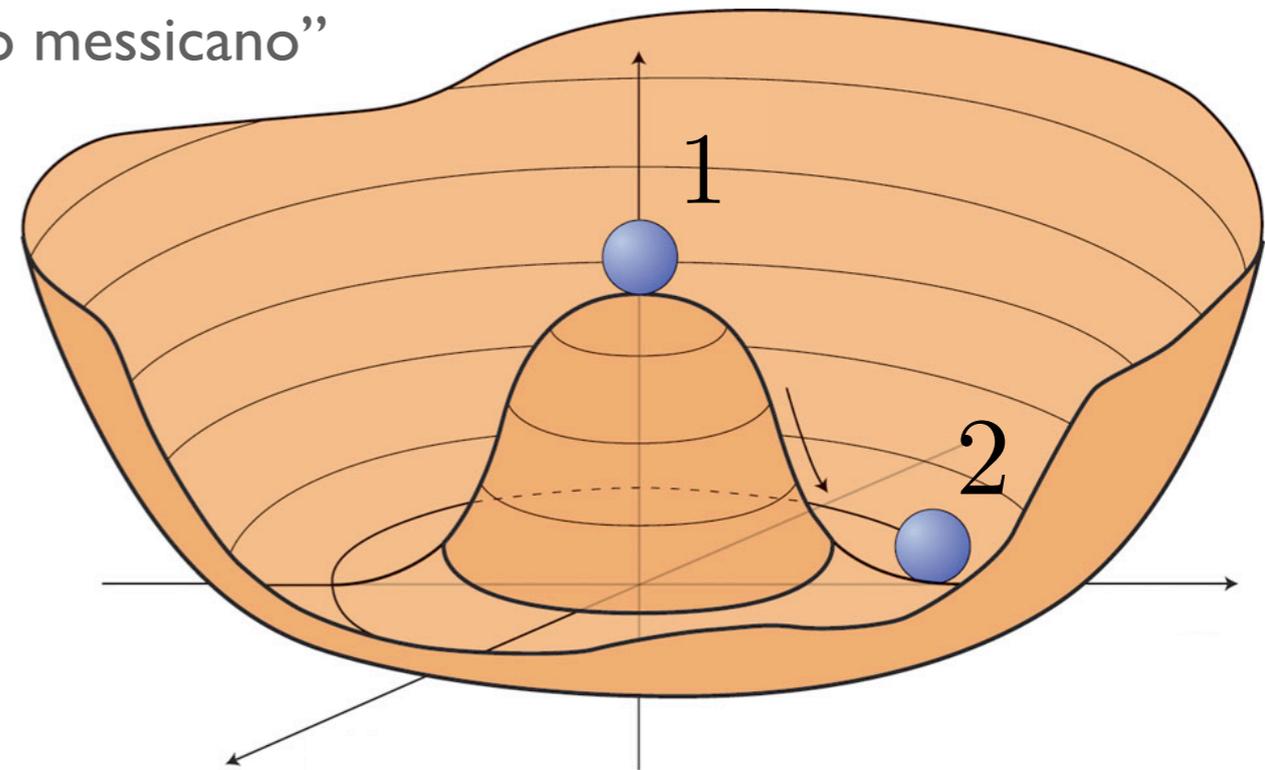
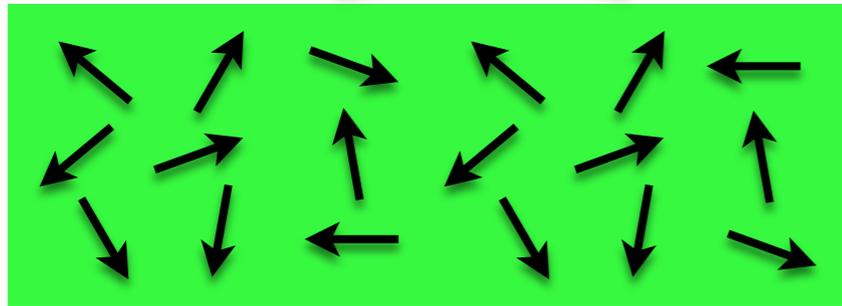
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0$$

Simmetrie Rotte Spontaneamente



- ☛ Una simmetria delle leggi della fisica che si realizza in modo antisimmetrico si dice spontaneamente rotta.
- ☛ In altri termini esistono delle soluzioni delle equazioni del moto che non sono simmetriche!
- ☛ Una pallina su una superficie a forma di “cappello messicano”

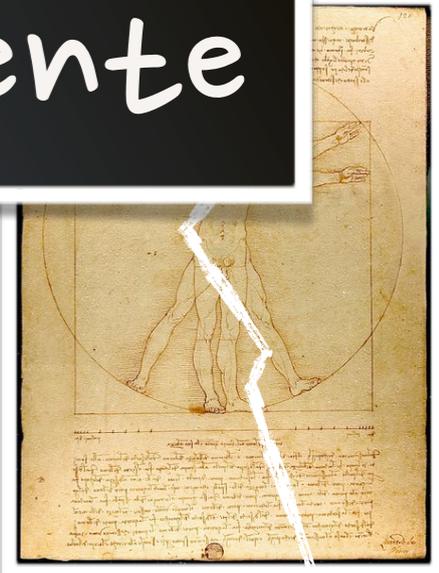
$$T > T_C$$



☛ Teoria di Heisenberg del ferromagnetismo

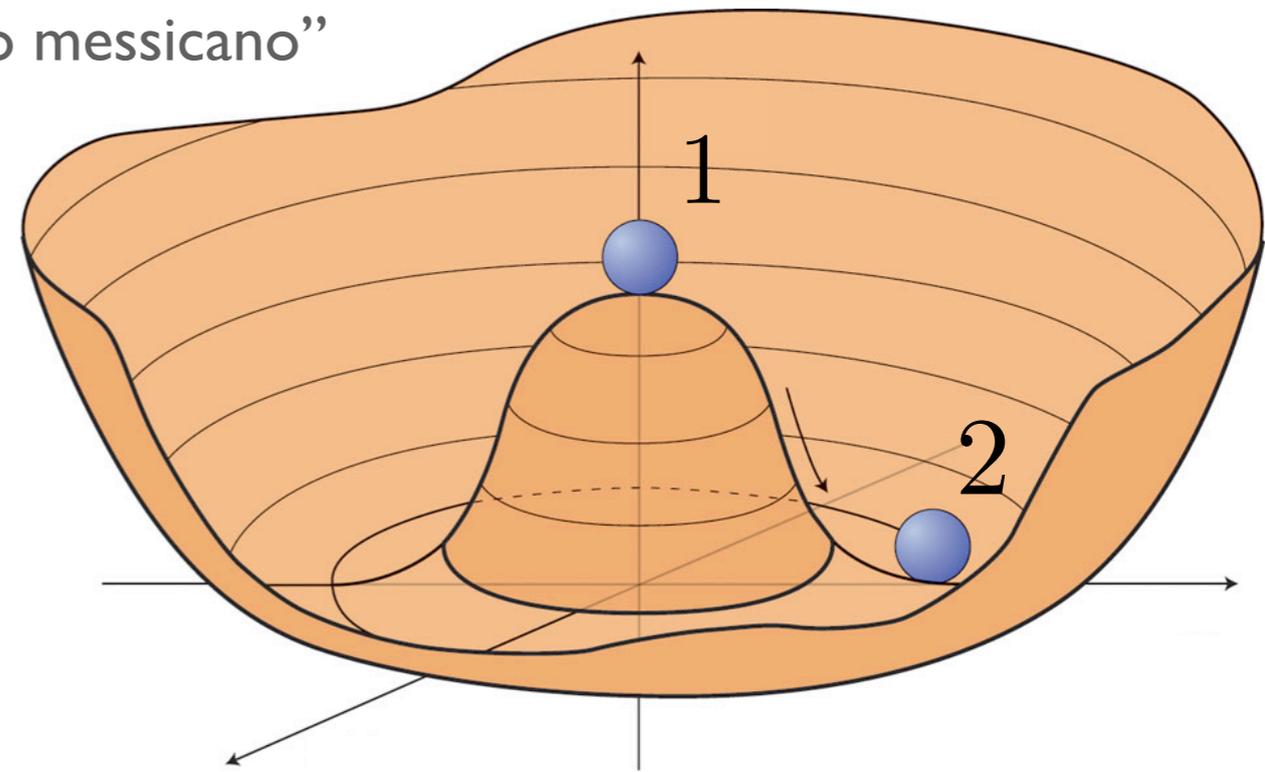
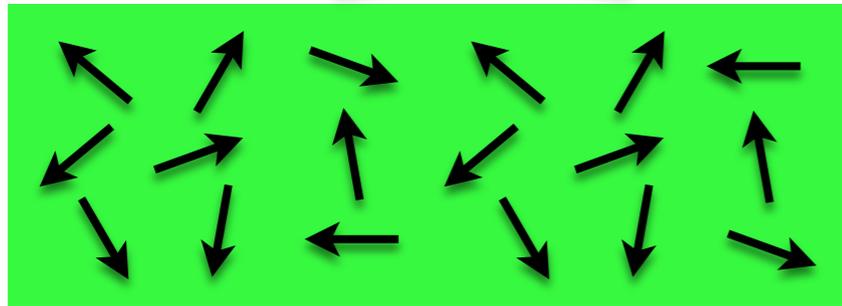
- ☛ La magnetizzazione di un metallo al di sotto della temperatura di Curie sceglie una direzione che non è simmetrica come l'interazione che la determina
- ☛ Sotto la temperatura di Curie il metallo è magnetizzato ed al suo interno il campo magnetico è non nullo

Simmetrie Rotte Spontaneamente



- ☛ Una simmetria delle leggi della fisica che si realizza in modo antisimmetrico si dice spontaneamente rotta.
- ☛ In altri termini esistono delle soluzioni delle equazioni del moto che non sono simmetriche!
- ☛ Una pallina su una superficie a forma di “cappello messicano”

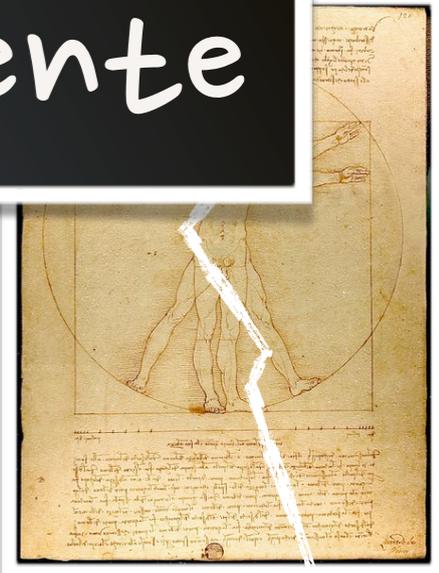
$$T > T_C$$



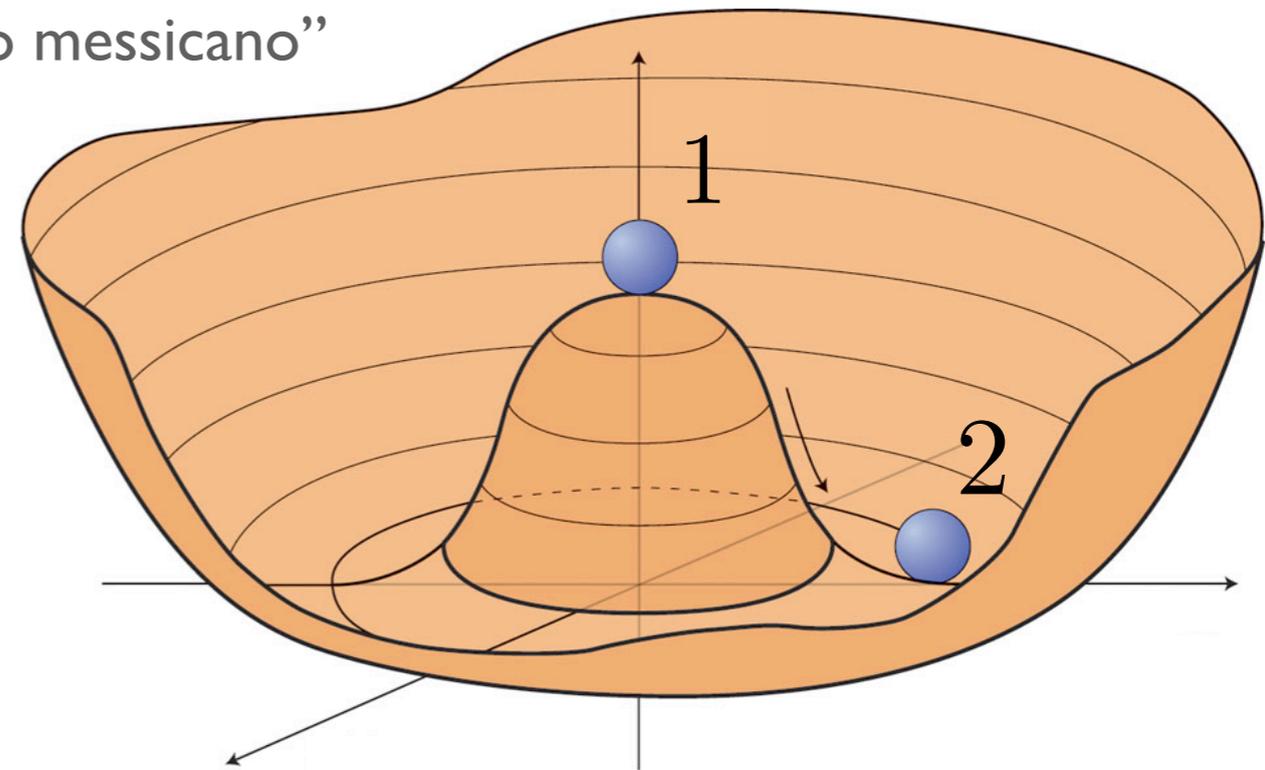
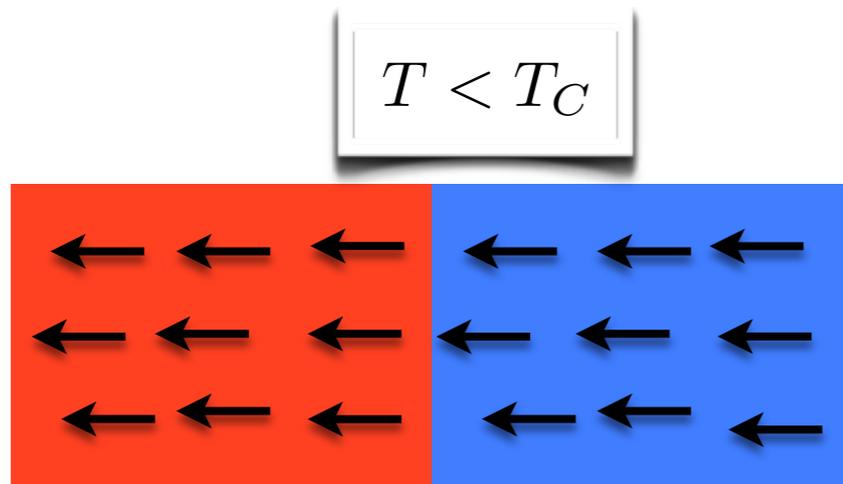
☛ Teoria di Heisenberg del ferromagnetismo

- ☛ La magnetizzazione di un metallo al di sotto della temperatura di Curie sceglie una direzione che non è simmetrica come l'interazione che la determina
- ☛ Sotto la temperatura di Curie il metallo è magnetizzato ed al suo interno il campo magnetico è non nullo

Simmetrie Rotte Spontaneamente



- ☛ Una simmetria delle leggi della fisica che si realizza in modo antisimmetrico si dice spontaneamente rotta.
- ☛ In altri termini esistono delle soluzioni delle equazioni del moto che non sono simmetriche!
- ☛ Una pallina su una superficie a forma di “cappello messicano”

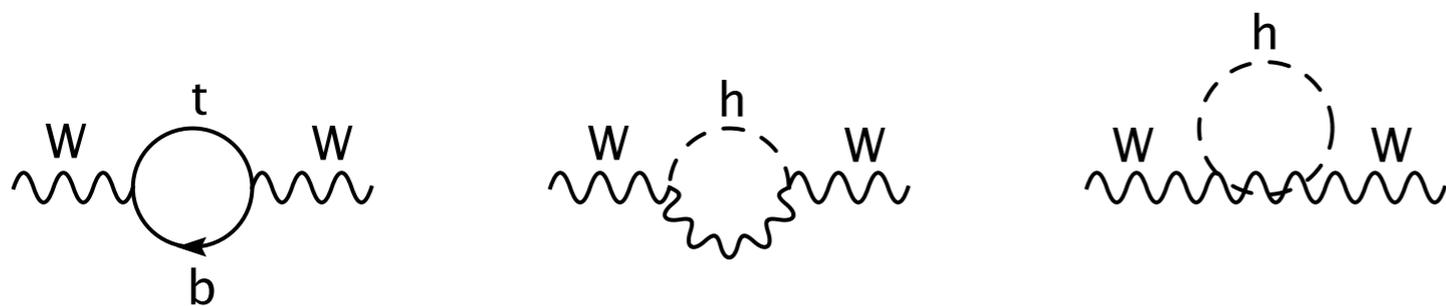


☛ Teoria di Heisenberg del ferromagnetismo

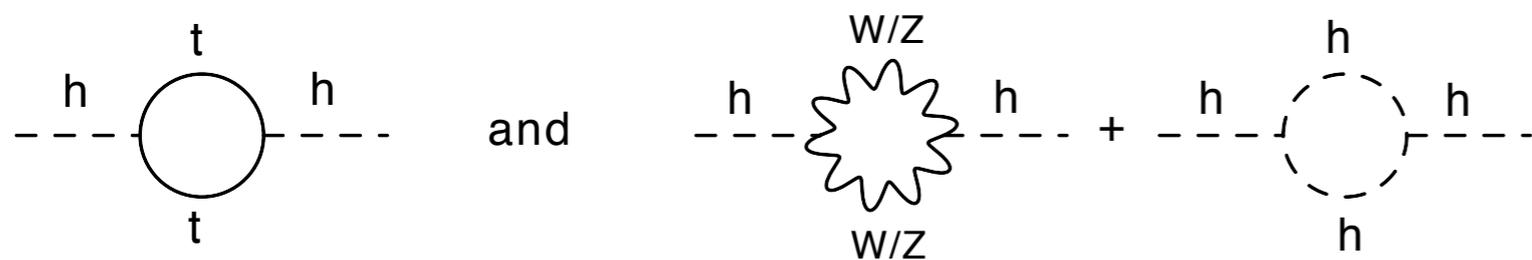
- ☛ La magnetizzazione di un metallo al di sotto della temperatura di Curie sceglie una direzione che non è simmetrica come l'interazione che la determina
- ☛ Sotto la temperatura di Curie il metallo è magnetizzato ed al suo interno il campo magnetico è non nullo

Il problema gerarchico

- ☕ La massa dell'Higgs può essere vincolata calcolando le correzioni quantistiche a più loop in processi elettrodeboli.
- ☕ I risultati sperimentali nel settore elettrodebole hanno raggiunto la precisione del 0.1%
- ☕ Le correzioni quantistiche ai processi tree-level sono dello stesso ordine di grandezza e devono essere incluse nei calcoli.
- ☕ **Successo:** il modello standard è stato verificato con questa precisione!
- ☕ In questo modo anche la massa del top è stata predetta indirettamente



Estimate: $m_t = 177.2_{-3.1}^{+2.9} \text{ GeV}/c^2$
 Measurement: $m_t = 173.2 \pm 0.9 \text{ GeV}/c^2$



$$m_h = m_h^{\text{bare}} + \Delta m_h^{\text{ferm.}} + \Delta m_h^{\text{gauge}} + \Delta m_h^{\text{Higgs}} + \dots$$

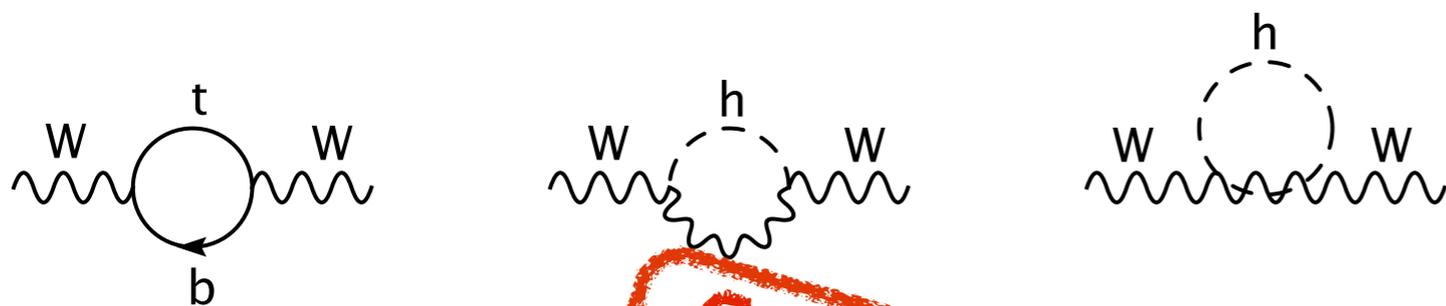
☕ Problema Gerarchico:

Le correzioni a più loop alla massa dell'Higgs sono "fuori controllo"

$$(\Delta m_h^2)^{\text{top}} = -\frac{3}{8\pi^2} \lambda_t^2 \Lambda^2$$

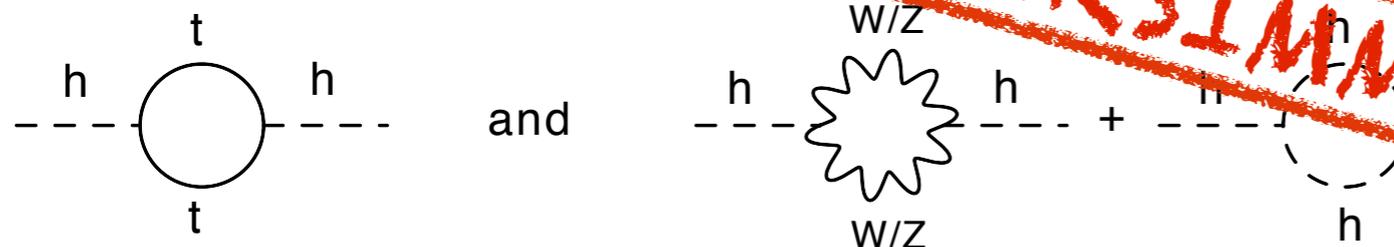
Il problema gerarchico

- ☕ La massa dell'Higgs può essere vincolata calcolando le correzioni quantistiche a più loop in processi elettrodeboli.
- ☕ I risultati sperimentali nel settore elettrodebole hanno raggiunto la precisione del 0.1%
- ☕ Le correzioni quantistiche ai processi tree-level sono dello stesso ordine di grandezza e devono essere incluse nei calcoli.
- ☕ **Successo:** il modello standard è stato verificato con questa precisione!
- ☕ In questo modo anche la massa del top è stata predetta indirettamente



Estimate: $m_t = 177.2_{-3.1}^{+2.9} \text{ GeV}/c^2$
 Measurement: $m_t = 173.2 \pm 0.9 \text{ GeV}/c^2$

SUPERSIMMETRIA?



☕ Problema Gerarchico:

Le correzioni a più loop alla massa dell'Higgs sono "fuori controllo"

$$m_h = m_h^{\text{bare}} + \Delta m_h^{\text{ferm.}} + \Delta m_h^{\text{gauge}} + \Delta m_h^{\text{Higgs}} + \dots$$

$$(\Delta m_h^2)^{\text{top}} = -\frac{3}{8\pi^2} \lambda_t^2 \Lambda^2$$

Modello Lambda cDM

☛ 6 parametri vengono fittati mediante le osservazioni del CMB

- ☛ Densità barionica osservata oggi
- ☛ Densità critica osservata oggi
- ☛ Densità di energia oscura
- ☛ Profondità ottica dello scattering Thompson
- ☛ Costante di Hubble osservata oggi ($\text{km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$)
- ☛ Indice spettrale delle perturbazioni primordiali

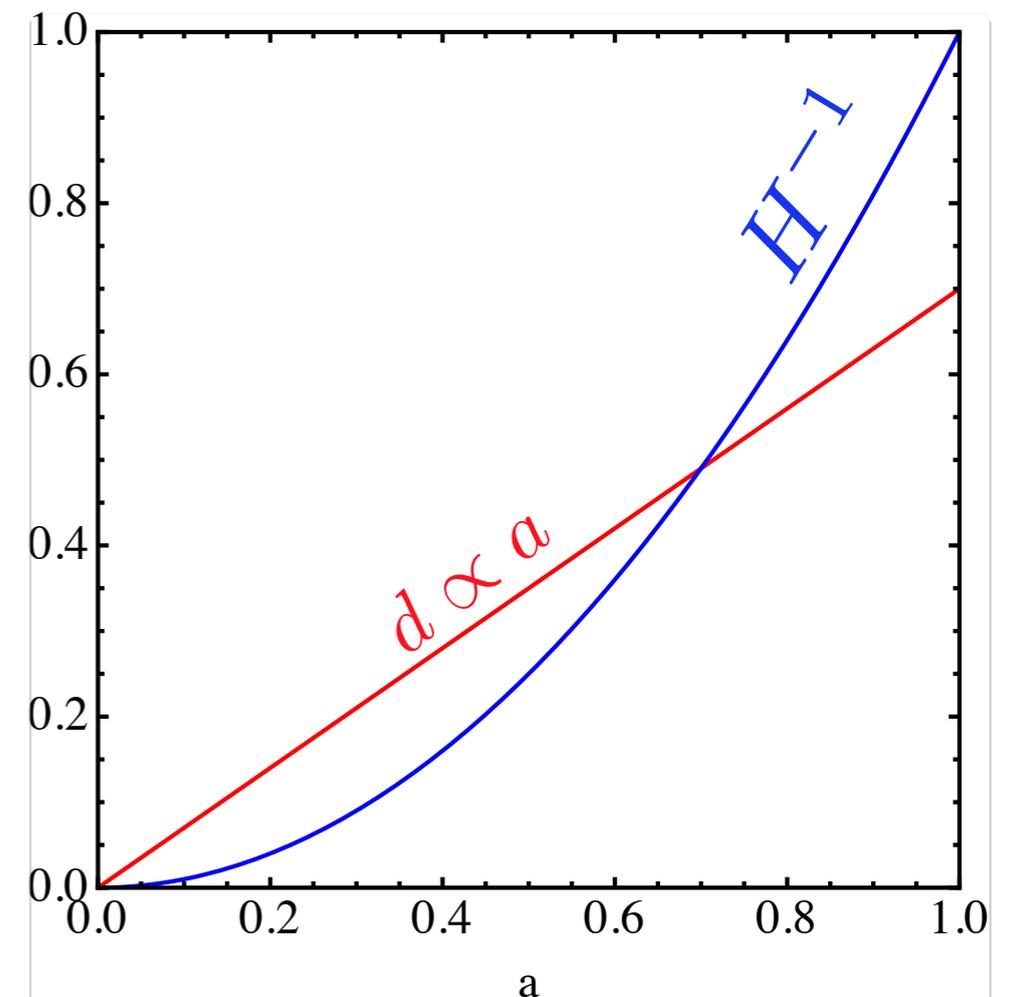
0.022242	0.02264
0.11805	0.1138
0.6964	721
0.0949	0.089
68.14	70
0.9675	0.972
Planck	WMAP9

☛ LAMBDA-CDM : Modello minimale per l'evoluzione dell'Universo dal big bang ad oggi **confermato dalle osservazioni!**

Piattezza e Omogeneità

- ☛ L'Universo appare "innaturalmente" piatto ed omogeneo
- ☛ Planck conferma con precisione queste caratteristiche misurando la posizione del primo picco del CMB e la sua omogeneità
- ☛ La piattezza di Universo dominato da fluidi che si attaggono gravitazionalmente diminuisce durante la sua evoluzione. Quindi l'Universo deve essere estremamente piatto al termine dell'inflazione!
- ☛ Oggi l'Universo appare estremamente disomogeneo. Le disomogeneità sono originate dall'attrazione gravitazionale
- ☛ Quando l'Universo era più "giovane", circa 380 000 anni dopo il Big Bang, era estremamente omogeneo. Piccolissime disomogeneità presenti nel CMB si sono amplificate per produrre le LLS!
- ☛ L'omogeneità della radiazione cosmica è la prova che la radiazione che osserviamo è stata originata in una piccola regione nello spazio causalmente connessa ad un certo istante dell'evoluzione cosmica.

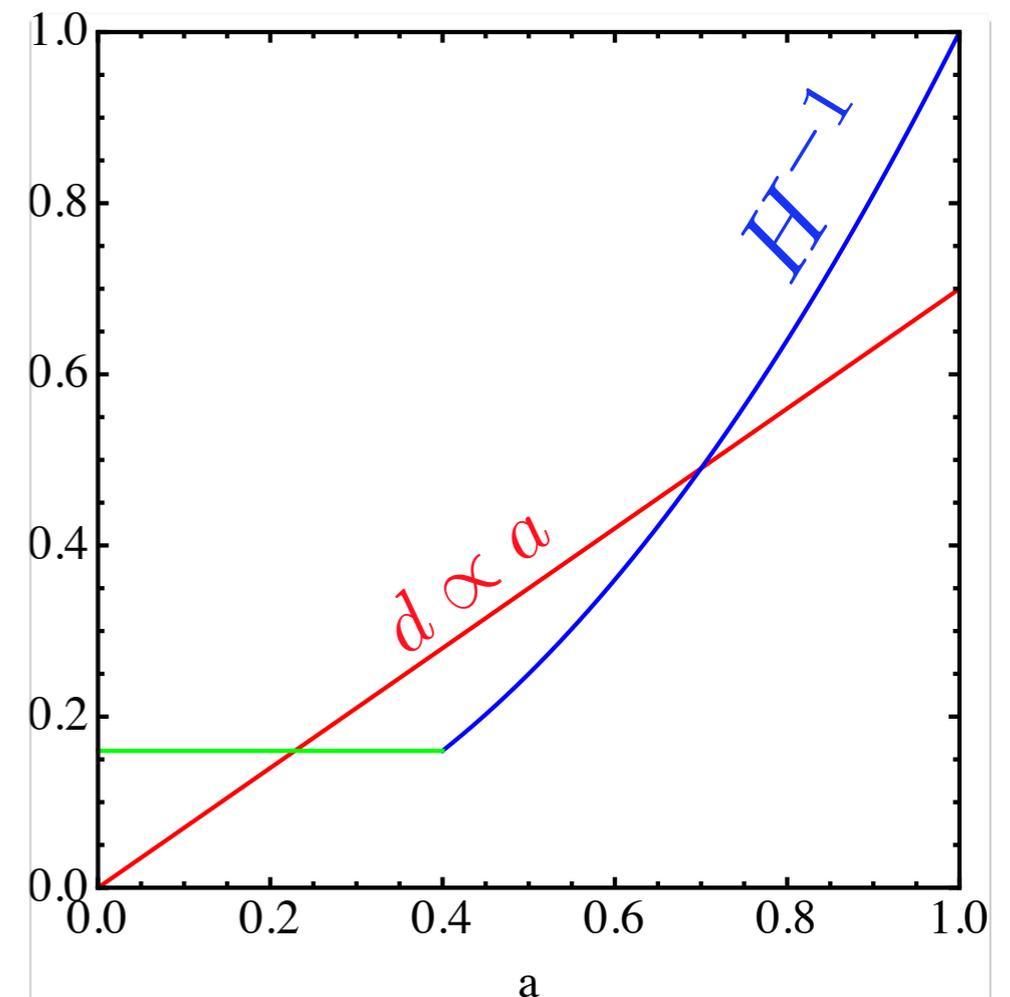
$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G_N} \Rightarrow \frac{\rho}{\rho_c} = 1 + \frac{K}{a^2 H^2}$$



Piattezza e Omogeneità

- ☛ L'Universo appare "innaturalmente" piatto ed omogeneo
- ☛ Planck conferma con precisione queste caratteristiche misurando la posizione del primo picco del CMB e la sua omogeneità
- ☛ La piattezza di Universo dominato da fluidi che si attaggono gravitazionalmente diminuisce durante la sua evoluzione. Quindi l'Universo deve essere estremamente piatto al termine dell'inflazione!
- ☛ Oggi l'Universo appare estremamente disomogeneo. Le disomogeneità sono originate dall'attrazione gravitazionale
- ☛ Quando l'Universo era più "giovane", circa 380 000 anni dopo il Big Bang, era estremamente omogeneo. Piccolissime disomogeneità presenti nel CMB si sono amplificate per produrre le LLS!
- ☛ L'omogeneità della radiazione cosmica è la prova che la radiazione che osserviamo è stata originata in una piccola regione nello spazio causalmente connessa ad un certo istante dell'evoluzione cosmica.

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G_N} \Rightarrow \frac{\rho}{\rho_c} = 1 + \frac{K}{a^2 H^2}$$



Piattezza e Omogeneità

☛ L'Universo appare "innaturalmente" piatto ed omogeneo

☛ Planck conferma con precisione queste caratteristiche misurando la posizione del primo picco del CMB e la sua omogeneità

☛ La piattezza di Universo dominato da fluidi che si attaggono gravitazionalmente diminuisce durante la sua evoluzione. Quindi l'Universo deve essere estremamente piatto al termine dell'inflazione!

☛ Oggi l'Universo appare estremamente disomogeneo. Le disomogeneità sono originate dall'attrazione gravitazionale

☛ Quando l'Universo era più "giovane", circa 380 000 anni dopo il Big Bang, era estremamente omogeneo. Piccolissime disomogeneità presenti nel CMB si sono amplificate per produrre le LLS!

☛ L'omogeneità della radiazione cosmica è la prova che la radiazione che osserviamo è stata originata in una piccola regione nello spazio causalmente connessa ad un certo istante dell'evoluzione cosmica.

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G_N} \Rightarrow \frac{\rho}{\rho_c} = 1 + \frac{K}{a^2 H^2}$$

