

何故に宇宙？

諸井健夫

@将来計画検討小委員会

はじめに

はじめに……

- › ちなみに、そもそもどうして高エネルギー委員会で宇宙を
- › 考えなくてはいけないかという話を諸井さんにしてもらおう
- › のはどうでしょうか

(3月1日の森さんのメール内にあった村山さんのコメント)

⇒ いや、「いけない」という事もないけど……
(大体「高エネルギー物理学」って何だ?)

⇒ いろいろ面白い物理はある
(何が「面白い」かは、人によりますが……)

何故「高エネルギー物理学者」が宇宙を？

- 宇宙の進化を理解する上では、高エネルギー物理学（ファンダメンタルな物理）からの情報が不可欠
⇒ 宇宙進化の理解への寄与
- 無矛盾な宇宙進化のシナリオを要請すると、素粒子モデルが制限される
⇒ 素粒子モデルを構築する上での手がかかり
- 高エネルギー実験で培ったテクノロジーが応用できる

近年の宇宙観測の成果

宇宙の話をするときの基礎

- 宇宙は（ほぼ）一様等方である
- 宇宙は膨張している
- 宇宙は背景放射で満ちている

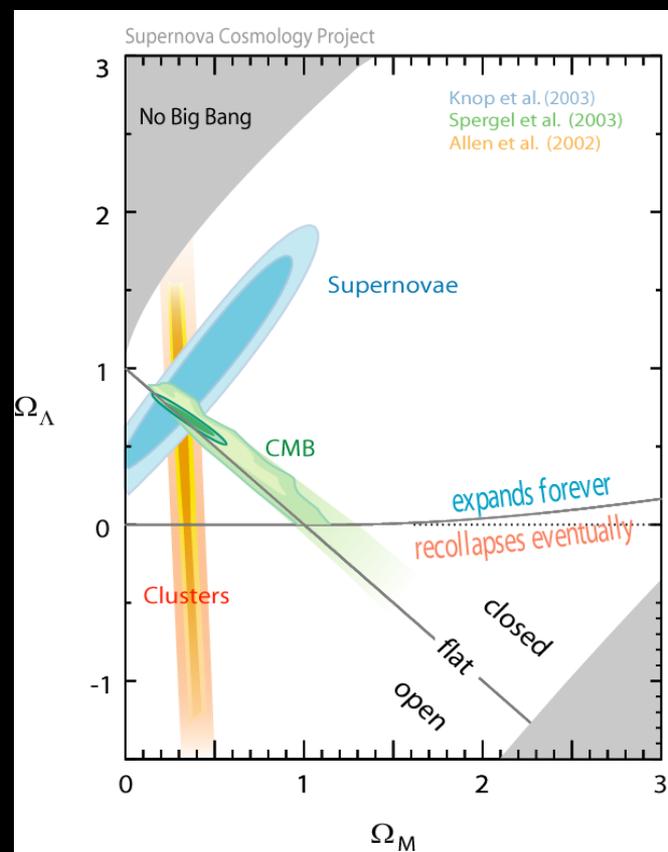
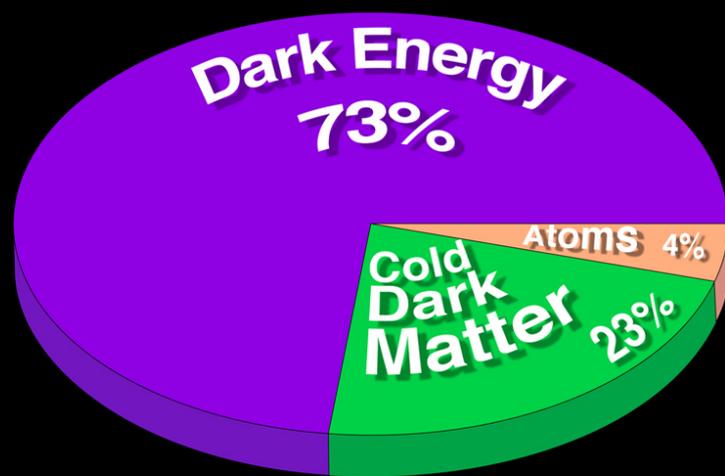
⇒ ビッグバン宇宙（昔の宇宙はもっと熱かった）

⇒ 宇宙の歴史は、理解すべき大きな問題

宇宙を満たしている物質 (WMAP 7)

- バリオン (質量比約4%)
- 暗黒物質 (質量比約23%)
- 暗黒エネルギー (質量比約73%)
- 宇宙背景放射 ($T \sim 2.7\text{K}$)

宇宙パラメータ



[Supernova cosmology project 2003]

様々な観測が、同じ値を示唆する！

宇宙の密度揺らぎ

- 我々の宇宙はほとんど一様等方である
- (ちいさな) 密度揺らぎが存在

$$\Rightarrow \delta \rho / \rho \sim 10^{-5}$$

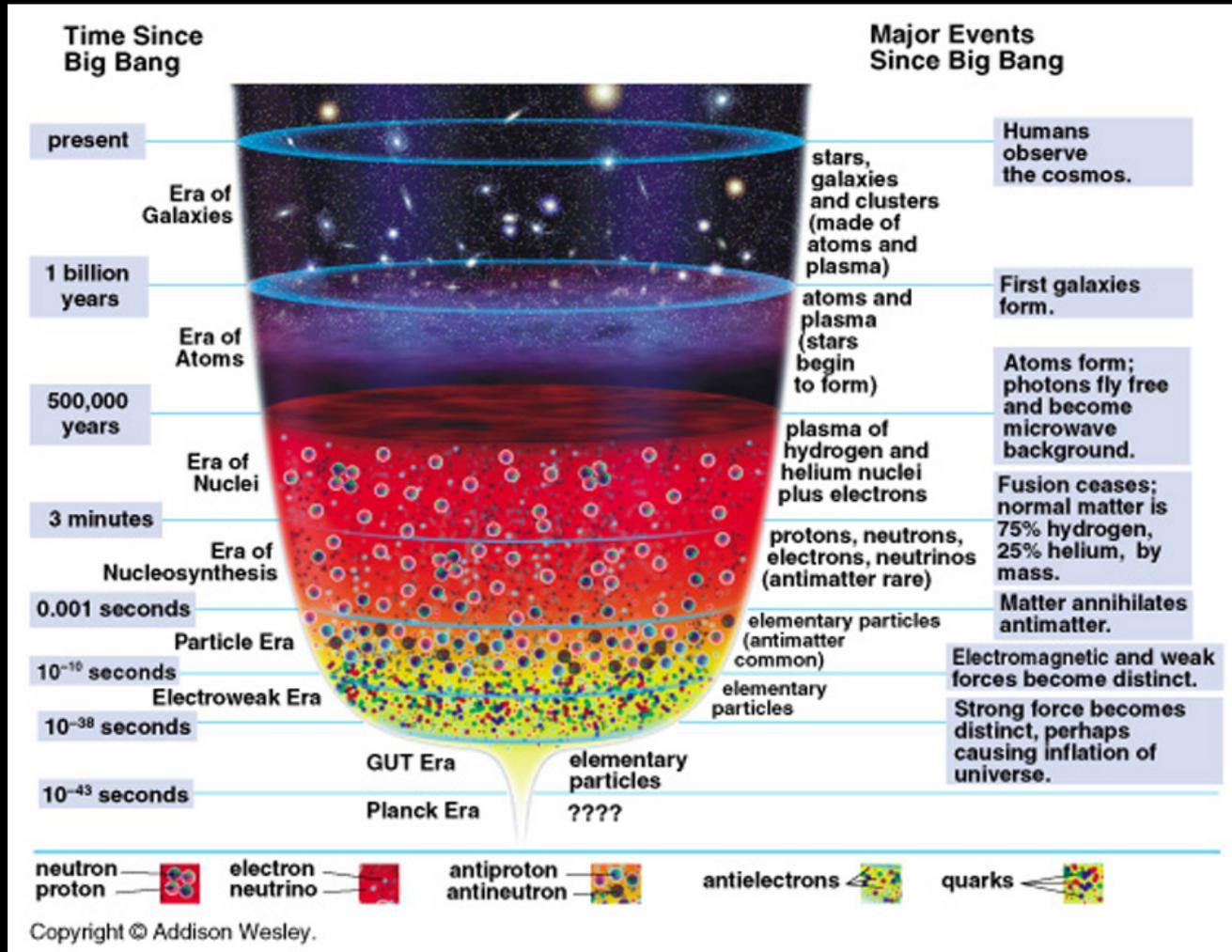
- 密度揺らぎの大きさは (ほとんど) スケール不変

$$\Rightarrow \delta \rho^2(k) \sim k^{n-1}$$

$$n = 0.96 \pm 0.013 \text{ [WMAP7]}$$

昔の宇宙を想像してみる

時間を遡ると……



宇宙進化を決めるもの

- 宇宙膨張の法則：一般相対論（ここを疑う人もいる）
- 「物質」の性質（状態方程式）
 - ⇒ 「物質」にはどのようなものがあるか？
 - ⇒ 「物質」間にはどのような力が働くか？
- 初期条件
 - ⇒ バリオンや暗黒物質がどの程度あったか？
 - ⇒ 揺らぎの大きさはどの程度であったか？

単純に宇宙の初期条件を想像してみる

- 宇宙初期は輻射優勢

$$\Rightarrow T_{\text{init}} \gg 2.7\text{K}$$

- 宇宙初期に暗黒物質が存在：種類・理由は問わない

$$\Rightarrow \rho_{\text{CDM}} / s \sim 5 \times 10^{-10} \text{GeV}$$

- 宇宙初期にバリオン非対称性が存在：理由は問わない

$$\Rightarrow n_b / s \sim 10^{-9}$$

- 宇宙初期にスケール不変な揺らぎが存在

$$\Rightarrow \delta \rho / \rho \sim 10^{-5}$$

宇宙の歴史はどこまで分かっているのか？

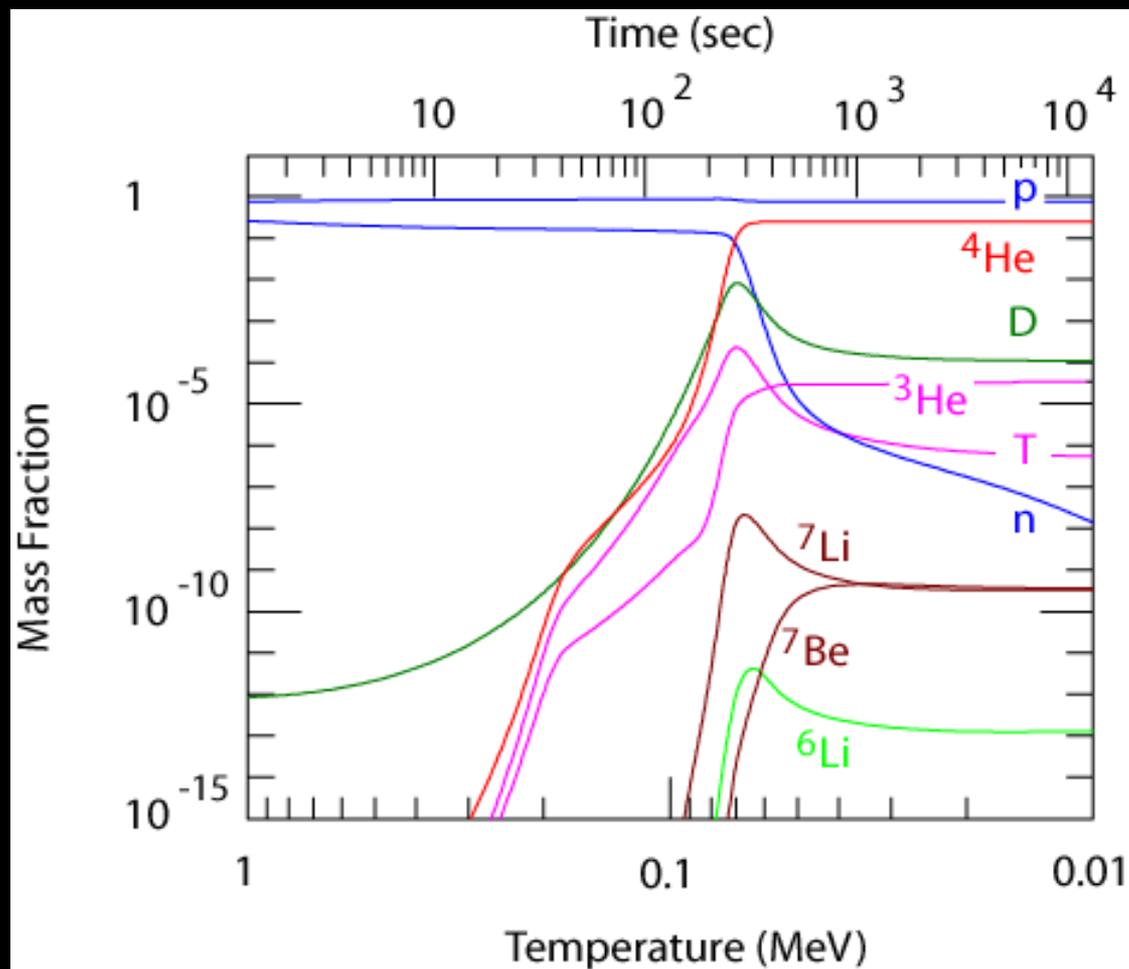
⇒ おそらく温度が $1 \sim 10 \text{ MeV}$ まで

(この頃、ビッグバン元素合成が起きる)

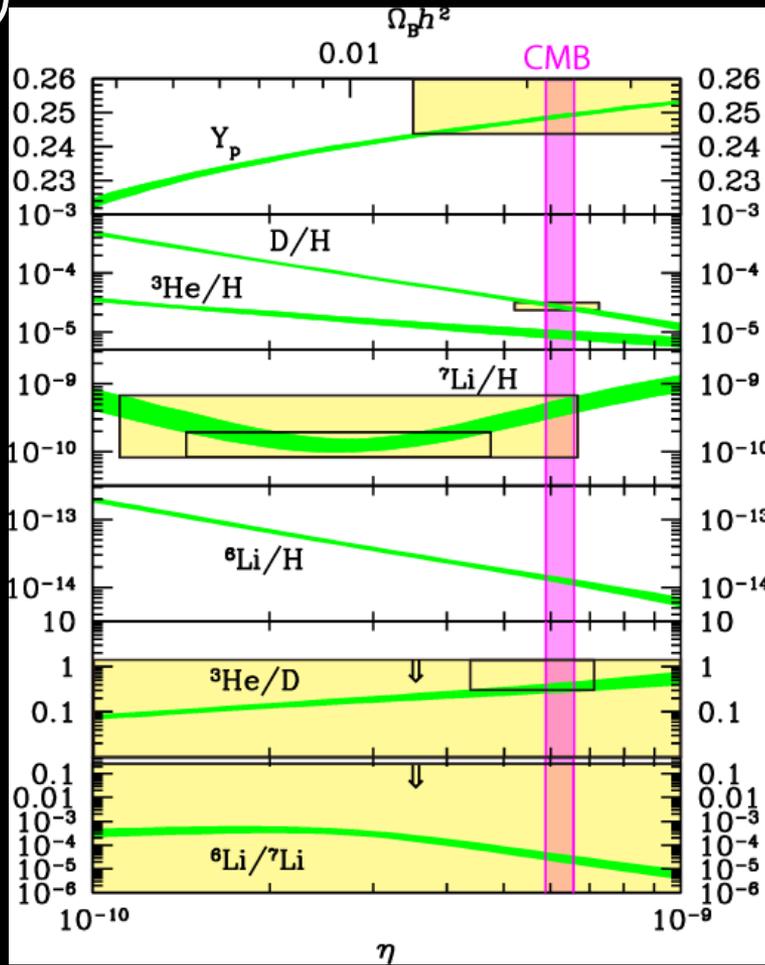
ビッグバン元素合成 (BBN)

- 宇宙膨張：アインシュタイン方程式
- 軽元素量の変化：ボルツマン方程式
- 陽子 \leftrightarrow 中性子変換反応：弱い相互作用
- 核反応：理論＋実験的に測られた核反応断面積

BBN: Li までの元素量を大体うまく説明



BBN：パラメータはひとつ（バリオンの量）



$$\eta = n_b / n_\gamma$$

[Courtesy of K.Kohri]

「地平線問題」

- 宇宙年齢は有限

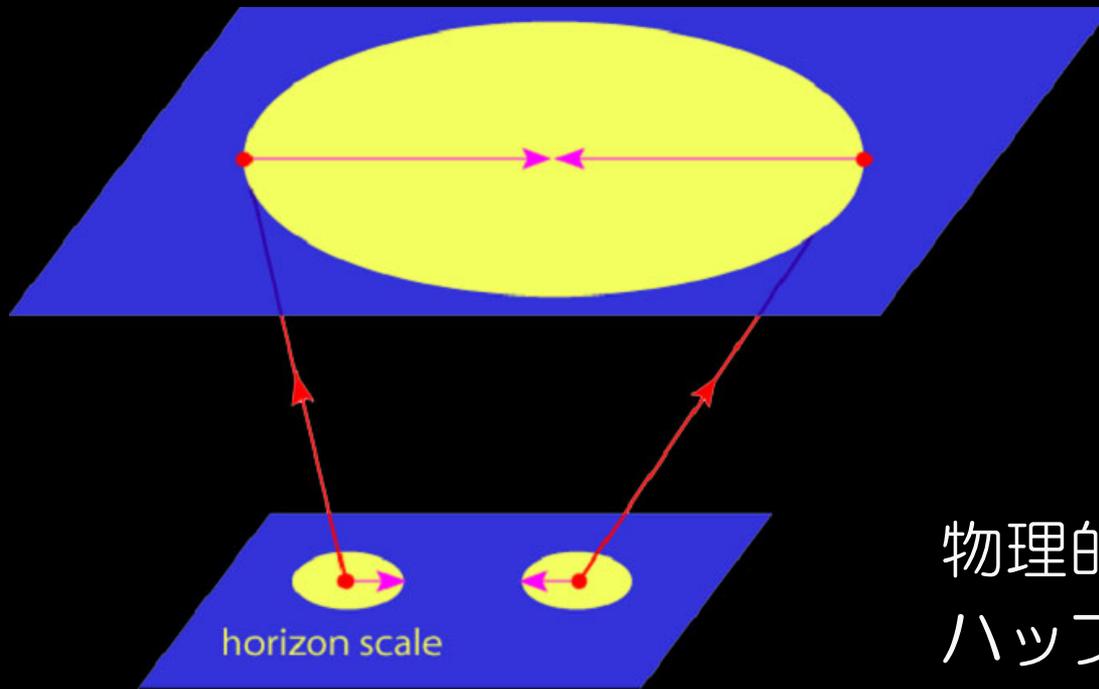
⇒ 情報の伝達距離も有限

- 現在の地平線スケールは、宇宙初期には因果的に
つながっていなかった

⇒ 宇宙が一様等方であるのは不自然

⇒ 様々なスケールの揺らぎが同じ大きさをもつのは
不自然

ビッグバンシナリオにおける地平線スケール



物理的距離 $\propto a$

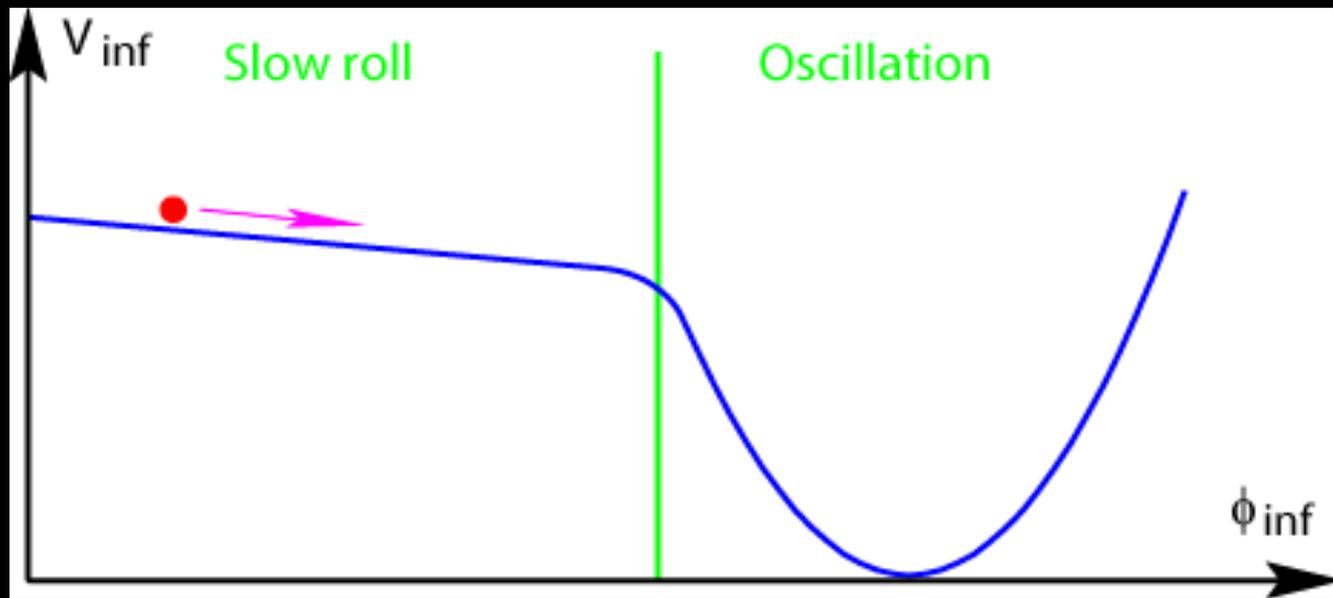
ハッブル距離 $\propto 1/H$

⇒ 宇宙が減速膨張しているところなる (RD・MD)

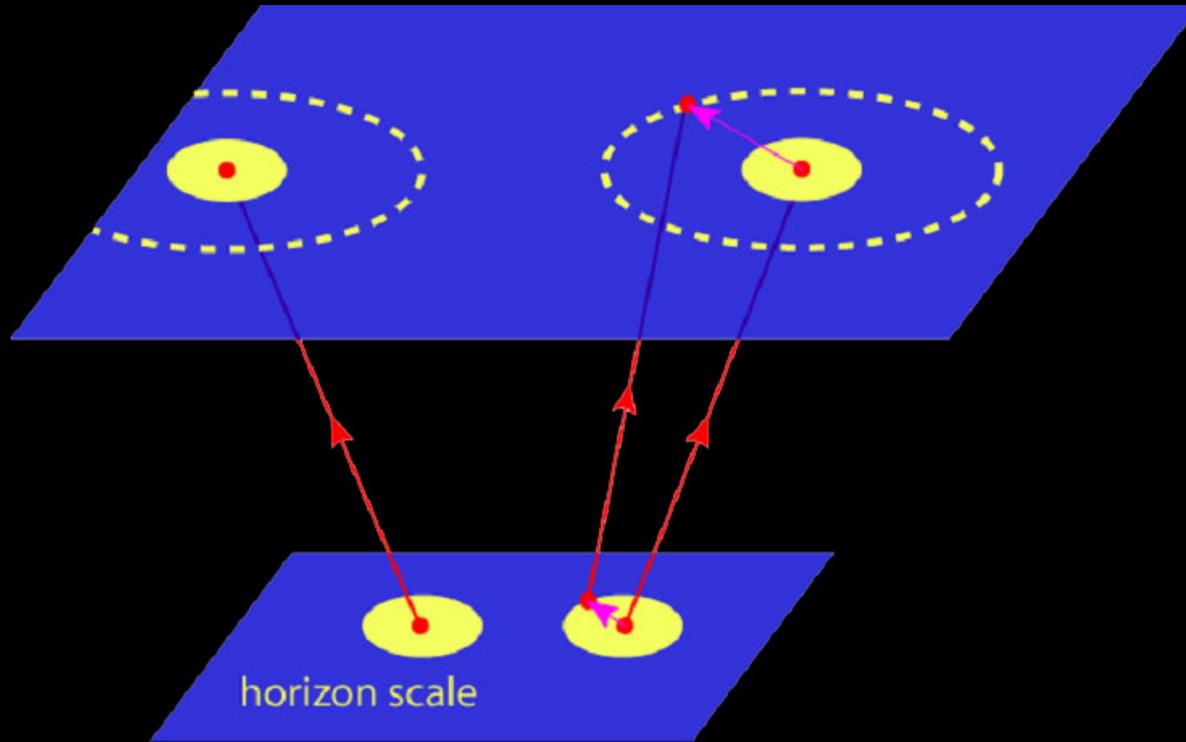
インフレーション

地平線問題と宇宙密度揺らぎの問題は、インフレーション（宇宙初期の極めて急激な加速膨張）を仮定すると同時に解決できる

⇒ 加速膨張の原因：「インフラトン」（スカラー場）

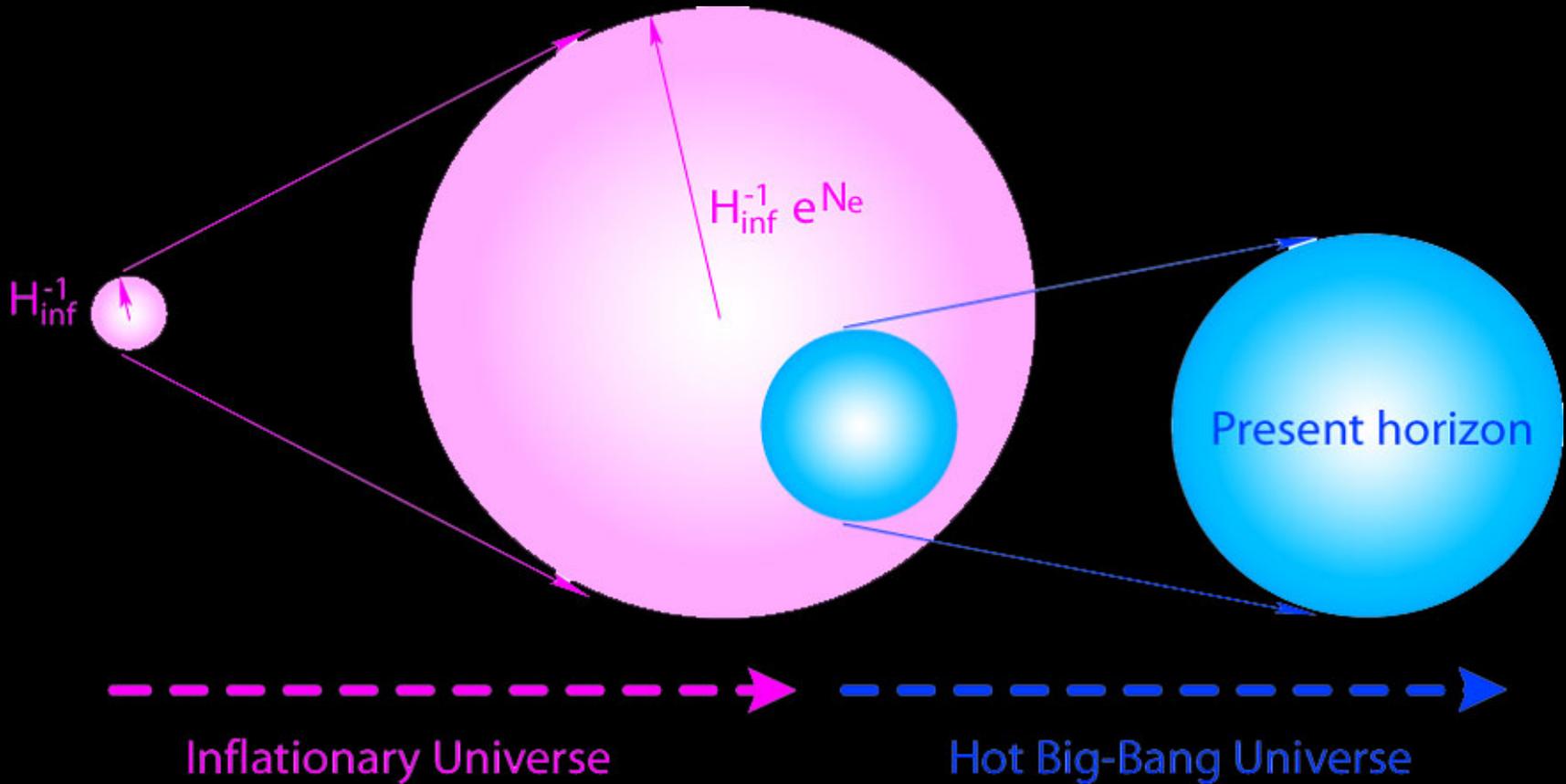


インフレーション中の地平線スケール



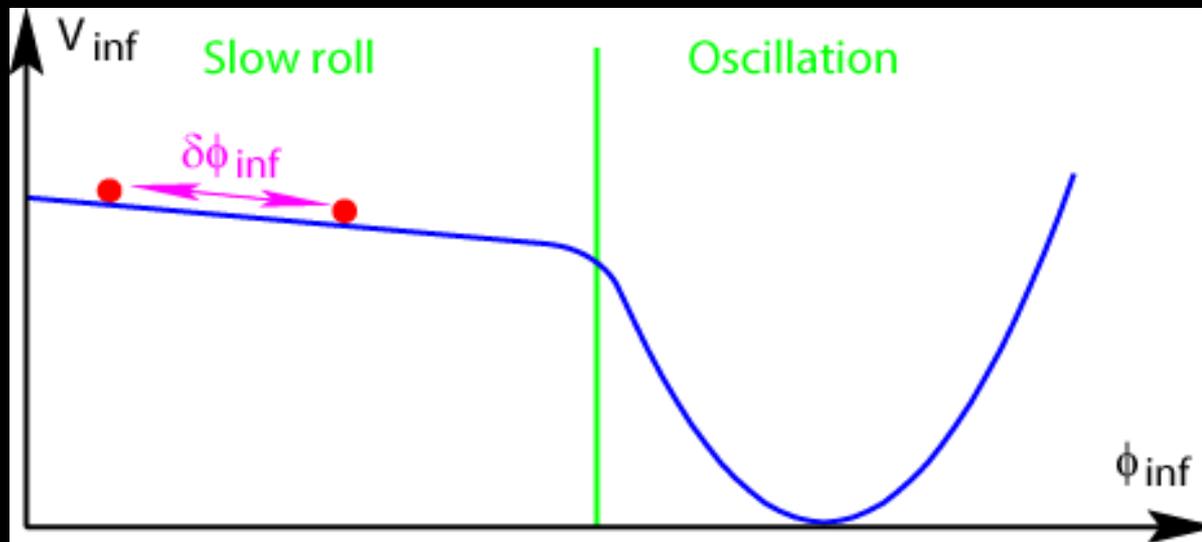
⇒ インフレーション中に地平線スケールはほぼ一定

インフレーション前後の地平線スケール



インフレーションは密度揺らぎも生成

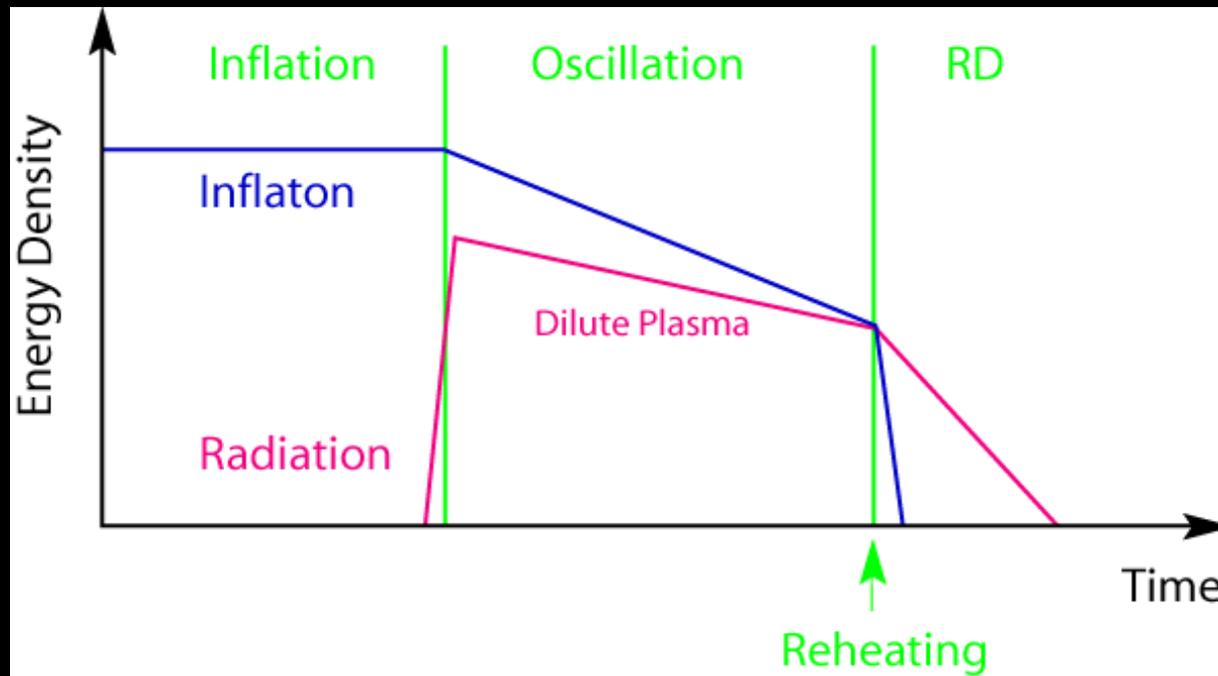
⇒ 密度揺らぎの起源：インフラトンの量子揺らぎ



できる揺らぎは（ほとんど）スケール不変、かつ断熱的

インフレーション後、宇宙は再加熱される

⇒ (単純なシナリオでは) 宇宙を満たしている物質は全てインフラトンの崩壊から生成される



再加熱後の宇宙：ビッグバン宇宙

- 宇宙は一度リセットされる
- インフレーション後に「物質」を作る必要がある
 - ⇒ 再加熱の機構：再加熱後、宇宙はどうなっていた？
 - ⇒ バリオン数非対称性の起源は？
 - ⇒ 暗黒物質は何か、どうやって作られたのか？

さて、どうしよう……？

素粒子標準模型の困難

- 暗黒物質の候補が無い
- バリオン数を作れない
- インフレーションを起こせるスカラー場がない
- ……
- 暗黒エネルギーの正体が分からない

⇒ 素粒子標準模型を超える物理が必要

暗黒物質の候補

- LSP (超対称模型)
- LKP (余剰次元模型)
- LTP (リトルヒッグス模型)
- ヒッグス粒子 (細谷さんの模型)
- アクシオン
-

バリオン数の起源

- レプトジェネシス
- 電弱バリオジェネシス
- アフレック-ダイン機構
-

暗黒物質を探る

素粒子実験から宇宙物理へのインプット

暗黒物質とは……

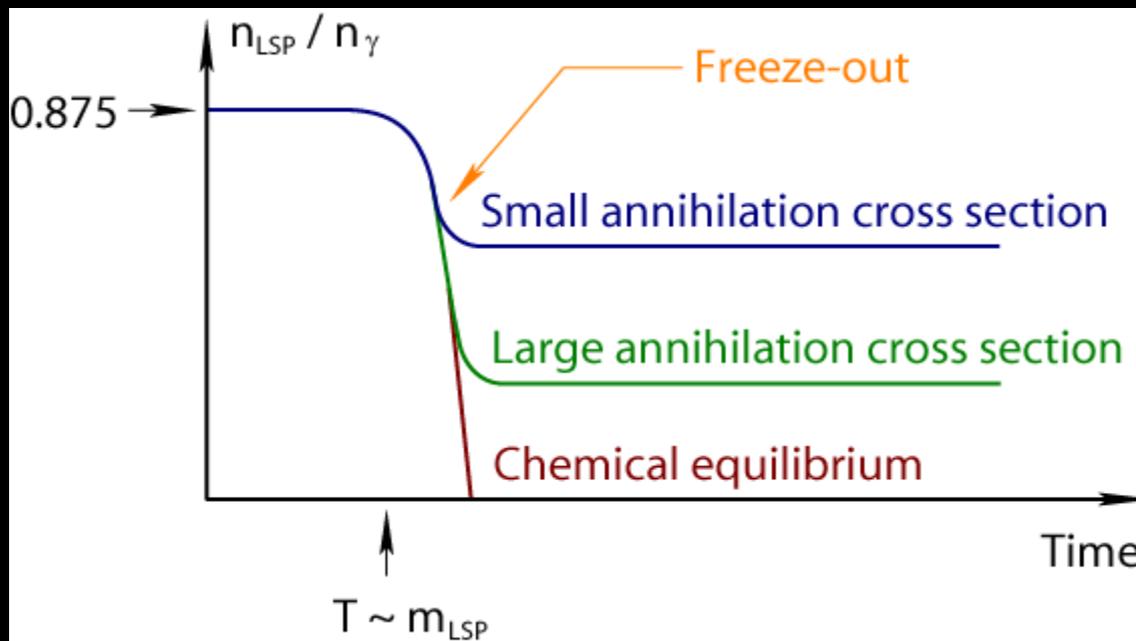
- 圧力が（ほとんど）ゼロという状態方程式を持つ物質
- 光との相互作用が（ほとんど）無視できる
- 安定（あるいは現在の宇宙年齢より長い寿命）

暗黒物質の候補

- 非相対論的粒子
- スカラー場の振動（例えばアクシオン）
- ブラックホール？

非相対論的粒子が暗黒物質だとすると……

熱的に生成された非相対論的粒子の残存量



$$\Omega = 0.2 \times (\langle \sigma v \rangle / 0.9 \text{ pb})^{-1}$$

暗黒物質の性質を加速器実験でテストする

0.9 pb : 電弱スケール質量粒子の交換程度の断面積

- 暗黒物質 : 電弱スケールの物理と (何らかの) 関連?
- (標準模型の) 階層性問題の解との関わり?

もしも暗黒物質の候補となる粒子が見つかったら...

- その性質 (質量・相互作用) を実験的に決定
- 対消滅断面積を決定
- Ω を計算して 0.2 程度になるかどうかを見る

宇宙の歴史の理解への意義

Ω を計算して0.2となったら……

⇒ 宇宙の温度が $10 - 100 \text{ GeV}$ までは、特に変わったことは考えなくても大丈夫

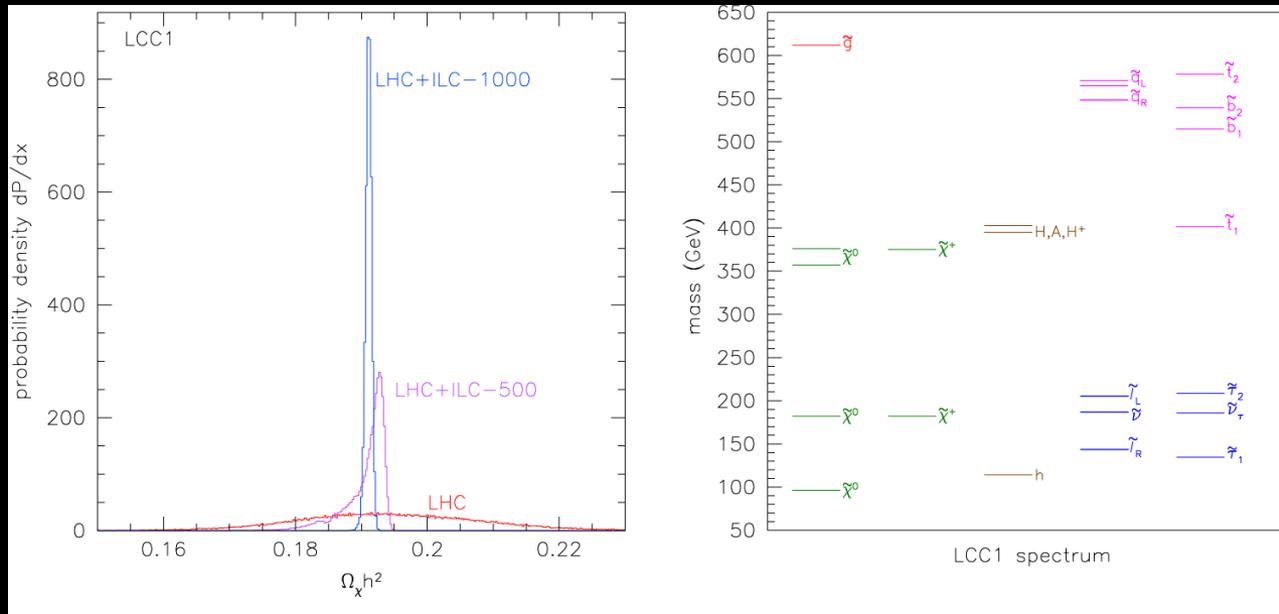
Ω が0.2とならなかつたら、何か新しいアイデアが必要

⇒ $\Omega < 0.2$ なら、他の暗黒物質候補、非熱的に暗黒物質を作る、……

⇒ $\Omega > 0.2$ なら、非標準的な宇宙進化（エントロピー生成等）、見つかった粒子は実は不安定、……

模型 / パラメータによっては結構うまくいく

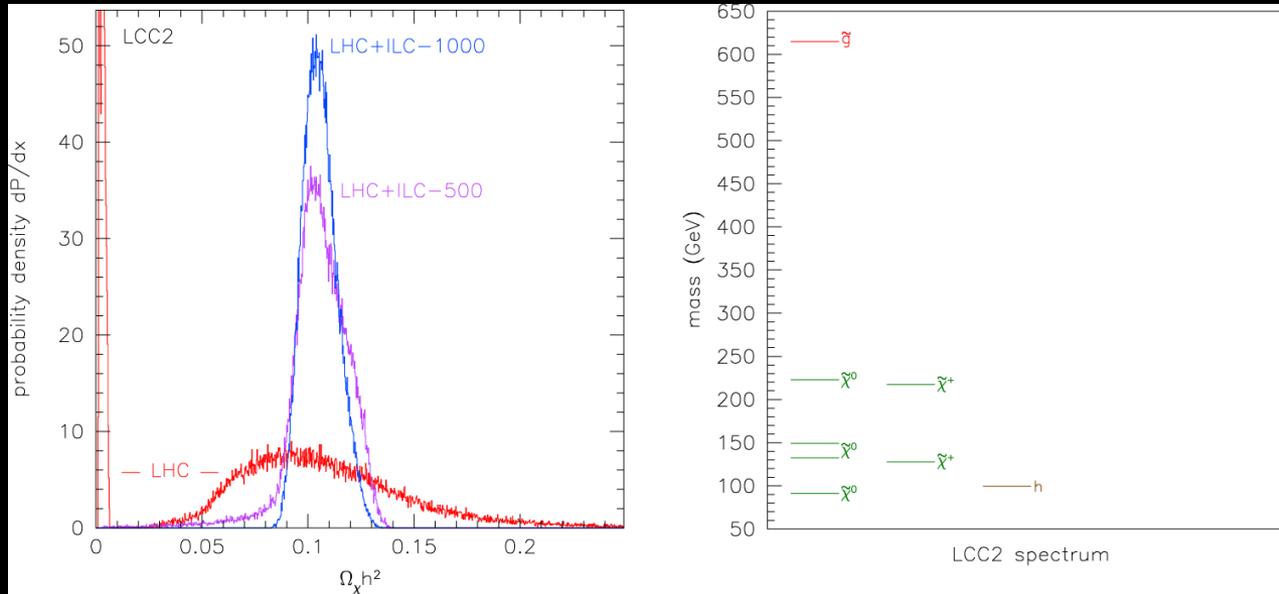
SUSY: Bulk Region



[Baltz, Battaglia, Peskin & Wizansky]

無論、場合によっては精度は落ちる

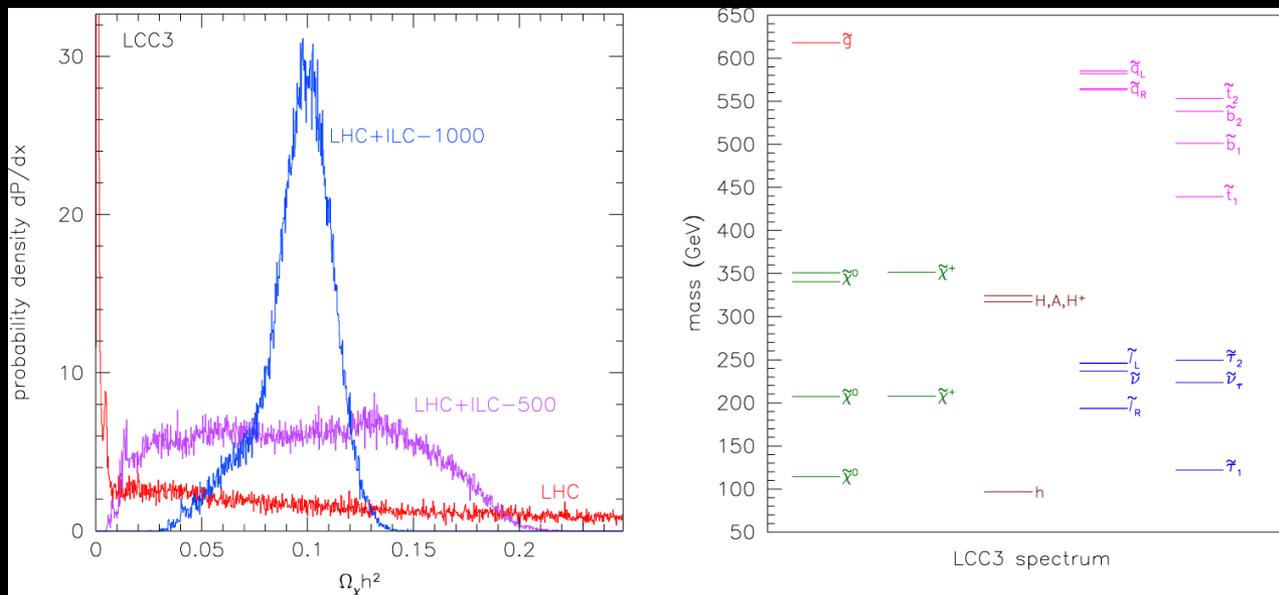
SUSY: Focus Point



[Baltz, Battaglia, Peskin & Wizansky]

さらに状況が悪くなったりもする

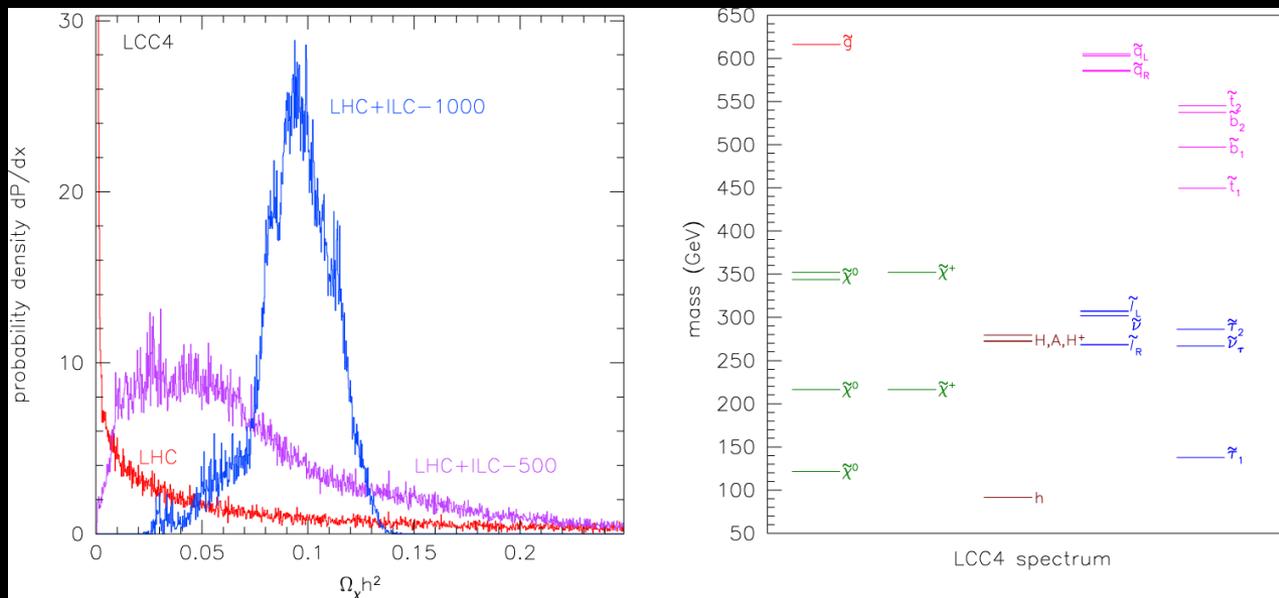
SUSY: Coannihilation



[Baltz, Battaglia, Peskin & Wizansky]

LHCではダメな場合の他の例

SUSY: Funnel 1

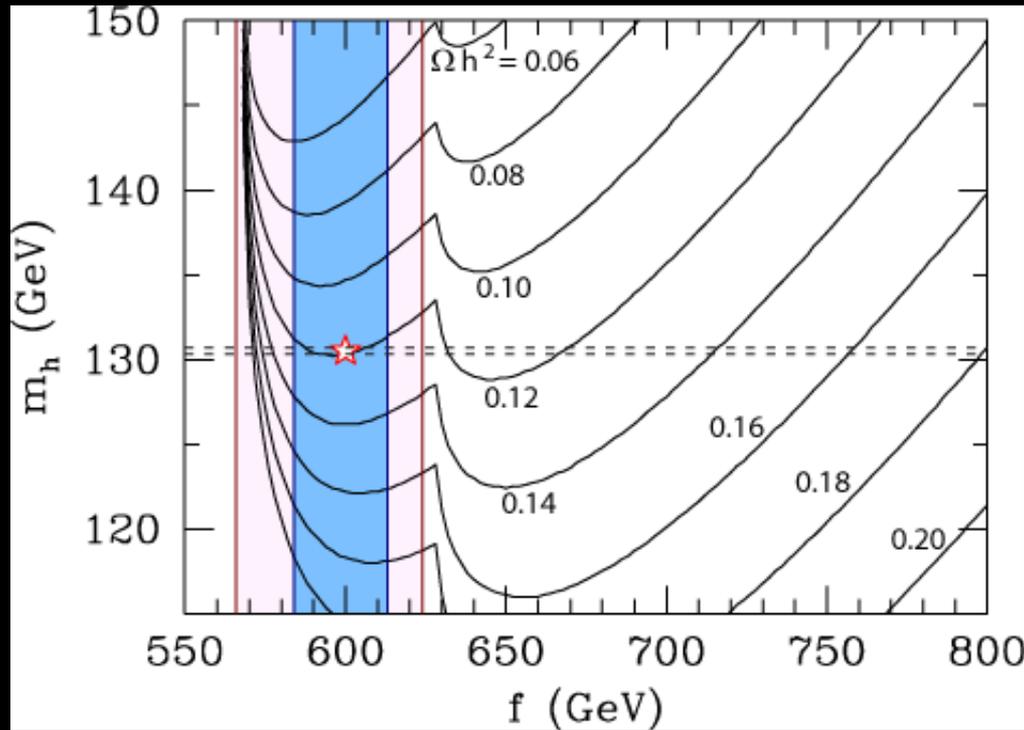


[Baltz, Battaglia, Peskin & Wizansky]

Little Higgs @ LHC

暗黒物質： A_H （重たいゲージボソン）

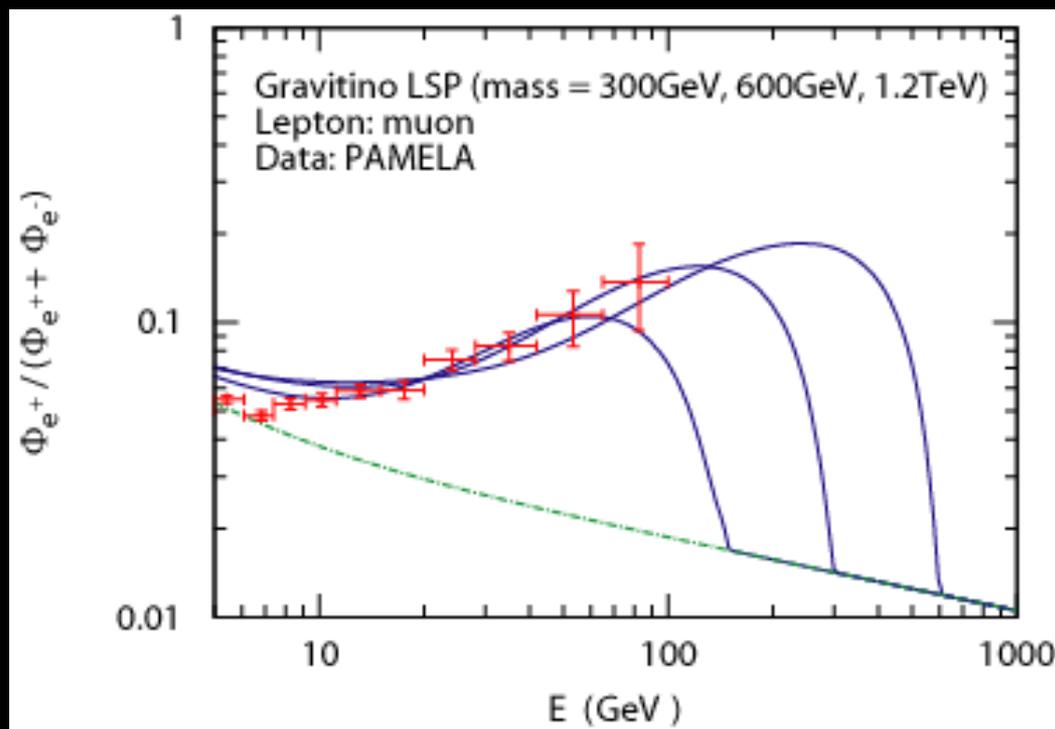
対消滅：2体のゲージ場へ（ヒッグスを介して）



[Matsumoto, Moroi & Tobe]

高エネルギー宇宙線の近年の話題

陽電子フラックスが（予想より）大きい：PAMELA
暗黒物質が不安定ならPAMELAの結果を説明可能



[Ishiwata, Matsumoto & Moroi]

まとめ

まとめ：特に結論はありません……

- ＞ ちなみに、そもそもどうして高エネルギー委員会で宇宙を
- ＞ 考えなくてはいけないかという話を諸井さんにしてもらおう
- ＞ のはどうでしょうか

⇒ 高エネルギー物理と宇宙物理は結構関連がある
(共に、ファンダメンタルな物理の理解が必要)

⇒ 双方を同時に考えると新しい物が生まれる (はず)

⇒ と言うか、どうして分野を分けたがるのでしょうか？
(日本だけですか？)